



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

JONI HILPINEN
PIENTALON ENERGIATEHOKKUUDEN JA KUSTANNUSTEN
OPTIMOINTI ENERGIASIMULOINNISSA GENEETTISELLÄ
ALGORITMILLA
Diplomityö

Tarkastaja:
Professori Hannu Ahlstedt
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
luonnontieteiden tiedekuntaneuvos-
ton kokouksessa 4. marraskuuta
2015

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Ympäristö- ja energiatekniikan koulutusohjelma

HILPINEN, JONI: Pientalon energiatehokkuuden ja kustannusten optimointi energiasimuloinnissa geneettisellä algoritmilla

Diplomityö, 58 sivua, 6 liitesivua

Syyskuu 2014

Pääaine: Talotekniikka

Tarkastaja: professori Hannu Ahlstedt

Avainsanat: Lämmitysjärjestelmät, kaukolämpö, lämpöpumput, aurinkolämmitys, monitavoiteoptimointi, geneettinen algoritmi

Etelä-Suomessa sijaitsevan, pinta-alaltaan 150 m², pientalon kustannuksia ja energiatehokkuutta optimoitiin. Kustannuksiin kuuluvat investointi- ja energiakustannukset 25 vuoden tarkasteluajalta. Energiatehokkuuden indikaattori oli E-luku. Suunnittelumuuttujiksi valittiin ulkoseinien, yläpohjan ja alapohjan lämmöneristystaso, ikkunoiden lämmönjohtavuus, rakennusvaipan ilmanpitävyys, ilmanvaihdon lämmöntalteenoton vuosihyötysuhde ja mahdollisen aurinkokeräinjärjestelmän keräinpinta-ala. Optimaaliset ratkaisut etsittiin erikseen kolmelle eri lämmitysjärjestelmälle. Tarkasteltavia lämmitysjärjestelmiä olivat maalämpö- ja kaukolämpöjärjestelmä sekä ilmalämpöpumpulla varustettu suora sähkölämmitysjärjestelmä.

Optimointi suoritettiin optimointi-simulointi menetelmällä, käyttämällä simulointiin TTY:ssa kehitettyä DBES-energiasimulointiohjelmaa sekä optimointiin Matlab-ohjelman geneettisen algoritmin funktiota. Menetelmässä optimointialgoritmi kokeilee erilaisia kokoonpanoja rakennukselle valittujen suunnittelumuuttujien suhteen ja lähettää ne energiasimulointiohjelmalle. Simulointiohjelma laskee ja palauttaa tiedon kokoonpanon investointi- ja käyttökustannuksista sekä energiankulutuksesta. Optimointialgoritmin tehtävä on löytää pareto-optimaalisia ratkaisuja, eli ratkaisuja joissa kustannuksia tai energiankulutusta ei voida laskea nostamatta toista. Käytännön kannalta tärkein ratkaisu on kustannusoptimaalinen ratkaisu, jossa investointi- ja energiakustannukset on minimoitu.

Kustannusoptimaalisten ratkaisujen perusteella rakenteet kannattaa eristää valituilla eristysmateriaaleilla siten, että saavutetaan ulkoseinille lämmönläpäisykerroin 0,16 - 0,17 W/m²K, yläpohjalle 0,08 W/m²K ja alapohjalle 0,15 - 0,16 W/m²K. Ikkunoiden lämmönläpäisykerroin 1,0 W/m²K on riittävä. Rakennuksen ilmanpitävyydellä ei ollut suurta merkitystä ja se vaihteli q₅₀ arvolla ilmoitettuna välillä 1,33 – 3,86 l/h. Lämmöntalteenoton hyötysuhde kannattaa käytetyillä hinnoilla aina maksimoida 80 prosenttiin. Aurinkokeräinjärjestelmä on kannattava investointi ainoastaan ilmalämpöpumpun kanssa, sillä se vähentää käyttöveden suoraa sähkölämmitystarvetta merkittävästi. Lämmitysjärjestelmän valinta vaikutti hieman optimaalisten ratkaisujen suunnittelumuuttujien arvoihin, mutta suurempi merkitys sillä oli energiatehokkuudelle ja kokonaiskustannuksille. Kustannusoptimaaliset ratkaisut laskettiin 25 vuoden tarkasteluajalla, 4 % korkokannalla ja olettamalla energian hintojen pysyvän nykytasolla. Herkkyystarkastelussa tutkittiin, miten tarkasteluajan pituus ja oletettu energian hintojen nousu vaikuttavat kustannusoptimaalisiin ratkaisuihin ja todettiin, että ratkaisut muuttuvat merkittävästi vasta pitkällä tarkasteluajoilla ja nopealla energian hinnan nousulla. Tuloksissa esitetään kustannusoptimaalisia ratkaisuja näihin erilaisiin taloudellisiin ennusteisiin.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Environmental and Energy Technology

HILPINEN, JONI: Energy efficiency and life cycle cost optimization of detached house using energy simulation tool and genetic algorithm

Master of Science Thesis, 58 pages, 6 Appendix pages

September 2014

Major: Building Services Engineering

Examiner: professor Hannu Ahlstedt

Keywords: heating systems, district heating, heat pumps, solar heating, multi objective optimization, genetic algorithm

A detached house in southern Finland with floor area of 150 m² was optimized for costs and energy efficiency. Costs include investment and energy costs of 25 year time period. The efficiency was evaluated according to the E-number. The chosen design variables were insulation levels of external walls, roof and floor slab, heat transfer coefficient of windows, air tightness of building, ventilation heat recovery efficiency and surface area of possible solar collector system. Optimization was performed separately for three different heating systems. Heating systems examined were a ground heat pump system, a district heating system and a direct electric heating system coupled with an air to air heat pump.

An optimization-simulation method was used to find optimal solutions. Simulation was carried out using energy simulation program DBES developed in TUT and optimization using genetic algorithm function in Matlab. In optimization-simulation method, the optimization algorithm tries out different configurations of design variables and gives them to the simulation program. The simulation program then calculates and returns the resulting total costs and energy consumption of the given configuration. The objective of the optimization algorithm is to find pareto-optimal solutions, meaning solutions for which it is impossible to lower total costs or energy consumption without increasing the other. In practice, the most important solution is the cost optimal solution where total costs have been minimized.

Based on the cost optimal solutions it is profitable to insulate structures with the chosen insulation materials so that overall heat transfer coefficient becomes 0,16 - 0,17 W/m²K for external walls, 0,08 W/m²K for roof and 0,15 - 0,16 W/m²K for floor slab. For window the U-value of 1,0 W/m²K is sufficient. The air tightness of the building was not too restricted and the optimal q₅₀ value varies between 1,33 – 3,86 m³/(m²h). Efficiency of heat recovery unit should always be maximized to 80 %. The solar collector system is a profitable investment only with direct electric heating as heat produced by the solar collector directly replaces bought electricity. The choice of the heating system has a small effect on the design variables of optimal solutions, but the main differences are found in the energy efficiency and costs of those systems. Cost optimal solutions were calculated using 25 year time period, 4 % rate of interest and assuming that the energy prices would stay at current level. The effect of time period length and yearly energy price increase on cost optimal solutions was analysed and the cost optimal solutions were determined to be very stable. Only with an extremely long time periods or a considerable energy price increase will the cost optimal solutions shift significantly. Cost optimal solutions for these cases are presented in the results as well.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on jatkoa DESY-tutkimusprojektissa aloitetulle tutkimukselle energia-tehokkaista lämmitysjärjestelmistä. DESY (Distributed Energy Systems) on TEKES:n ja kolmentoista yksityisen yrityksen rahoittama tutkimusprojekti, jossa tutkittiin laajasti hajautettua energiantuotantoa ja sen kehittämismahdollisuuksia. Tutkimukseen osallistui VTT:n lisäksi useita Suomen yliopistoja. TTY:n tutkimusryhmän tehtävänä oli kehittää energiasimulointityökalu aluelämpöverkkojen mallintamista varten, sekä selvittää erilaisien hybridilämmitysjärjestelmien kannattavia kokoonpanoja. Olin mukana tutkimusprojektissa tekemällä energiasimulointiohjelman lämmitysjärjestelmien mallit ja tämä näkyy työssä hieman yksityiskohtaisempana lämmitysjärjestelmien tarkasteluna. Tutkimusprojektin tavoitteet saavutettiin, mutta parhaiden lämmitysjärjestelmien etsiminen jäi vertailuksi muutaman erilaisen rakennuksen ja järjestelmän kesken. Rakennuksen ja lämmitysjärjestelmien todellinen optimointi onnistuttiin tekemään tässä diplomityössä TTY-säätiön stipendin avulla.

Professori Timo Kalema toimi tutkimusprojektin vetäjänä TTY:n puolelta sekä ohjaajana tässä diplomityössä. Hän neuvoi minua työn rakenteeseen ja rajaamiseen liittyvissä asioissa, sekä kieliäsun parantamisessa. Valitsin optimointimenetelmän ja suoritin optimoinnin itsenäisesti. Haluan kiittää Timoa aktiivisesta osallistumisesta ja kiinnostuksesta työtäni kohtaan.

26.9.2014

Joni Hilpinen

SISÄLLYS

Abstract	ii
Alkusanat	iii
SISÄLLYS	iv
Termit, symbolit ja indeksit	v
1 Johdanto	1
1.1 Tutkimusmenetelmä	1
1.2 Aiempi tutkimus	2
2 Energiasimulointityökalu	5
2.1 Rakennuksen energiankulutuksen laskeminen	5
2.2 Markkinoilla olevat lämpötekniset simulointiohjelmat	6
2.3 DBES, Dynamic Building Energy Simulation tool	7
2.4 Mallintamisen teoria	9
2.5 Lämpötaseisiin perustuva mallintaminen	10
2.6 Rakennuksen lämpötase	10
2.7 Lämmitysjärjestelmien kokoonpanot	14
2.7.1 Kaukolämpöjärjestelmät	15
2.7.2 Maalämpöpumppujärjestelmät	16
2.7.3 Ilma-ilmalämpöpumppujärjestelmä	18
2.8 Lämmöntuottojärjestelmien ja lämpövaraston mallit	19
2.8.1 Lämpövarasto	19
2.8.2 Aurinkokeräin	24
2.8.3 Lämpöpumput ja energiakaivo	27
3 Monitavoiteoptimointi	33
3.1 Geneettinen algoritmi	36
3.2 Optimointi-simulointityökalun rakenne	39
3.3 Optimoinnin lähtötiedot ja suunnittelumuuttujat	41
3.4 Optimointialgoritmin parametrit	45
3.5 Kohdefunktioiden määrittely	46
3.6 Energiankulutuksen ja hintojen määräytyminen	47
4 Tulokset	49
4.1 Järjestelmien energiatehokkuus	51
4.2 Kustannusoptimaaliset ratkaisut	52
4.3 Tarkasteluajan ja energian hinnan herkkyystarkastelu	53
5 Päätelmät	56
Lähteet	57
Liite 1: Tulokset: Suunnittelumuuttujien arvot pareto-optimaalisissa ratkaisuisissa	59
Liite 2: Varaajan konvektion mallinnustulokset	64

TERMIT, SYMBOLIT JA INDEKSIT

TERMIT

Dynaaminen malli	Malli, jonka käytöstä määrää nykyhetken lisäksi sen historia.
E-luku	Rakentamismääräyskokoelmassa annetuilla kertoimilla painotettu ostoenergian kulutus rakennuksen pinta-alaan suhteutettuna.
Elinkaarikustannukset	Rakennuksen kustannukset, joissa huomioidaan rakentamis-, ylläpito-, käyttö- ja purkukustannukset sekä mahdollinen jäännösarvo rakennuksen arvioidun elinkaaren ajalta.
Energiakustannusten kerroin	Tarkasteluajan ja energian vuotuisen hinnan muutoksen vaikutus vuotuisten kustannusten nykyarvoon suhteessa perustapaukseen. Perustapauksen tarkastelu aika on 25 vuotta ja energian hintojen nousu 0 % vuodessa. Korkokanta 4 %.
Geeni	Yksittäinen arvo, joka esiintyy kromosomissa.
Globaali minimi	Kohdefunktion todellinen minimi.
Kromosomi	Lista arvoja (geenejä), jotka yhdessä määrittelevät yksiselitteisesti ratkaisun optimointiongelmaan.
Lokaali minimi	Kohdefunktion paikallinen minimi, mutta ei koko kohdefunktion pienin arvo.
Lämmitysjärjestelmä	Yhdistelmä erilaisia alajärjestelmiä, joiden tarkoituksena on vastata rakennuksen kaikkiin lämmitystarpeisiin (tilojen, ilmanvaihdon sekä käyttöveden lämmitys).
Lämpökerroin	Lämpöpumpun ominaisuus, joka kuvaa tuotetun lämpötehon suhdetta otettuun sähkötehoon.
Pareto-optimi	Monitavoiteoptimoinnin ratkaisu, jonka minkään kohdefunktion arvoa ei voi parantaa huonontamatta toista.

SYMBOLIT

\dot{m}	massavirta [kg/s]
\dot{V}	tilavuusvirta [m ³ /s]
C	lämpökapasiteetti [J/K]
COP	lämpökerroin [-]
c_p	ominaislämpökapasiteetti [J/K kg]
e	energiakustannusten kerroin [-]
e	säteilyosuuskerroin [-]
F	näkyvyyskerroin [-]
f, g	pulssivastekertoimiin liittyvä kerroin [-]
H	porareian syvyys [m]
h_c	konvektiivinen lämmönsiirtokerroin [W/m ² K]

I	aurion säteilyn intensiteetti [W/m^2]
IAM	tulokulmakerroin [-]
K	kustannus [$\text{€}/\text{m}^2$]
k	vuotuinen kustannus [$\text{€}/\text{m}^2$] tai maaperän lämmönjohtavuus [W/mK]
P	pulssivastekerroin rakennukselle [-]
PLF	osakuormakerroin [-]
PLR	osakuormasuhde [-]
q	lämpövirta [W]
Q	pulssivastekerroin rakennukselle [-]
q ₅₀	ilmavuotoluku [$\text{m}^3/(\text{m}^2\text{h})$]
r	halkaisija [m]
R	pulssivastekerroin rakennukselle [-]
T	lämpötila [$^{\circ}\text{C}$]
U	lämmönläpäisykerroin [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]
V	tilavuus [m^3]
x	ilmavuotovirran laskemiseen liittyvä kerroin, joka huomioi rakennuksen kerroksien määrän [-]
α	aurion säteilyn tulosuunnan atsimuuttikulma [$^{\circ}$]
α'	terminen diffusiviteetti [m^2/s]
β	aurion säteilyn tulosuunnan korkeuskulma [$^{\circ}$]
Δt	aika-askleen pituus [s]
ρ	tiheys [kg/m^3]
Φ	teho [W]
Φ'	lämpöpulssi pituutta kohti [W/m]
ε	lämmönsiirtimen tehokkuus [-]
η	hyötysuhde [-]

INDEKSIT

a	systemin ympäristö
b	porareikä
c	konvektiivinen
C	kylmä
d	hajasäteily
D	suora säteily
e	poistoilma
ex	exerginen
f	vuotoilma
H	kuuma

i,j	yleisiä indeksejä
lkv	lämmin käyttövesi
m	meno
n	aika-askeleen indeksi
p	paluu
pl	poikkileikkaus
R	sisäilma
s	sisään
tl	tilojen lämmitys
tp	testipiste
u	ulos
up	ulkopinta

1 JOHDANTO

Työ- ja elinkeinoministeriön mukaan rakennusten energiankäyttö kattaa noin 40 % koko Suomen loppuenergiankäytöstä (Työ- ja elinkeinoministeriö, 2009). Energiankäyttöä tällä sektorilla on pyritty vähentämään järjestelmällisesti uusilla rakentamismääräyksillä etenkin uudisrakentamisessa. Viimeisen kolmenkymmenen vuoden aikana uudisrakennusten tilojen lämmitystarpeen onkin arvioitu laskeneen yli 60 % rakentamismääräysten ansiosta (Viot & Hilpinen, 2014). Energiatohokkuuden parantamisen taustalla on Euroopan Unionin energiatohokkuusdirektiivi (Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi energiatohokkuudesta 2012/27/EU, 2012), jossa asetetaan tavoitteeksi 20 % ennusteita pienempi loppuenergian kulutus vuonna 2020. Direktiivi pyrkii myös taloudellisiin hyötyihin energiatohokkuudessa, joten vaadittujen toimenpiteiden on oltava kustannustehokkaita. Suomessa lähestytään kustannustehokkuuden rajoja uudisrakentamista koskeissa määräyksissä. On tärkeää selvittää, kuinka paljon uudisrakentamisessa voidaan vielä parantaa energiatohokkuutta kustannustehokkaasti.

1.1 Tutkimusmenetelmä

Työssä halutaan löytää kustannusoptimaalinen energiatohokkuuden taso keskikokoiselle omakotitalolle Etelä-Suomessa. Energiatohokkuuden parantamiseen pientaloissa on useita vaihtoehtoja, joista tarkasteluun valittiin rakenteiden lämmöneristys ja ilmatiiviys, ikkunoiden lämmöneristys, ilmanvaihdon lämmön talteenoton hyötysuhde sekä mahdollisen aurinkokeräimen pinta-ala. Optimaaliset tasot lasketaan Etelä-Suomen ilmastossa kolmelle erilaiselle lämmöntuottojärjestelmälle: kaukolämpö-, maalämpöpumppu- ja ilmalämpöpumppujärjestelmille. Tehtävä ei ole helppo, sillä muuttujia ei voi optimoida toisistaan riippumatta. Yksittäisen muuttujan optimaalinen arvo riippuu muiden muuttujien optimaalisesta arvosta. Kustannusoptimaalisen ratkaisun lisäksi halutaan tutkia energiatohokkaampia ratkaisuja monitavoiteoptimoinnin keinoin. Minimoitaviksi kohdefunktioiksi valitaan kokonaiskustannukset ja E-luku. Kokonaiskustannuksiin tarkastelussa kuuluvat investointikustannukset ja perustapauksessa 25 vuoden energiakustannukset. Investointikustannukset eivät ole absoluuttisia rakennuksen kustannuksia, vaan niihin on huomioitu ainoastaan rakennuksen osat ja järjestelmät jotka voivat muuttua optimoinnissa.

Optimointi suoritetaan energiasimulointiohjelman ja geneettisen optimointialgoritmin yhdistelmällä, jossa energiasimuloinnin tehtävä on laskea kohdefunktioiden arvot optimointialgoritmin valitsemilla suunnittelumuuttujien arvoilla. Tehtävän monimutkaisuuden takia optimointialgoritmi on oleellisessa asemassa optimaalisten ratkaisujen löytämisessä. Työssä esitellään energiankulutuksen laskennan periaatteita, DBES energiasimulointiohjelma ja geneettisen algoritmin toiminta.

1.2 Aiempi tutkimus

Geneettisen algoritmin käyttäminen rakennuksen energiatehokkuuden optimointiin on yleistynyt vasta viime vuosikymmenellä. Erilaisia ohjelmia, jotka hyödyntävät algoritmia, on kehitetty ja niiden on todettu löytävän optimaalisia tai ainakin lähes optimaalisia ratkaisuja tehokkaasti (Palonen et al., 2009). Tutkimuksia rakennusten optimoinnista geneettisellä algoritmilla on tehty useita, mutta niissä on suuria eroja suunnittelumuuttujien ja kohdefunktioiden valinnassa. Suunnittelumuuttujina on käytetty muun muassa rakennuksen muotoa, elementtien sijoittelua, ohjausstrategioita ja laitemitoitusta. (Wright, 2002; Ooka, 2009; Tuhus-Dubrow & Krarti, 2010). Rakennuksen energiatekniseen optimointiin liittyy niin monta muuttujaa, että niitä kaikkia ei ole mahdollista tai ainakaan järkevää tarkastella yhdessä tutkimuksessa. Muuttujien suuren määrän lisäksi optimoitavien suureiden valinta ei ole yksiselitteistä, eikä niitä kannata valita kuin korkeintaan kaksi kerrallaan tulosten selkeyden vuoksi. Kirjallisuuskatsaus tehtiin tutkimuksiin, joissa geneettistä algoritmia oli käytetty jonkin lämpöteknisen simulointiohjelman kanssa optimointiin. Tämän työn suunnittelumuuttujia ja kohdefunktiota käyttäviä tutkimuksia ei löytynyt.

Tuhus-Dubrow ja Krarti (Tuhus-Dubrow & Krarti, 2010) käyttivät energiasimulointiohjelmia DOE-2 ja EnergyPlus sekä geneettistä algoritmia selvittäessään elinkaarikustannuksiltaan optimaalista rakennuksen muotoa ja suuntausta. Suunnittelumuuttujiin kuului rakennuksen muodon lisäksi muun muassa kaksi parametria muodon mittasuhteisiin, ikkunoiden sijoittelu ja aurinkosuojaus, rakennuksen suuntaus, varjostusten käyttö sekä joitain eristysvaihtoehtoja rakenteelle. Tutkimuksen selkeimpinä tuloksina todettiin, että pohjamuodoltaan neliön muotoinen rakennus oli optimaalinen, mutta suorakulmion muotoinenkaan rakennus ei jäänyt kauas optimista. Aurinkoisessa, lämmitysvoittoisessa ilmastossa ikkunoiden keskittäminen eteläiselle seinälle on kannattavaa, kun taas jäähdytysvoittoisessa ilmastossa ne kannattaa sijoittaa pohjoiseen.

Wang tutkimusryhmineen (Wang et al., 2005) hyödynsi geneettistä algoritmia suorakulmaisen rakennuksen monitavoiteoptimoinnissa. Kohdefunktiona toimivat rakennuksen elinkaarikustannukset sekä -ympäristövaikutukset ja niitä minimoitiin rakennuksen mittasuhteilla, suuntauksella, ikkunoiden tyypillä ja pinta-alalla sekä ulkoseinien ja katon rakenteella. Ympäristövaikutusten arviointiin käytettiin ATHENA ohjelmistoa. Tulokset eivät ole yhtä yksiselitteisiä kuin normaalissa yhden kohdefunktion optimoinnissa, vaan pareto-optimaalisia ratkaisuja löytyi kolmelta eri rintamalta. Rintamat erotuivat toisistaan erityisesti ulkoseinän rakenteen perusteella, joissa muurattu seinä oli halvempi, mutta ympäristövaikutuksiltaan suurempi kuin teräsrakenteinen seinä, kunhan siinä käytettiin ohuempaa eristystä.

Aalto-yliopistossa tehdyssä tutkimuksessa (Hasan et al., 2008) optimoitiin suorakulmaisen rakennuksen elinkaarikustannuksia IDA ICE 3.0 energiasimulointiohjelmalla ja GenOpt optimointiohjelmalla. Optimoitava rakennus koostui yhdestä vyöhykkeestä ja

se oli varustettu suoralla sähkölämmityksellä. Suunnittelumuuttujia olivat lähinnä rakenteiden eristyspaksuus, mutta myös ikkunoiden U-arvolle ja lämmön talteenoton hyötysuhteelle oli kaksi vaihtoehtoa. Optimointi suoritettiin kolmelletoista erilaiselle tapaukselle, jotka erosivat toisistaan eristeiden hinnoittelussa, elinkaaritarkastelun pituudessa (20 ja 50 vuotta) sekä energian hinnannousussa (1 % ja 5 % vuodessa). Kustannusoptimaalinen ulkoseinän U-arvo vaihteli tapauksesta riippuen $0,19 - 0,06 \text{ W/m}^2\text{K}$. Suurimman kustannusoptimaalisen ulkoseinän U-arvon tapauksessa tarkastelu-aika oli 20 vuotta lyhempi ja energian hintojen nousu maltillinen 1 % vuodessa. Pienin optimaalinen U-arvo saatiin tapaukselle, jossa tarkastelu-aika oli 50 vuotta ja energian hintojen nousu 5 % vuodessa. Muissa rakenteissa U-arvon vaihtelu oli pienempää; yläpohjalle kustannusoptimaalinen U-arvo oli välillä $0,11 - 0,05 \text{ W/m}^2\text{K}$ ja alapohjalle $0,15 - 0,11 \text{ W/m}^2\text{K}$ tapauksesta riippuen. Tuloksista nähdään, että talouslaskelmien perusoletuksilla on merkittävä rooli optimaalisten arvojen määräytymisessä. Suunnittelumuuttujien pienen määrän ansiosta tutkimuksessa voitiin myös verifioida GenOpt ohjelman optimointimenetelmän toimivuus. Resurssit riittivät käymään läpi kaikki mahdolliset suunnittelumuuttujien yhdistelmät ja niiden perusteella voitiin todeta, että GenOpt oli löytänyt optimaaliset ratkaisut. GenOptin optimointimenetelmä perustuu geneettiseen algoritmiin, mutta se hyödyntää myös muita optimointimenetelmiä. Tulosta voidaan kuitenkin pitää yhtenä osoituksena geneettisen algoritmin toimivuudesta.

Lämmitysjärjestelmän vaikutusta kustannusoptimaaliseen energiatehokkuuteen tutkittiin raportissa ”Energiatehokkuutta koskevien vähimmäisvaatimusten kustannusoptimaalisten tasojen laskenta” (Ympäristöministeriö, 2012a). Tarkasteltava rakennus oli kaksikerroksinen 180 m^2 pientalo ja tarkasteltavia lämmitysjärjestelmiä olivat sähkö-, maalämpö-, kaukolämpö-, pelletti- ja öljylämmitys. Energiankulutuksen laskentaan käytettiin IDA-ICE 4.2 energiasimulointiohjelmaa, mutta optimointiin ei käytetty mitään algoritmia, vaan se oli tehty tarkastelemalla neljää erilaista energiatehokkuuteen liittyvää pakettiratkaisua. Ensimmäinen pakettiratkaisu vastasi ulkoseinien, yläpohjan, alapohjan ja ikkunoiden U-arvoja $0,17 \text{ W/m}^2\text{K}$, $0,09 \text{ W/m}^2\text{K}$, $0,16 \text{ W/m}^2\text{K}$ ja $1,0 \text{ W/m}^2\text{K}$. Ulkoseinän ilmantäivyydelle käytettiin ilmavuotolukua $q_{50} 4,0 - 0,6 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{h})$ ja lämmön talteenotto laitteen hyötysuhdetta 65 %. Jokainen seuraava pakettiratkaisu paransi joitain edeltäjänsä ratkaisuja päätyen viimeiseen pakettiin, jonka eristyspaksuudet vastasivat U-arvoja $0,08 \text{ W/m}^2\text{K}$, $0,05 \text{ W/m}^2\text{K}$, $0,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ ja $0,8 \text{ W/m}^2\text{K}$ vastaavassa järjestyksessä kuin aiemmin. Ilmavuotoluku oli parhaassa paketissa $0,6 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{h})$ ja lämmön talteenoton hyötysuhde 80 %. Kustannusoptimaalinen pakettiratkaisu etsittiin erikseen kaikille lämmitysjärjestelmille useilla erilaisilla energian hinnannousuoletuksilla ja diskonttokoroilla. Lähes kaikissa tapauksissa parhaaksi pakettiratkaisuksi osoittautui kakkospaketti, jossa ensimmäisen pakettiratkaisun arvoja oli paranneltu ikkunoiden lämmönläpäisykertoimen ($0,8 \text{ W/m}^2\text{K}$), ilmavuotoluvun ($2,0 - 0,6 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{h})$) ja lämmön talteenoton (80 %) osalta. Pienellä diskonttokorolla ja nopealla energianhintojen nousulla kolmas pakettiratkaisu oli kustannuksiltaan alhaisin kaikille muille järjestelmille paitsi maalämpöjärjestelmälle, jolle kakkospaketti pysyi aina parhaana. Kolmannessa pakettiratkaisussa oli parannettu rakenteiden eristystasoa suhteessa kakkospakettiin. Ulkoseinien, yläpohjan ja alapohjan

U-arvoina käytettiin $0,13 \text{ W/m}^2\text{K}$, $0,07 \text{ W/m}^2\text{K}$ ja $0,13 \text{ W/m}^2\text{K}$. Tuloksien perusteella todettiin, että järjestelmästä riippuen kustannusoptimaalinen energiatehokkuus on 11 – 17 % parempi kuin määräysten määräämä taso.

2 ENERGIASIMULOINTITYÖKALU

2.1 Rakennuksen energiankulutuksen laskeminen

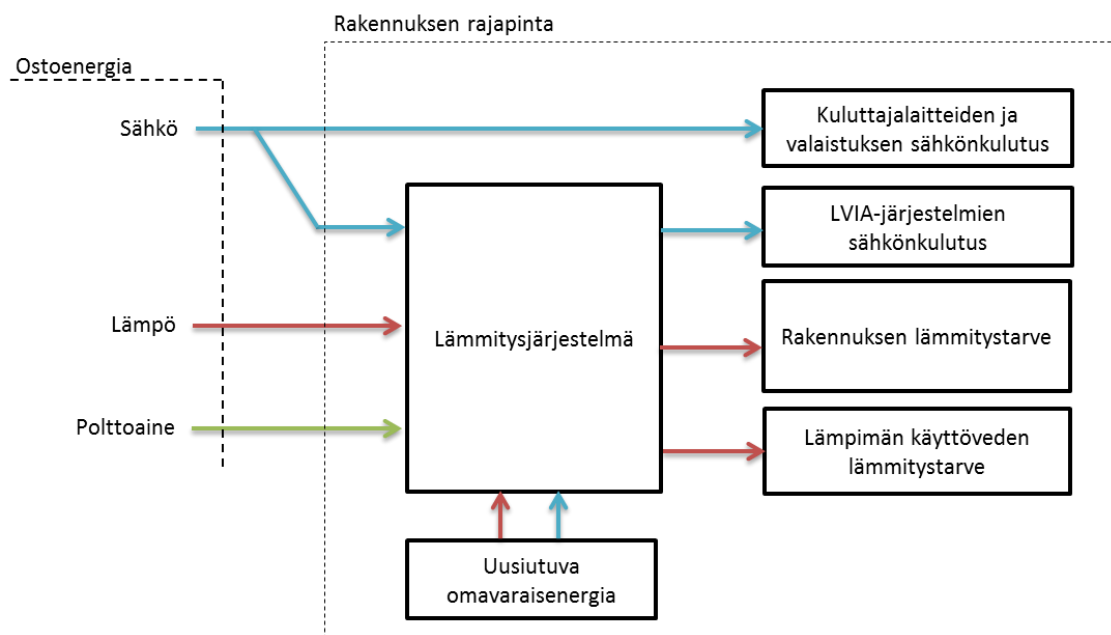
Rakennuksen energiankulutukseen vaikuttavat pääasiassa rakennuksen ominaisuudet ja ilmasto, jossa se sijaitsee. Energiankulutuksen laskenta voi perustua yksinkertaisiin kuukausitason menetelmiin tai dynaamiseen simulointiin. Yksi kuukausitason menetelmistä on Suomen rakentamismääräyskokoelman osan D5 laskentaohje ”Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta” (Ympäristöministeriö, Asunto- ja rakennusosasto, 2013). Kuukausitason tarkastelussa rakennuksen energiankulutusta arvioidaan yksinkertaisilla energiavirtojen lämpötaseilla tai korkeintaan kvasistationääreillä menetelmillä lämpökuormien hyödyntämiskertoimen yhteydessä. Tulokset antavat melko hyviä arvioita energiankulutukselle rakennuksissa, joissa ei käytetä jäähdytystä. Jäähdytys on kuukausitasolla liian vaikea mallintaa, sillä yö-päivä vaihtelu pitäisi huomioida tarkemmin. Yksityiskohtaisempia tuloksia rakennuksen energiavirroista saadaan dynaamisilla simulointityökaluilla, joissa kuukauden sijaan voidaan tarkastella huomattavasti lyhyempiä, yleensä korkeintaan tunnin, aika-askelia. Simuloinnissa huomioidaan suurempi määrä muuttujia ja tuloksissa voidaan tarkastella energiankulutuksen lisäksi muitakin suureita kuten sisätilojen lämpötilaa. Lyhyen aika-askeleen ansiosta auringon säteilyn ja muiden lämpökuormien hyödyntäminen ja jäähdytystarpeen laskenta on tarkempaa.

Rakennuksen ostoenergiankulutuksella tarkoitetaan kaikkia rakennukseen ulkopuolelta tulevia energiavirtoja, pois lukien itse tuotettu uusiutuva energia. Ostoenergiankulutus muodostuu sisätilojen, tuloilman ja käyttöveden lämmityksen lisäksi kuluttajalaitteiden, LVI-järjestelmien sekä mahdollisen jäähdytyksen sähkönkulutuksesta. Ostoenergia koostuu erilaisista energiatyypeistä kuten sähkö, kaukolämpö ja erilaiset polttoaineet.. Rakennusten ostoenergiankulutuksen vertailu voi olla hankalaa, jos ne käyttävät erilaisia energialähteitä. Erityyppisten energianlähteiden kulutuksia ei voida laskea yhteen, sillä ne eivät ole samanarvoisia. Ei ole kuitenkaan mielekäästä tarkastella rakennusten energiankulutusta kaikkien eri energiatyyppien suhteen, vaan niiden yhteenlaskemiseksi on määritelty E-luvun käsite. E-luku on energiamuotojen kertoimilla painotettu rakennuksen vuotuinen ostoenergiankulutus rakennustyyppin standardikäytöllä lämmitettyä nettoalaa kohden. E-luku saadaan laskemalla yhteen ostoenergian ja energiamuotojen kertoimien tulot energiamuodoittain. Energiamuotojen kertoimet ovat Suomessa seuraavat:

– sähkö	1,7
– kaukolämpö	0,7
– kaukojäähdytys	0,4
– fossiiliset polttoaineet	1,0
– rakennuksessa käytettävät uusiutuvat polttoaineet	0,5 (Ympäristöministeriö, 2012b)

E-luku tulee laskea rakentamismääräyskokoelman D3 määrittämällä tai sen hyväksymällä tavalla.

Kuva 1 on yksinkertaistettu kaavio rakennukseen tulevasta ja sen sisäisistä energiavirroista. Kuvassa ei näytetä järjestelmien lämpöhäviöitä tai lämmitysjärjestelmän sisäisiä kytkentöjä. Huomaa, että lämmitysjärjestelmälle tuleva sähkö voi kattaa myös lämmitystarpeet, jos lämmitysjärjestelmä sisältää esimerkiksi lämpöpumpun tai sähkövastuksia. LVI-järjestelmien sähkönkulutukseen ei sisälly suoraan lämmöntuottoon kuuluvien laitteiden sähkönkulutus, kuten lämpöpumppujen kompressorit tai sähkövastukset.



Kuva 1. Ostoenergian määräytyminen.

2.2 Markkinoilla olevat lämpötekniset simulointiohjelmat

Kattavan, mutta ehkä hieman vanhentuneen katsauksen markkinoilla olevista simulointiohjelmissa tarjoaa VTT:n tiedote ”Rakennusten lämpötekni- sen suunnittelun ja ylläpidon simulointityökalun kehityspäätökset” (Karjalainen et al. 1999). Eri simulointiohjelmiä ovat esimerkiksi BLAST, BUS++, CHEETAH, CLIM2000, DOE, ENERGY, ESP, HTB, HVACSIM+, IDA, PIBNET, SERI-RES, SUNCODE, TASE, TRYNSYS ja tsbi3. Yhteisiä piirteitä ohjelmille ovat niiden modulaarinen rakenne ja kyky ratkaista tehokkaasti laskennassa esiintyviä epälineaarisia yhtälöitä tai suuria yhtälöryhmiä. Modulaarisella rakenteella tarkoitetaan ohjelman koostumista erillisistä aliohjelmissa, joilla on eri tehtävät, kuten energiatarpeen laskenta, ostoenergian laskenta tai systeemien ratkaiseminen. Eroavaisuuksina mainittakoon laskentamenetelmät, käyttöliittymä, ohjelmointikieli ja yhteensopivuus muiden ohjelmien kanssa. Kaikki luetellut simulointiohjelmat laskevat rakennuksen energiatarpeen, mutta energiatarpeen kattamiseen käytettyjen lämmitysjärjestelmien mallintaminen on vaihtelevaa. (Karjalainen et al., 1999)

Dynaamisten simulointiohjelmien rakennuksen lämpövirtojen laskenta perustuu yleensä lämpötaseisiin. Lämpötaseisiin perustuvassa menetelmässä rakennus jaetaan vyöhykkeisiin ja jokaiselle vyöhykkeelle muodostetaan oma yhtälöryhmä, joka sisältää pintojen ja sisäilman lämpötaseen. Yhtälöryhmä ratkaistaan yhdessä kaikkien vyöhykkeiden yhtälöryhmien kanssa, jolloin saadaan koko rakennuksen lämpötasapaino laskettua. Lämpötasemenetelmissä on eroja muun muassa sen numeerisen menetelmän mukaan, jota käytetään ratkaisemaan lämmön johtuminen rakenteissa. Lämmönjohtumista voidaan kuvata käyttämällä ”keskitetty lämpökapasiteetti”-menetelmää, differenssimenetelmää, pulssivastekerroinmenetelmää, Z-siirtofunktiomenetelmää, Fourierin menetelmää tai Laplace-muunnosmenetelmää. Näistä menetelmistä pulssivastekerroin esitellään tarkemmin luvussa 2.6. (Karjalainen et al., 1999)

2.3 DBES, Dynamic Building Energy Simulation tool

DBES koostuu rakennusmallista (tilojen lämmitystarve ja lämpötilat) sekä lämmitysjärjestelmien mallista (ostoenergian laskeminen, järjestelmämallinnus). Se on kehitetty laskennallisesti mahdollisimman kevyeksi, jotta sillä voisi simuloida suuria määriä rakennuksia kohtuullisessa ajassa. Alun perin tähän oli syynä aluelämpöverkkojen mallintaminen, mutta samasta syystä ohjelma soveltuu hyvin myös optimointiin. Ohjelma on Matlab-pohjainen, joten sillä on käytössään laaja kirjasto erilaisia työkaluja yhtälöryhmien ja epälineaaristen ongelmien ratkaisuun.

DBES on dynaaminen energiasimulointityökalu rakennuksen energiavirtojen laskentaan ja sen rakennusmallin lämpötaseisiin perustuva laskenta pohjautuu VTT:ssa ja TTY:ssa aiemmin kehitettyyn TASE tietokoneohjelmaan (Haapala et al., 1989). Rakenteissa tapahtuvan epästationäärin lämmönsiirron laskentaan käytetään Mitalasin ja Arsenaultin pulssivastekerroinmenetelmällä (Mitalas & Arsenault, 1972). Rakennusmalli on validoitu kahden eurooppalaisen standardin mukaisesti:

- *EN15255 – Thermal performance of buildings – Sensible room cooling load calculation - General criteria and validation procedures* (CEN, 2007a)
- *EN15265 – Thermal performance of buildings – Calculation of energy needs for space heating and cooling using dynamic methods – General criteria and validation procedures* (CEN, 2007b)

Rakennuksen tärkeimmät syöttötiedot ovat:

- Maantieteellinen sijainti (pituus- ja leveysasteet)
- Rakennuksen suuntaus
- Sisäisten ja ulkoisten pintojen ominaisuudet (konvektiivinen lämmönsiirtokerroin, emissiviteetti, absorptio- ja heijastuskerroin)
- Huoneiden mitat ja niiden väliset yhteydet
- Ikkunoiden, ovien, aukkojen ja lämmityspattereiden paikat ja mitat.

- Aurinkosuojauksen ominaisuudet (ulkoinen varjostus tai ikkunaan integroitu)
- Rakenteiden termiset ominaisuudet
- Sisäiset kuormat mukautettavilla aikatauluilla (konvektiivinen- ja säteilyosuus)
- Ilmanvuotoluku
- Ilmanvaihdon tyyppi, aikataulut ja ilmavirrat
- Ilmanvaihdon lämmöntalteenoton hyötysuhde
- Huoneiden väliset ilmavirrat
- Ideaalinen lämpötilan kontrollointi ilmanlämpötilan tai operatiivisen lämpötilan mukaan

Lämmitysjärjestelmän tärkeimmät syöttötiedot:

- Järjestelmän tyyppi (kaukolämpö, maalämpö tai ilmalämpöpumppu)
- Tilojen lämmitysjärjestelmän tyyppi (patteri-, lattia- tai ilmalämmitys)
- Varaajan koko ja tyyppi
- Aurinkokeräimien pinta-ala, tyyppi ja laatu
- Lämpöpumpun lämmitysteho ja lämpökerroin

DBES:in tärkeimmät tulostetiedot:

- Huoneiden lämpötilat (viihtyvyys)
- Tilojen ja ilmanvaihdon lämmitystarve (teho ja energia)
- Järjestelmien ostoenergiat ja E-luku

Käyttäjä syöttää tarkasteltavan rakennuksen lähtötiedot Excel-tiedostoon, joka toimii myös DBES-ohjelman käyttöliittymänä Matlabin rinnalla. Laskennan tärkeimmät tulokset ohjelma tallentaa erilliseen Excel-tiedostoon, kun taas muut tulokset löytyvät Matlabin työpöydältä laskennan jälkeen. Laskenta tapahtuu tunnin aika-askelissa ratkaisemalla ensin rakennusmallin lämpötaseet, minkä jälkeen rakennuksen lämmitystarve annetaan lämmitysjärjestelmän mallille. Lämmitysjärjestelmän malli laskee tarvittavan ostoenergian lämmitystarpeen kattamiseen. Simuloitava aikaväli on perusoletuksena yksi vuosi. Kun laskenta on suoritettu kaikille aika-askelille, tulokset kootaan yhteen Excel-tiedostoon. Aika-askelten tulosten lisäksi lasketaan lämmitysjärjestelmän käytön perusteella taloteknisten järjestelmien sähkönkulutus ja kuluttajalaitteiden sähkönkulutus, jotka huomioidaan E-luvun laskennassa. DBES-ohjelman antama E-luku ei ole virallinen E-luku, sillä DBES ei ole rakentamismääräyskokoelman vaatima hyväksytty laskentamenetelmä. Rakennuksen lämmitystarve lasketaan määräysten mukaisesti, mutta lämmitysjärjestelmien laskentamenetelmiä ei ole hyväksytetty. Etenkin aurinkokeräimen ja ilmalämpöpumpun vaikutus E-lukuun on DBES-ohjelman tuloksissa suurempi kuin rakentamismääräyskokoelman yksinkertaisella menetelmällä laskettuna, jossa järjestelmien energian tuotto on tarkoituksella arvioitu alakanttiin. Tuloksena saatua E-lukua voidaan kuitenkin pitää hyvänä arviona ja mikä tärkeintä, ne ovat keskenään vertailukelpoisia.

2.4 Mallintamisen teoria

Mallin tehtävä on kuvata mallinnetun kohteen käyttäytymistä mahdollisimman tarkasti annetuilla lähtö- ja ohjaustiedoilla (Kuva 2). Malleja voidaan luokitella niiden toiminnan perusteella erilaisiin luokkiin. Joitain näistä luokitteluista esitellään alla, jotta niitä voidaan myöhemmin käyttää kuvaamaan mallinnettuja järjestelmiä helposti ja täsmällisesti.



Kuva 2. Mallin toiminta.

Malli on deterministinen, jos sen ratkaisuun ei sisälly mitään satunnaisuutta. Toisin sanoen samoilla lähtö- ja ohjaustiedoilla saadaan aina täsmälleen sama ratkaisu. Deterministisen mallin vastakohta on stokastinen malli, jonka ratkaisumenetelmiin liittyy satunnaisuuksia ja todennäköisyyksiä. Tässä työssä käytetyt mallit ovat deterministisiä lukuun ottamatta optimointiin käytettyä algoritmia, joka on stokastinen.

Jos malli kuvaa systeemin muutoksia ajassa, se voi olla jatkuva tai diskreetti. Diskreetin mallin syöttötiedot annetaan ja tulostiedot luetaan vain tietyissä aikapisteissä, kun taas jatkuvan mallin syöttötiedot ja ulostulotiedot annetaan ajan suhteen jatkuvina funktioina. Numeerinen malli on aina diskreetti ja analyttinen jatkuva. Rakennuksille ja niiden lämmitysjärjestelmille ei voi kehittää analyttistä mallia järjestelmien monimutkaisuuden vuoksi.

Ajan suhteen muuttuva malli voi olla joko dynaaminen tai staattinen. Staattinen malli tarvitsee syöttötiedoikseen pelkästään ratkaistavan ajanhetken syöttötiedot, kun taas dynaamisen mallin ratkaisuun vaikuttaa myös aiempien ajanhetkien syöttötiedot ja tilasuureet. Dynaaminen malli on tarpeellinen, jos järjestelmän aiemmalla tilalla tai syöttötiedoilla on vaikutusta nykytilaan. Esimerkkinä dynaamisesta mallista voidaan mainita maalämpöpumpun energiakaivo, jonka lämpötilaan vaikuttaa merkittävästi sen aiempi kuormitus. Dynaamisen ja staattisen mallin ominaisuuksia voidaan yhdistellä niin sanotuksi kvasistationääriksi malliksi, joka huomioi järjestelmän dynaamisuutta staattisessa mallissa jonkin järjestelmää kuvaavan suureen, kuten aikavakion tai pulssivastekertoimen avulla. (Ljung & Glad, 1994)

Jos mallin sisäistä toimintaa ei tarvitse kuvata tai se on tarpeettoman vaikeaa, voidaan käyttää niin sanottua black-box-mallia. Black-box-mallissa mallin kuvaaman systeemin sisäisiä tilasuureita ei tunneta, vaan ainoastaan syöttötietojen vaikutus ulostulotietoihin. Tällaisia malleja voidaan luoda todellisille systeemeille, joiden vasteita on mitattu eri syöttötiedoilla, jolloin näiden kahden välille voidaan muodostaa funktio.

2.5 Lämpötaseisiin perustuva mallintaminen

Tämän kappaleen teoria perustuu DBES-ohjelmassa käytettyihin yhtälöihin ja laskentamenetelmiin. Lämpötaseita käytetään DBES-ohjelmassa huoneiden lisäksi ilmanvaihdon, varaajien, lämmönvaihtimien ja putkikytkentöjen mallintamiseen. Lämpötase tarkastelee valittua kontrollitilavuutta ja sen ympäristön välistä lämmönsiirtoa. Menetelmän perustana on kaava

$$\phi_{\text{sisään}} - \phi_{\text{ulos}} = \phi_{\text{varastoitunut}} \quad (1)$$

Sisään ja ulos tulevat lämpövirrat riippuvat systeemistä, mutta ne koostuvat yleensä johtumiseen, konvektioon ja virtauksiin liittyvistä lämmönsiirron termeistä. Systeemiin varastoituva lämpöteho nostaa kontrollitilavuuden väliaineen lämpötilaa nopeudella

$$\frac{dT_{\text{väliaine}}}{dt} = \frac{\phi}{c_p V \rho} \quad (2)$$

missä

- ϕ on varastoitunut teho [W]
- c_p ominaislämpökapasiteetti [J/kg K]
- ρ on väliaineen tiheys [kg/m³]
- T on lämpötila [K]
- t on aika [s]
- V on tilavuus [m³]

Virtaavan väliaineen tapauksessa virtauksen lämpötilan muutos saadaan kaavasta

$$\Delta T_{\text{virtaus}} = \frac{\phi_{\text{varastoitunut}}}{c_p \dot{m}_{\text{virtaus}}} \quad (3)$$

missä

- \dot{m} on massavirta [kg/s]

2.6 Rakennuksen lämpötase

Rakennuksen lämpötaseessa jokainen huone tai vyöhyke käsitellään erikseen. Huone jaetaan yhteen sisäilman kontrollitilavuuteen ja useaan rakenteiden kontrollipintaan. DBES-ohjelmassa vyöhykkeiden on oltava pohjamuodoltaan aina suorakulmioita, jolloin kontrollipintoja on kuusi kappaletta (neljä seinää, katto ja lattia). Kontrollipintojen lämpötase eroaa normaalista lämpötaseesta siten, että siihen ei varastoidu suoranaisesti lämpöä, vaan rakenteisiin varastoituva lämpö otetaan huomioon pulssivastekerroinmenetelmällä

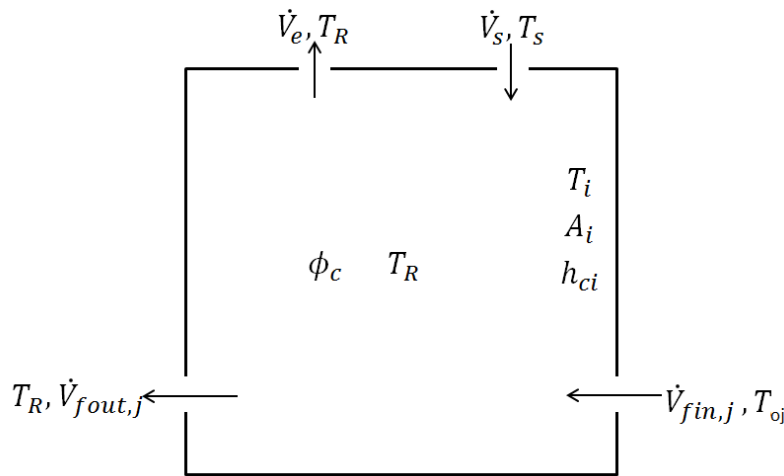
epästationäärinä lämpövirtana. Yksittäisen vyöhykkeen tai huoneen mallintamisessa sisäilmalle voidaan määrittellä lämpötase (kuva 3).

$$\sum_i h_{ci} A_i (T_{i,n} - T_{R,n}) - \rho c \left[\dot{V}_e + \sum_j \dot{V}_{f_{out,j}} \right] T_{R,n} + \rho c \dot{V}_s T_{s,n} + \sum_j \dot{V}_{f_{in,j}} \rho c T_{oj,n} + \phi_{c,n} = C_R dT_R / dt \quad (4)$$

missä

h_c on konvektiivinen lämmönsiirtokerroin [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]

C_R on huoneen ilman lämpökapasiteetti [J/K]



Kuva 3. Huoneilmataseeseen vaikuttavat tekijät.

Kuvan 3 termit:

\dot{V}_e on poistoilmavirta [m^3/s]

\dot{V}_s on tuloilmavirta [m^3/s]

$\dot{V}_{f_{in,j}}$ on vuotoilmavirta huoneeseen [m^3/s]

$\dot{V}_{f_{out,j}}$ on vuotoilmavirta huoneesta [m^3/s]

Φ_c on huoneeseen tulevat konvektiiviset kuormat [W]

T_{oj} on vuotoilman lämpötila [$^{\circ}\text{C}$]

T_s on poistoilmavirta

T_R on huoneilman lämpötila

A_i on pinnan i pinta-ala

Yhtälön (4) termit vasemmalta oikealle ovat konvektiivinen lämmönsiirto pintojen ja sisäilman välillä, poistoilman poistama lämpöteho, tuloilman tuoma lämpöteho, vuotoilman tuoma lämpöteho sekä sisäisien kuormien lämpöteho. Sisäisiin lämpökuormiin huomioidaan ihmiset, laitteet sekä auringon säteily ikkunoista. Yhtälön oikea puoli

voidaan yksinkertaistaa kaavan (5) muotoon, jolloin voidaan ratkaista ilman lämpötila aika-askeleen jälkeen sen muutosnopeuden sijaan.

$$C_R \frac{dT_R}{dt} \approx C_R \frac{T_{R,n} - T_{R,n-1}}{\Delta t} \quad (5)$$

Vuotoilmavirta sisään lasketaan ilmanvuotoluvusta kaavalla

$$\dot{V}_{fin,j} = \frac{q_{50}}{3600 x} A_{up} \quad (6)$$

missä

q_{50} on suunnittelumuuttujan ilmanvuotoluku arvo [$m^3/(m^2h)$]

x on kerroin, joka on yksikerroksisille rakennuksille 35

A_{up} on huoneen ulkopintojen yhteispinta-ala [m^2]

Huoneen sisäpinnoille voidaan muodostaa lämpötase

$$f_i T_{i,n} + g_{i,n} + h_r \sum F_{ij} (T_{i,n} - T_{j,n}) + h_{ci} (T_i - T_R) - e_i I_{1,n} - q_{rli,n} = 0 \quad (7)$$

missä

f, g ovat pulssivastekertoimiin liittyvät kertoimet (Aittomäki et al., 1976-1989)

F_{ij} on näkyvyyskerroin pinnasta i pintaan j

e_i on pintaan i osuva osa huoneeseen tulevasta säteilystä

$q_{rli,n}$ on pintaan i tuleva säteilyteho sisäisistä kuormista

h_r on lämmönsiirtokerroin lämpösäteilylle [W/m^2K]

Yhtälön (7) oikea puoli on yhtä suuri kuin nolla, sillä kontrollipintaan ei voi varastoitua lämpöä. Vasemman puolen kaksi ensimmäistä termiä liittyvät pulssivastekerroinmenetelmään, joka huomioi välillisesti rakenteisiin varastoituneen lämmön. Kolmas termi on säteilylämmönsiirto pintojen välillä, joka huomioi pintojen väliset näkyvyydet näkyvyyskertoimien F avulla. Kolme viimeistä termiä huomioivat pinnan ja sisäilman välisen konvektiivisen lämmönsiirron, lyhytaaltoisen auringonsäteily pintaan ja sisäisten kuormien säteilytehon pintaan.

Vyöhykkeen lämpötaseiden yhtälöt voidaan ratkaista ainoastaan yhtälöryhmänä, sillä kaikki yhtälöt sisältävät useita tuntemattomia muuttujia. Tuntemattomina muuttujina perustapauksessa ovat sisäilman ja sisäpintojen lämpötilat. Yhtälöryhmä voidaan esittää matriisimuotoisena, jossa kerroinmatriisin H ja tuntemattomien muuttujien (lämpötilojen) matriisin T tulo on yhtä suuri kuin vakiotermin matriisi K .

$$[H] [T] = [K] \quad (8)$$

missä

$$[H] = \begin{bmatrix} \beta & -h_{c1}A_1 & \cdots & -h_{cN}A_N \\ h_{c1} & -(h_{c1} + h_r + f_1) & \cdots & h_r F_{1N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{cN} & h_r F_{N1} & \cdots & -(h_{cN} + h_r + f_N) \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\beta = \frac{C_R}{\Delta t} + \rho c [\dot{V}_e + \sum_j \dot{V}_{f_{out,j}}] + \sum_i h_{ci} A_i$$

ja

$$[T] = \begin{bmatrix} T_{R,n} \\ T_{1,n} \\ \vdots \\ T_{N,n} \end{bmatrix}$$

$$[K] = \begin{bmatrix} C_R T_{R,n-1} / \Delta t + \rho c (\dot{V}_s T_{s,n} + \dot{V}_{fin} T_{out,n}) + \Phi_{c,n} + \Phi_{hc,n} + \Phi_{sw,n} \\ g_1 - e_1 I_{1,n} - q_{rg1,n} \\ \vdots \\ g_N - e_N I_{1,n} - q_{rgN,n} \end{bmatrix} \quad (10)$$

Tuntemattomien muuttujien matriisi voidaan ratkaista yhtälöryhmästä kertomalla molemmat puolet vasemmalta matriisin H käänteismatriisilla, jolloin saadaan lämpötilojen ratkaisuksi

$$[T] = [H]^{-1} [K] \quad (11)$$

Käänteismatriisin laskeminen onnistuu helposti Matlabissa.

Rakenteisiin varastoituva lämpö muodostaa poikkeuksen normaaliin lämpötaseeseen, sillä sen ei voida olettaa jakautuvan tasaisesti koko rakenteeseen. Pulssivastekeroimenetelmä olettaa lämmön siirtyvän rakenteessa yksiulotteisesti ulko- ja sisäpinnan välillä ja antaa yhteyden lämpövirtojen ja pintojen lämpötilojen välille pulssivastekertoimilla P_{ij} , Q_{ij} ja R_{ij} . Kertoimien laskentaan käytetään erillistä ohjelmaa, jolle annetaan tiedot rakenteesta ja sen lämpöteknisistä ominaisuuksista. Näillä kertoimilla voidaan määrittellä seinän sisäpinnasta i ulospäin johtuva lämpövirrantiheys

$$q_{si,n} = \sum_{j=0}^p [P_{ij} T_{i,n-j} - Q_{ij} T_{a,n-j}] - \sum_{j=1}^p R_{ij} q_{si,n-j} \quad (12)$$

missä j on pulssivastekertoimien aikaisempien aika-askelten indeksi, joka ottaa huomioon p edellistä aika-askelta. T_a on ulkolämpötila. Yhtälössä tuntemattomia ovat nykyisen aika-askelen n lämpövirrantiheys ja sisäpinnan lämpötila. Jos erotellaan kaava (12) tuntemattomaan ja tunnettuun osaan, saadaan huoneen lämpötaseessa käytetyn lämpövirrantiheyden kaava

$$q_{si,n} = f_i T_{i,n} + g_{i,n} \quad (13)$$

jossa

$$g_{i,n} = \sum_{j=1}^p [P_{ij} T_{i,n-j} - Q_{ij} T_{a,n-j} - R_{ij} q_{si,n-j}] - Q_{i0} T_{a,n} \quad (14)$$

ja yleensä

$$f_i = P_{i0} \text{ (Aittomäki et al., 1976-1989)}$$

Pulssivastekerroinmenetelmän vahvana puolena voidaan pitää sen laskennan nopeutta verrattuna esimerkiksi numeeriseen ratkaisuun, jossa rakenne jaetaan äärelliseen määrään kontrollitilavuuksia ja joiden välinen lämmönsiirto tulee ratkaista. Menetelmä ei kuitenkaan sovellu sellaisenaan alapohjan rakenteille, sillä oletus yksiulotteisesta lämmönsiirrosta ei päde. Menetelmä on myös kömpelö, sillä se toimii ainoastaan vakioimitaisille aika-askeleille. Simuloinnissa olisi usein hyödyllistä muuttaa aika-askeleen pituutta tarpeen mukaan.

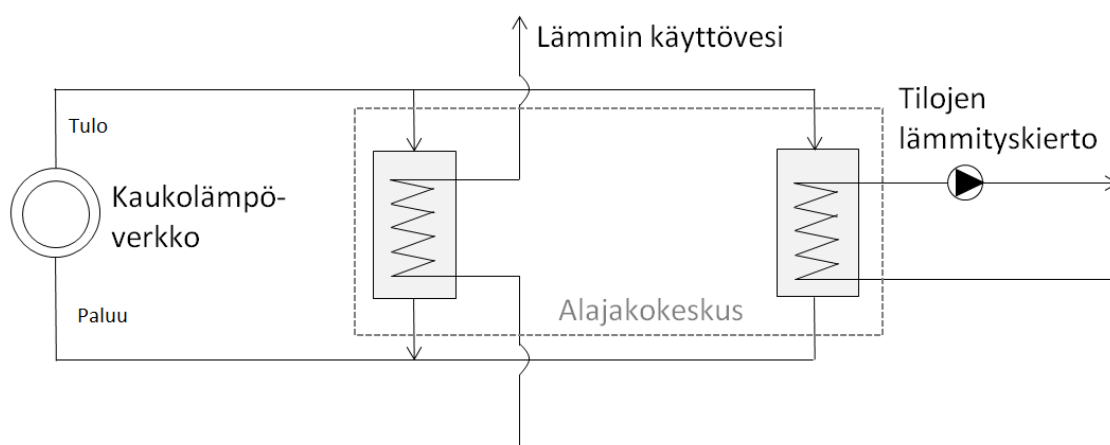
2.7 Lämmitysjärjestelmien kokoonpanot

Kun tarvittava lämmitysteho on ratkaistu rakennuksen lämpötaseesta, se lähetetään lämmitysjärjestelmän mallille. Lämmitysjärjestelmä sisältää kaikki lämmöntuottoon ja varastointiin tarkoitetut järjestelmät sekä niiden ohjauslogiikan. Mallin tehtävänä on laskea, kuinka lämmitystarve saadaan katettua valitulla kokoonpanolla ja kuinka paljon ostoenergiaa tarvitaan. Jos lämmitysjärjestelmä on mitoitettu liian pieneksi tai rakennuksen lämmitystarve muodostuu hetkellisesti liian suureksi, huonelämpötilat voivat laskea ja osa lämmitystarpeesta siirtyy seuraavalle aika-askeleelle. DBES-ohjelmaan on mallinnettu kuusi erilaista lämmitysjärjestelmäkokoonpanoa, jotka esitellään seuraavaksi. Niistä viittä käytettiin lopullisessa optimoinnissa.

Tilojen lämmitysjärjestelmä on lämmitysjärjestelmän alainen kokonaisuus. Se sisältää lämpimän veden kiertoputkiston sekä huoneiden ja ilmanvaihdon lämmönsiirtimet (lämpöpatterit tai lattialämmitys ja tuloilman lämmönsiirrin ilmanvaihtokanavassa). Tilojen lämmitykseen käytettävän menoveden lämpötila määräytyy ulkolämpötilan mukaan lämpökäyrästä, joka mitoitetaan rakennukselle sopivaksi laskennan alussa. Lämmitysjärjestelmän tehtävä on lämmittää tilojen lämmityksestä palaava kiertovesi vaadittuun lämpötilaan ja käyttövesi lämpötilaan 58 °C.

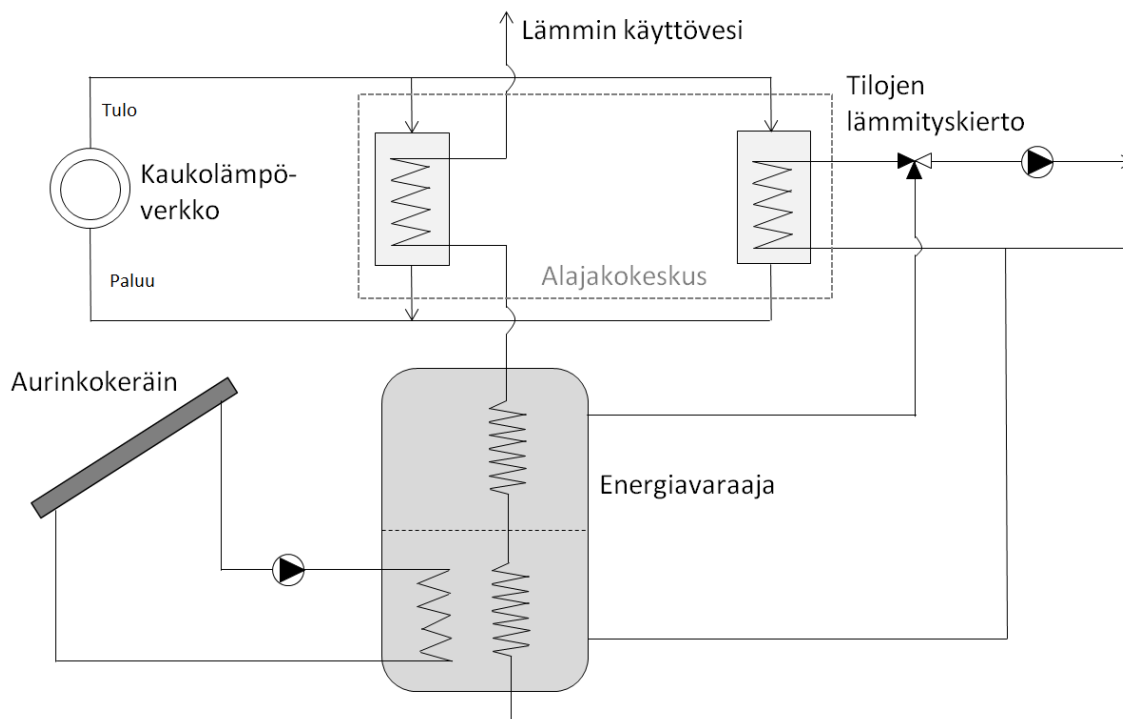
2.7.1 Kaukolämpöjärjestelmät

Kaukolämpöjärjestelmän ydin on kaukolämpöverkon alajakokeskus rakennuksen sisällä. DBES on mahdollista liittää kaukolämpöverkkomalliin, joka mallintaa suurempia asuinalueita ja laskee dynaamisesti verkon lämpötilat kaikissa kuluttajapisteissä. Yksittäistä taloa mallinnettaessa tätä verkkomallia ei voida käyttää ja kaukolämpöverkon syöttöveden lämpötila oletetaan vakioksi (90 °C). Yksinkertaisempi kaukolämpöjärjestelmä (Kuva 4) ei sisällä aurinkolämmitystä, vaan käyttövesi ja lämmitysvesi kierrätetään kaukolämpöverkon alajakokeskuksen läpi, jossa ne lämmitetään vaadittuun lämpötilaan. Järjestelmä ei tarvitse varaajaa sillä alajakokeskuksen lämmitysteho riittää käyttöveden suoraan lämmittämiseen. Tilojen lämmitykseen käytettävä lämmitysvesi lämmittää myös tuloilman vaadittuun lämpötilaan, jos lämmöntalteenotto ei yksin riitä.



Kuva 4. Kaukolämpöjärjestelmä.

Toinen kaukolämpöjärjestelmä sisältää aurinkokeräimen ja sen vaatiman energia-varaajan (Kuva 5). Tilojen lämmitykseen käytettävä vesi otetaan energiavaraajasta silloin, kun se on tarpeeksi lämmintä. Myös käyttövesi esilämmitetään energiavaraajassa. Jos esilämmityksellä ei päästä tarvittavaan lämpötilaan, käyttövesi lämmitetään loppuun alajakokeskuksessa. Energiavaraajan ainoa lämmönlähde on aurinkokeräin, joten se on kylmänä ainakin suurimman osan talvesta.

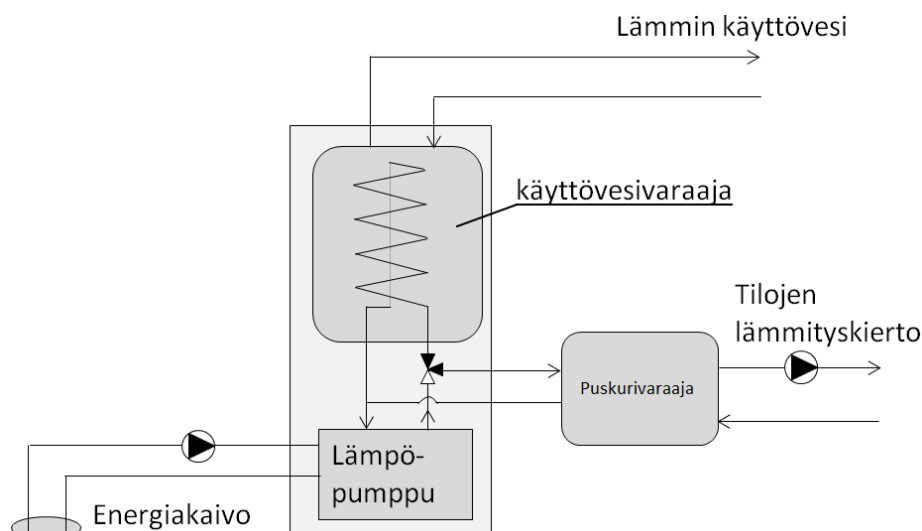


Kuva 5. Kaukolämpöjärjestelmä aurinkokeräimellä.

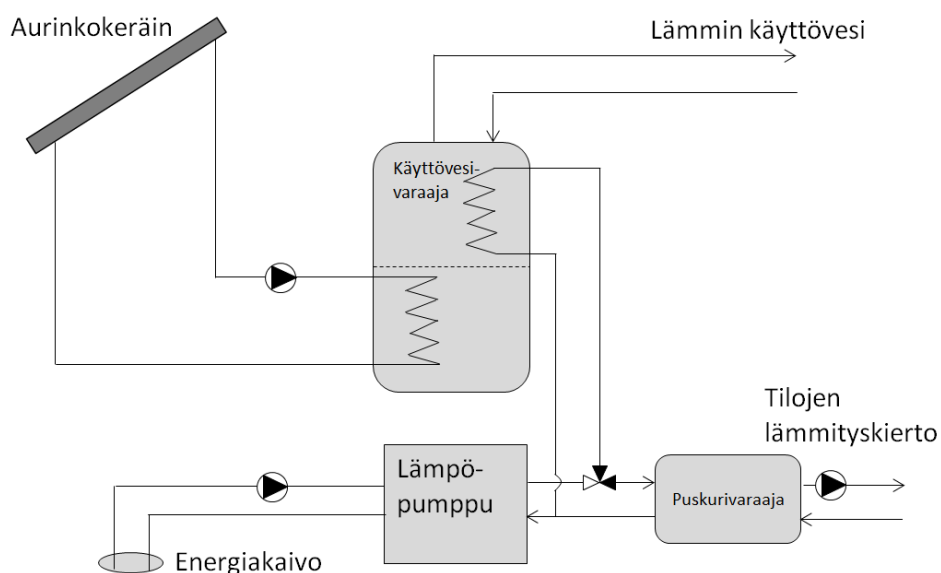
2.7.2 Maalämpöpumppujärjestelmät

Maalämpöpumppujärjestelmät sisältävät itse lämpöpumpun lisäksi aina käyttövesivaraajan ja energiakaivon. Käyttövesivaraaja on välttämätön, sillä lämpöpumpun lämmitysteho ei riitä käyttöveden suoraan lämmittämiseen. Mallinnetut maalämpöpumput ovat päälle/pois-ohjattuja, eli niissä ei ole liukuvaa tehon säätöä. Maalämpöpumppu on yhdistetty erillisillä lämmönsiirtimillä käyttövesivaraajaan ja tilojen lämmitykseen, joista vain toinen voi olla käytössä kerrallaan. Ohjauslogiikka priorisoi käyttöveden lämmittämisen, jos molempia tarvitaan.

Maalämpöpumppujärjestelmät eroavat toisistaan varaajien perusteella. Ensimmäisessä järjestelmässä (Kuva 6) on käytössä lämpöpumppuun integroitu käyttövesivaraaja ja toisessa erillinen käyttövesivaraaja (Kuva 7), johon on liitetty aurinkokeräinjärjestelmä. Tilojen lämmitysverkossa on myös pieni puskurivaraaja tasoittamassa lämpötilavaihteluja, kun lämpöpumppu lämmittää käyttövettä. Erillisen käyttövesivaraajan järjestelmässä aurinkokeräimen lämmönsiirrin sijaitsee varaajan lämmittämättömässä alaosassa. Oletuksena aurinkokeräin liitetään ainoastaan järjestelmään, jossa on erillinen käyttövesivaraaja, mutta liitäntä on mahdollinen myös integroituun varaajaan. Lämmitysväellä lämmitetään tilojen lisäksi myös tuloilmaa lämmönsiirtimeen avulla, jos se ei ole lämmöntalteenoton jälkeen vaaditussa lämpötilassa.

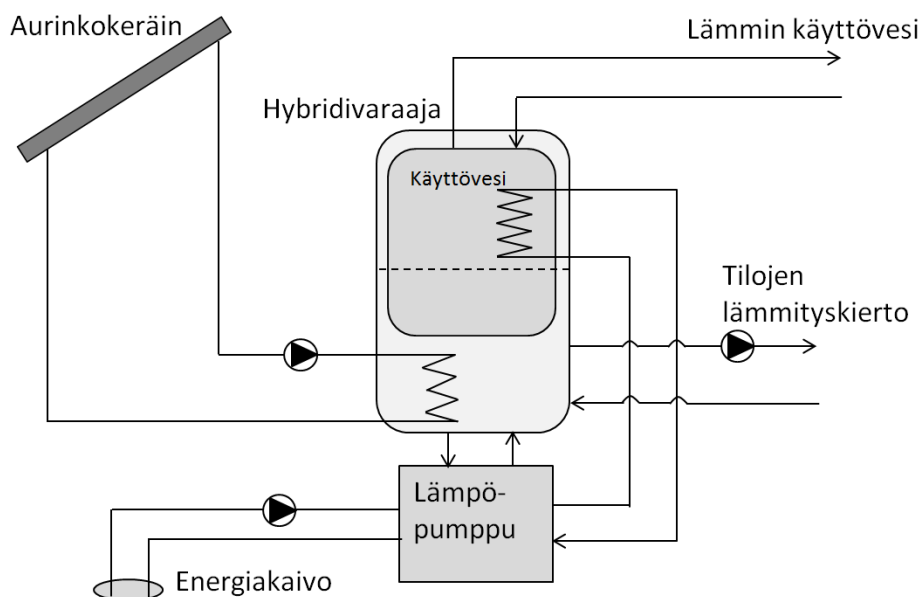


Kuva 6. Maalämpöjärjestelmä integroidulla varaajalla.



Kuva 7. Maalämpöjärjestelmä erillisellä käyttövesivaraajalla.

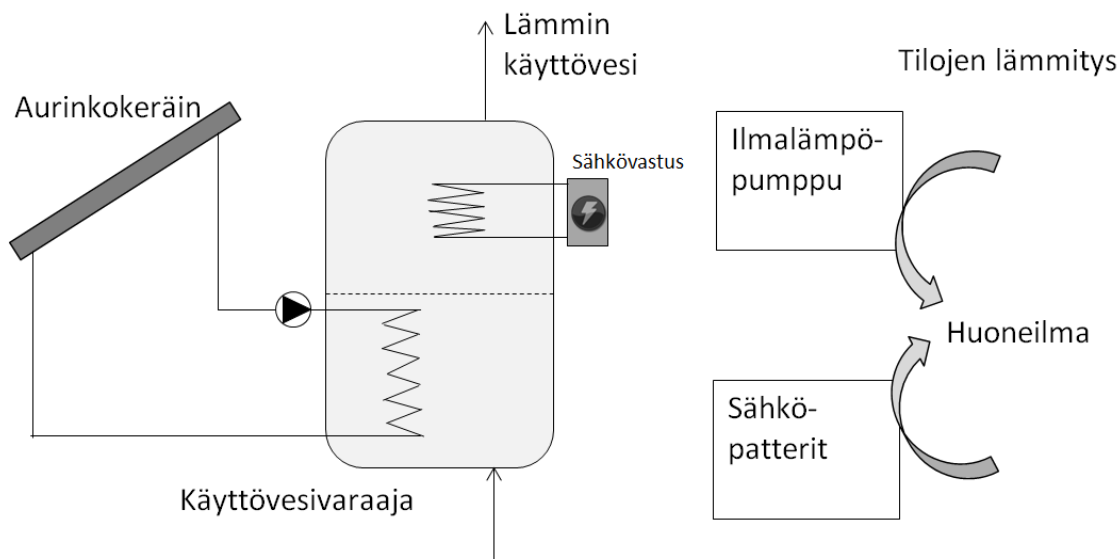
Kolmannessa maalämpöpumppujärjestelmässä on hybridivaraaja, joka koostuu lämminvesivaraajasta ja sen sisällä olevasta seinämällä erotetusta käyttövesivaraajasta (Kuva 8). Yhdistelmän hyvänä puolena on maalämpöpumpulle edullinen lämmönsiirto varaajassa, sillä se mahdollistaa käyttöveden esilämmittämisen tilojen lämmitysvedellä. Se on kuitenkin kalliimpi kuin pelkkä käyttövesivaraaja. Alustavien optimointikierrosten perusteella hybridivaraajaa käyttävä järjestelmät pärjäsivät yhtä hyvin kuin erillisen käyttövesivaraajan järjestelmä, joten lopulliseen optimointiin valittiin järjestelmä normaalilla käyttövesivaraajalla.



Kuva 8. Maalämpöjärjestelmä hybridivaraajalla.

2.7.3 Ilma-ilmalämpöpumppujärjestelmä

Ilmalämpöpumppujärjestelmä eroaa muista lämmitysjärjestelmistä oleellisesti tilojen lämmitysjärjestelmän osalta, sillä siinä on vesikiertoisen patterilämmityksen sijaan sähköpatterit ja ilmalämpöpumppu, jotka lämmittävät suoraan huoneilmaa (Kuva 9). Tuloilman lämmitys tapahtuu tarvittaessa myös sähkövastuksella. Käyttövesi lämmitetään pienessä käyttövesivaraajassa sähkövastuksella, tai jos järjestelmä sisältää aurinkokeräimen, käytetään suurempaa varaajaa, jossa sähkövastus toimii varalämmittimenä. Aurinkokeräin ei osallistu tilojen lämmitykseen, eikä ilmalämpöpumppu käyttöveden lämmittämiseen, joten niitä voidaan käsitellä erillisinä kokonaisuuksina.



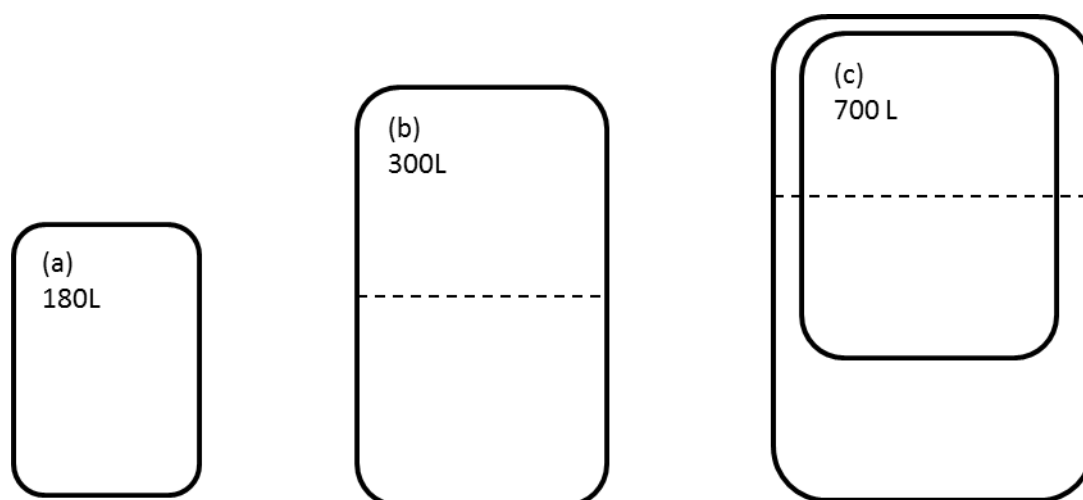
Kuva 9. Ilmalämpöpumppujärjestelmä aurinkokeräimellä.

Ilmalämpöpumpulla on yksi sisäyksikkö ja sen oletetaan pystyvän kattamaan maksimissaan 75 % rakennuksen tilojen lämmitystehontarpeesta. Tämän osuuden lisäksi malli ottaa huomioon lämpöpumppuyksikön maksimilämmitystehon, jolloin voidaan jäädä 75 % osuuden alapuolelle. Ilmalämpöpumpun vaikutusalueen arviointi jää karkeaksi, koska DBES-ohjelmassa ei ole mahdollisuutta ilmavirtojen mallintamiseen. Lämmitettävä rakennus oletetaan riittävän avoimeksi, jotta oletus lämmitystarpeen kattamisesta toteutuu.

2.8 Lämmöntuottojärjestelmien ja lämpövaraston mallit

2.8.1 Lämpövarasto

Lämpövarasto on dynaaminen ja ulottuvuuksiltaan diskreetti, lämpötaseisiin perustuva malli. Varaajan lämpötase ratkaistaan samalla periaatteella kuin rakennuksen lämpötase, mutta varaajan seinämien ollessa lämpökapasiteetiltaan huomattavasti pienempiä kuin veden, ei niiden lämpötilan huomioiminen ole tarpeellista. Varaajan sisätilavuus jaetaan useampaan päällekkäiseen kontrollitilavuuteen, sillä sen lämpötilaa ei voida aina pitää vakiona koko tilavuudessa, vaan lämpötila varaajan sisällä on usein selkeästi kerrostunutta (Kuva 10). Lämmönsiirtoa varaajassa hallitsee konvektion lisäksi johtuminen ja massavirtojen mukana siirtyvä lämpöteho. Koska erilaiset varaajat tarvitsevat erilaisia lämpötaseita, ei tässä kappaleessa esitetä kaikkia valmiita lämpötaseen yhtälöryhmiä, vaan ainoastaan termit, joista ne koostuvat.



Kuva 10. (a) Pieni käyttövesi- tai lämminvesivaraaja, (b) energiavaraaja, (c) hybridi-
varaaja. Kontrollitilavuudet on erotettu toisistaan katoviivoilla ja viivoilla. Tilavuudet
ovat tyypillisiä tilavuuksia varaajatyypille.

Lämmönjohtuminen varaajan vaipan läpi otetaan huomioon lämmönläpäisyker-
toimella U , joka sisältää lämmönjohtumisen eristeessä sekä konvektion vaipan sisä- ja
ulkopinnalla. Lämpöhäviöt varaajasta voidaan laskea kaavasta (15)

$$\phi_{\text{häviöt}} = UA_{\text{vaippa}}(T_i - T_a) \quad (15)$$

missä indeksi i viittaa kontrollitilavuuteen ja a ympäristöön. Ympäristön lämpötilaa ei
haeta erikseen rakennusmallin huonelämpötiloista, vaan se oletetaan aina 21 asteiseksi.
Lämpöhäviöitä ei lisätä enää rakennuksen lämpökuormiin, vaan se menetetään kokonai-
suudessaan.

Lämmön luonnollinen siirtyminen varaajan lämpökerrosten välillä koostuu luon-
nollisesta konvektiosta ja johtumisesta. Nesteen sisäisen johtumisen tai luonnollisen kon-
vektion mallintamiselle ei ole hyviä analyttisiä ratkaisuja (Mills, 1999, s. 60), mutta niitä
on arvioitu kahdella eri yhtälöllä. Kahden kontrollitilavuuden väliselle lämmönjohtumi-
selle käytetään niiden keskipisteiden välisen etäisyyden läpi johtuvaa lämpöä varaajan
poikkileikkauksen alalta.

$$\phi_{\text{johtuminen}} = \frac{kA_{pl}(T_i - T_j)}{l} \quad (16)$$

missä

k on veden lämmönjohtavuus [W/mK]

A_{pl} on varaajan johtumisen suuntaisen poikkileikkauksen pinta-ala [m²]

j on indeksi viereiselle kontrollitilavuudelle

l on kontrollitilavuuksien keskipisteiden välinen etäisyys

Luonnollisen konvektion mallintamiseen hyödynnetään SolidWorks-ohjelman
numeerisella laskennalla saatuja tuloksia varaajan käyttäytymisestä tilanteissa, joissa

luonnollinen konvektio on merkittävä tekijä. Tällainen tilanne esiintyy, kun aurinkokeräin tuottaa lämpöä varaajan alaosaan, josta lämpö nousee konvektion avulla varaajan yläosaan. Yksinkertaisen varaajan huomattiin noudattavan melko hyvin korrelaatiokaavaa

$$\text{suhdeluku} = a \Delta T \phi_{ak}^b + 0,5 \quad (17)$$

missä

ΔT on kontrollitilavuuksien lämpötilaero [K]

ϕ_{ak} on aurinkokeräimen varaajaan tuoma lämpöteho aika-askeleella [W]

Suhdeluku kuvaa lämpötehon jakautumista ylemmän ja alemman kontrollitilavuuden välillä. Suhdeluku vaihtelee välillä 0,5 – 1 ja arvo yksi tarkoittaa, että konvektio ei ole merkittävä tekijä ja tuotu lämpö jää alempaan tilavuuteen. Suhdeluku puoli tarkoittaa, että tuotu lämpö jakautuu tasaisesti molempiin tilavuuksiin. Alle puolen suhdelukuihin ei mallinnettaessa päästy, sillä mallinnustulosten perusteella alatilavuudessa tapahtuva lämmitys ei voi nostaa ylätilavuuden lämpötilaa korkeammaksi, vaan parhaimmillaankin se sekoittaa lämpötilat yhtenäisiksi. Koska varaajan alaosan lämpötila ei aika-askeleen alussa voi olla suurempi kuin yläosan, on suhdeluku aina vähintään puoli. Parametrit a ja b ovat varaajan tilavuudesta ja geometriasta riippuvia muuttujia. Normaalille 300 l varaajalle parametrien arvot ovat 12,3 ja -0,77. Liitteessä 2 on numeerisen mallinnuksella saatuja suhdelukuja 300 l varaajalle. Lämpötaseeseen aurinkokeräimeltä tulevat lämpövirrat voidaan ilmoittaa suhdeluvun avulla

$$\begin{aligned} \phi_{ak,j} &= (1 - \text{suhdeluku}) \phi_{ak} \\ \phi_{ak,i} &= \text{suhdeluku} \cdot \phi_{ak} \end{aligned} \quad (18)$$

missä

j viittaa ylempään kontrollitilavuuteen

i viittaa alempaan kontrollitilavuuteen

Massavirrat siirtävät tehokkaasti lämpöä varaajissa. Kontrollitilavuuteen tulevalla massavirralla on jokin tunnettu tai tuntematon lämpötila ja tilavuudesta lähtevä massavirta on aina kontrollitilavuuden lämpötilassa, kaava (19).

$$\phi_{virtaus} = \dot{m}_{virtaus} c_p (T_i - T_{sisään}) \quad (19)$$

Kontrollitilavuuksiin tuodaan tai niistä otetaan myös lämpöä suoraan lämmönsiirtimillä. Lämmönsiirtimistä siirtyvä lämpö lasketaan lämpötaseessa suoraan lämpötehona ja sen suuruus lasketaan lämpötaseen ulkopuolella. Esimerkiksi aurinkokeräimen lämmönsiirtimen tuoma lämpöteho riippuu muun muassa varaajan lämpötilasta, mutta sitä ei

ratkaista lämpötaseen sisällä, vaan se ratkaistaan erikseen ja pelkkä lämpöteho annetaan lämpötaseen yhtälöille. Tarvittaessa käytetään iterointia, jotta lämpötehon laskentaan voidaan käyttää mahdollisimman tarkkaa tilavuuden lämpötilaa.

Poikkeuksen lämmönsiirtimien ja massavirtojen mallintamiseen tekee käyttöveden esilämmityskierukka, joka on mallinnettu varaajissa yksityiskohtaisemmin. Esilämmityskierukan lämpötase ratkaistaan varaajan lämpötaseen yhteydessä hyödyntäen lämmönsiirtimen tehokkuutta ε . Kontrollitilavuudesta käyttöveteen siirtyvä lämpö voidaan laskea kaavasta

$$\begin{aligned}\phi_{lkv} &= \dot{m}_{lkv} c_p (T_{lkv,ulos} - T_{lkv,sisään}) \\ \varepsilon &= \frac{(T_{lkv,ulos} - T_{lkv,sisään})}{(T_i - T_{lkv,sisään})} \\ \Rightarrow \phi_{lkv} &= \dot{m}_{lkv} c_p \varepsilon (T_i - T_{lkv,sisään})\end{aligned}\quad (20)$$

missä

ϕ_{lkv} on lämpimään käyttöveteen siirtynyt lämpö [W]

\dot{m}_{lkv} on lämpimän käyttöveden keskimääräinen kulutus aika-askeleella [kg/s]

ε on esilämmityskierukan tehokkuus lämmönsiirtimenä

Yhdistämällä kaikki edellä kuvatut termit saadaan varaajan yhden kontrollitilavuuden lämpötaseen yhtälöksi

$$-\phi_{häviöt} - \phi_{johtuminen} - \phi_{virtaus} - \phi_{lkv} + \phi_{lämmönsiirtimet} = \frac{c_p \rho V (T_{i,n} - T_{i,n-1})}{\Delta t}\quad (21)$$

missä

n on aika-askeleen indeksi

Δt on aika-askeleen pituus [s]

Erilaisia mallinnettuja varaajia on neljä: käyttövesivaraaja, lämminvesivaraaja, hybridivaraaja ja energiavaraaja. Käyttövesi- ja lämminvesivaraajat ovat yksinkertaisimmat ja eroavat toisistaan ainoastaan siten, että käyttövesivaraajan sisällä on käyttövettä ja lämminvesivaraajan sisällä on tilojen lämmitykseen käytettävää vettä. Molemmat varaajat sisältävät niiden lämmitykseen tarvittavat sähkövastukset ja lämmönvaihtimet. Jos lämmitysjärjestelmä sisältää aurinkokeräimen, on usein kannattavampaa käyttää energiavaraajaa, jossa voidaan lämmittää sekä käyttövettä että tilojen lämmityksen kiertovettä. Energiavaraaja on samanlainen kuin lämminvesivaraaja, mutta se sisältää myös käyttöveden esilämmityskierukat. Hybridivaraaja taas koostuu käyttövesivaraajasta ja sitä ympäröivästä lämminvesivaraajasta. Kaksivaippainen varaaja hyödyntää luonnollista konvektiota, jonka avulla saavutetaan eräänlainen käyttöveden esilämmitys maalämpöpumpun hyötysuhteen nostamiseksi.

Lämpövarasto jaetaan lämpötasemenetelmässä kontrollitilavuuksiin, joille malli sallii eri lämpötilat. Pienille, alle kahdensadan litran käyttövesi- ja lämminvesivaraajille riittää yksi kontrollitilavuus, kun taas suuremmille varaajille sekä energiavaraajalle käytetään kahta kontrollitilavuutta. Hybridivaraajan mallintamiseen käytetään neljää kontrollitilavuutta. Kuvassa 10 näkyy, miten kontrollitilavuudet asettuvat erityyppisissä varaajissa.

Koko varaajan lämpötase ratkaistaan muuttamalla kontrollitilavuuksien lämpöta- seiden yhtälöryhmä matriisimuotoon, josta tuntemattomat muuttujat voidaan ratkaista

$$[H] [T] = [K]$$

$$\Rightarrow [T] = [H]^{-1}[K]$$

missä T on tuntemattomien muuttujien matriisi, H on kerroinmatriisi ja K on vakiomatriisi. Matriisien koot riippuvat kontrollitilavuuksien määrästä j siten, että matriisin H koko on $j \times j$ ja matriisit T ja K ovat kooltaan $j \times 1$.

Tuntemattomia muuttujia ovat kontrollitilavuuksien lämpötilat tai vaihtoehtoisesti halutun lämpötilan saavuttamiseksi vaadittu lämpöteho. Niiden valinta ei kuitenkaan vaikuta lämpötaseisiin, vaan ainoastaan lämpötaseen matriisiesitykseen. Kaavoissa (22) – (24) on annettu esimerkkinä kaukolämmitysjärjestelmän energiavaraajan lämpötilojen ratkaisuun käytetyt matriisit. Muiden varaajatyypin ratkaisumatriiseja ei esitellä niiden suuren määrän takia. Ne ovat kuitenkin rakenteeltaan samankaltaisia ja koostuvat tässä luvussa annetuista termeistä.

$$H = \begin{bmatrix} -\frac{c_p V_1 \rho}{\Delta t} - A_1 U - \dot{m}_{tl} c_p - \frac{A_{pl} k}{0.5l} - c_p \dot{m}_{lkv} \varepsilon & \frac{A_{pl} k}{0.5l} + c_p \dot{m}_{lkv} \varepsilon^2 \\ \frac{A_{pl} k}{0.5l} & -A_2 U - \frac{A_{pl} k}{0.5l} - \frac{c_p V_2 \rho}{\Delta t} - c_p \dot{m}_{lkv} \varepsilon \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$T = \begin{bmatrix} T_{1,n} \\ T_{2,n} \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$K = \begin{bmatrix} -\phi_{ak,1} - A_1 U T_a - \frac{c_p V_1 T_{1,n-1}}{\Delta t} + c_p \dot{m}_{lkv} \varepsilon T_{lkv, sis} (\varepsilon - 1) \\ \phi_{ak,2} - A_2 U T_a - \dot{m}_{tl} c_p T_{tl,p} - \frac{c_p V_2 \rho T_{2,n-1}}{\Delta t} - c_p \dot{m}_{lkv} \varepsilon T_{lkv, sis} \end{bmatrix} \quad (24)$$

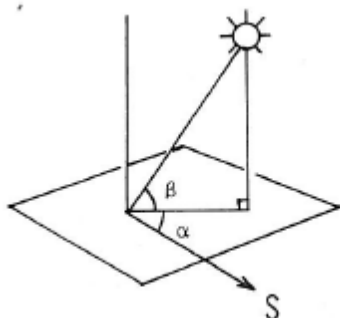
missä

- 1,2 viittaavat ylempään ja alempaan kontrollitilavuuteen
- A on tilavuuden ulkokuoren pinta-ala
- tl viittaa tilojen lämmitykseen

2.8.2 Aurinkokeräin

Aurinkokeräimen malli laskee varaajaan tuotetun lämpötehon keräimen ominaisuuksien, aika-askeleen säätietojen ja varaajan lämpötilan perusteella. Keräimelle tuleva säteilyteho ei suoraan muutu lämmöksi, vaan siihen vaikuttaa keräimen hyötysuhde, joka koostuu optisesta ja termisestä hyötysuhteesta. Hyötysuhdetta pienentävät optiset häviöt, jotka riippuvat keräimen lasituksen ominaisuuksien lisäksi auringon säteilykulmasta ja hajasäteilyn määrästä. Kerääjäpinnan absorptiokerroin ja emissiviteetti vaikuttavat absorboituvaan säteilytehoon. Termisiin häviöihin vaikuttavat säteilyn intensiteetti, keräimen lämmönsiirto-ominaisuudet ja keräinnesteen lämpötila. Käytetty malli on stationäärinen ja järjestelmän oletetaan olevan tasapainotilassa jokaisella aika-askeleella. Lämmönkeruunesteeseen ei oleteta varastoituvan merkittävää lämpö määrää, eikä malli huomioi lämmönkeruunesteen ominaislämmön muutosta lämpötilan suhteen, sillä se vaatisi iterointia, eikä sillä saatu parannettua tarkkuutta merkittävästi. Mallintamisen teoria perustuu Duffie-Beckmanin kaavoihin (Duffie & Beckman, 2006).

Käytetyissä säätiedoissa annetaan tunnin aika-askeleissa vaakasuoralle pinnalle osuvan suoran säteilyn intensiteetti I_{DH} ja hajasäteilyn intensiteetti I_{dH} . Näiden säätietojen sekä paikka- ja aikatietojen perusteella voidaan laskea säteilyintensiteetti mille tahansa kaltevalle pinnalle. Auringon säteilyn tulosuunta ilmoitetaan kahdella kulmalla, korkeuskulma β ja atsimuuttikulma α (Kuva 11).

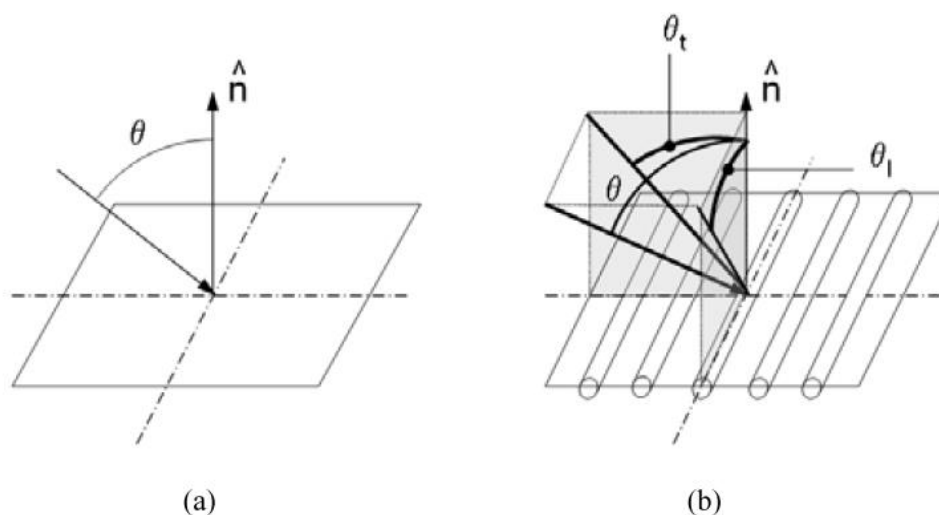


Kuva 11. Auringon suoran säteilyn tulokulman komponentit.

Kulmien laskemiseen käytettyjä kaavoja ei esitellä, mutta niiden arvoon vaikuttavat kerääjän sijainti, suuntaus, kaltevuus, vuodenaika ja kellonaika. Mitä korkeammalla aurinko on, sitä suurempi säteilyintensiteetti osuu vaakapintoihin. Auringon atsimuuttikulma ei vaikuta vaakapintojen säteilyintensiteettiin, mutta osittain tai täysin pystyssä oleville pinnoille sillä on merkitystä. Auringon säteilystä kaikki ei ole suoraa säteilyä, vaan huomattava osa säteilyintensiteetistä tulee hajasäteilystä. Hajasäteily on ilmakehän sirontasäteilyä sekä maasta heijastunutta säteilyä ja niillä on eri tulokulmat kuin suoralla säteilyllä. Keräimelle osuvan hajasäteilyn tulokulmaan vaikuttaa ainoastaan keräimen kallistuskulma (poikkeama vaakatasosta). Eri säteilytyyppien tulokulmien vaikutus pinnalle osuvan säteilyn intensiteettiin otetaan huomioon, minkä jälkeen ne summataan yhteen. Tämä summa on keräimelle tulevan kokonaissäteilyn intensiteetti I_{kok} .

$$I_{kok} = I_D + I_d \quad (25)$$

Keräimelle tulevasta kokonaissäteilystä menetetään ensimmäisenä osa optisiin häviöihin. Optisten häviöiden osuus riippuu aurinkokeräimen tyypistä, laadusta ja eri säteilytyyppien tulokulmista. DBES-ohjelmassa käytettyjen keräimien hyötysuhteet perustuvat Solar Rating & Certification Corporationin testidataan (Solar Rating & Certification Corporation) useista eri aurinkokeräinmalleista. Jokaiselle testatulle aurinkokeräimelle on annettu optisten häviöiden laskemista varten niin sanottu tulokulmakerroin (IAM, incident angle modifier), joka kertoo säteilyn osuuden, jota ei meneteta optisille häviöille. Tulokulmakerroin on annettu säteilyn tulokulman funktiona jokaiselle testatulle aurinkokeräimelle. Tasokeräimille tulokulmana käytetään kulmaa keräimen pinnan normaalin ja auringon aseman välillä, mutta tyhjiöputkikeräimille tulokulma on ilmoitettava kahtena komponenttina, sillä niillä on erilaiset tulokulmakertoimet (Kuva 12). Tyhjiöputkikeräimille käytetyt tulokulmat saadaan vähentämällä keräimen pystysuuntainen kaltevuuskulma auringon korkeuskulmasta (korkeussuuntainen tulokulma), ja keräimen atsimuuttikulma auringon atsimuutista (vaakasuuntainen tulokulma). Huomionarvoista on, että tulokulmakerroin voi olla yli yksi tyhjiöputkikeräimillä. Tämä selittyy keräimen rakenteella, jossa keruuputket ovat tietyn välimatkan päässä toisistaan. Kun vaakasuuntainen tulokulma kasvaa, putkien väliin osuvan säteilyn osuus pienenee aina nolnaan asti, minkä jälkeen keruuputket alkavat vasta peittää toisiaan. Koska keräinputkiin osuvan säteilyn määrä ei pienene oletetusti vaakasuuntaisen tulokulman kasvaessa, korjaa tulokulmakerroin tämän poikkeaman ykköistä suuremmalla kertoimella.



Transverse Incident Angle Modifier								Longitudinal Incident Angle Modifier at 50°:		0.97
θ	10	20	30	40	50	60	70	Test Fluid:	Water	
$K_{\tau\alpha}$	1.00	1.05	1.10	1.28	1.52	1.48	1.24	Test Mass Flow Rate:	0.0142 kg/(s m ²)	10.48 lb/(hr ft ²)

Kuva 12. (a) Tulokulman määrittäminen tasokeräimelle, (b) tyhjiöputkikeräimelle. Solar Rating & Certification Corporationin testidatan tulokulmakertoimia (tässä $K_{\tau\alpha}$) atsimuuttisuuntaiselle (transverse) ja korkeussuuntaiselle (longitudinal) säteilylle. Esimerkissä on eräs tyhjiöputkikeräinmalli.

Testidatassa tulokulmakertoimet on annettu vain tietyille tulokulmille, joten niiden avulla luodaan sovite kattamaan kaikki tulokulmat. Optisten häviöiden jälkeen keräimelle tuleva säteilyintensiteetti saadaan laskettua kaavasta

$$I_{keräin} = IAM_D I_D + IAM_d I_d \quad (26)$$

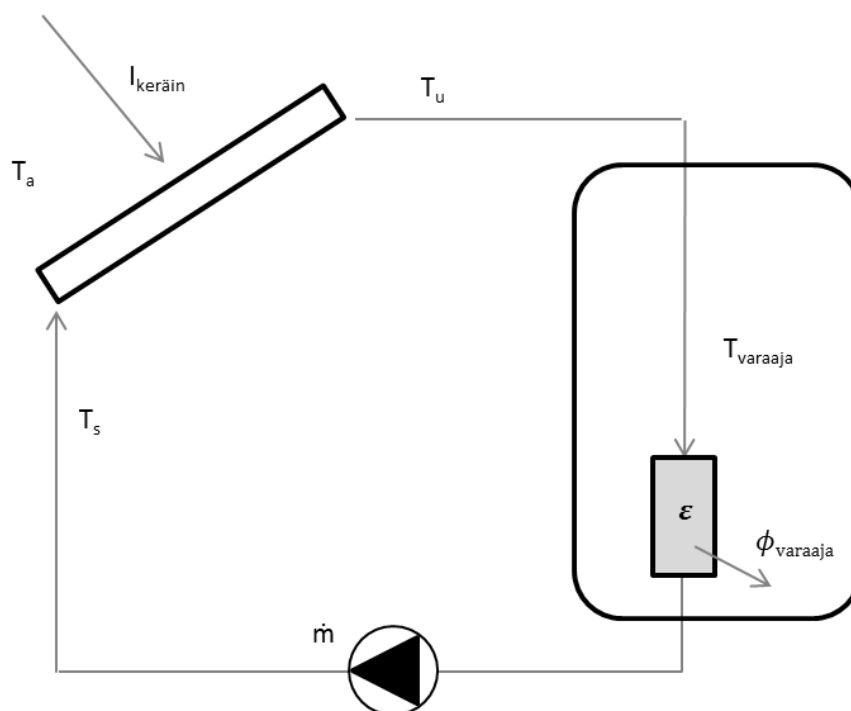
Optisten häviöiden lisäksi lämpötehoa menetetään lämpöhäviöiden muodossa ympäristöön. Termisten häviöiden laskemiseen käytetään myös Solar Rating & Certification Corporationin testidataa, jossa on annettu keräimen hyötysuhde ympäristön ja keruunesteen lämpötilaeron sekä säteilyintensiteetin funktiona (Kuva 13).

TECHNICAL INFORMATION		Tested in accordance with: ISO 9806			
ISO Efficiency Equation [NOTE: Based on gross area and (P)=Ti-Ta]					
SI UNITS:	$\eta = 0.834 - 1.45390(P/G) - 0.05890(P^2/G)$	Y Intercept:	0.848	Slope:	-4.777 W/m ² .°C
IP UNITS:	$\eta = 0.834 - 0.25624(P/G) - 0.00576(P^2/G)$	Y Intercept:	0.848	Slope:	-0.842 Btu/hr.ft ² .°F

Kuva 13. Solar Rating & Certification Corporationin testidataa erään keräimen hyötysuhteesta. T_i on keruunesteen sisäntulolämpötila ja G säteilyintensiteetti [W/m²].

Aurinkokeräimen ja sen varaajassa sijaitsevan lämmönvaihtimen lämpötaseet voidaan rakentaa näiden tietojen perusteella. Kuva 14 näyttää aurinkokeräinmallin oleelliset komponentit ja yhtälöissä käytetyt muuttujat. Tuntemattomia muuttujia on kolme: keruunesteen lämpötila ennen ja jälkeen aurinkokeräintä sekä keräimestä varaajaan siirtyvä lämpöteho. Keräimen massavirta on vakio ja sen arvo perustuu suositeltuun massavirtaan suhteessa keräimen pinta-alaan. Yhtälöiksi valitaan keräimen hyötysuhde, keräinnesteen massavirran lämpötase ja lämmönvaihtimen tehokkuuden kaava

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi_{varaaja} = A_{keräin} I_{keräin} \left(a - b \left(\frac{T_s - T_a}{I_{keräin}} \right) - c \left(\frac{T_s - T_a}{I_{keräin}} \right)^2 \right) \quad (27) \\ \phi_{varaaja} = \dot{m} c_p (T_u - T_s) \quad (28) \\ \varepsilon = \frac{T_u - T_s}{T_u - T_{varaaja}} \quad (29) \end{array} \right.$$



Kuva 14. Aurinkokeräimen mallin komponentit ja muuttujat.

Kuten kaikissa lämpötaseyhtälöryhmien ratkaisuisissa, yhtälöryhmä muutetaan matriisimuotoon ja sen tuntemattomat ratkaistaan hyödyntämällä kerroinmatriisin käänteismatriisia. Tuloksena saadaan aurinkokeräimen varaajaan tuottama lämpöteho. Jos lämpöteho on riittävän suuri lämmittämään varaajaa useita asteita, joudutaan lämpötaseyhtälö ratkaisemaan uudestaan tarkennetulla varaajan lämpötilalla. Ensimmäisellä laskentakierroksella käytetään varaajan edellisen aika-askelen lämpötilaa. Varaajan lämpötila oletetaan myös vakioksi koko aika-askeleelle, mikä on yksinkertaistus, mutta virhe pienenee mitättömäksi koko vuoden kattavassa laskennassa.

2.8.3 Lämpöpumput ja energiakaivo

Lämpöpumput on mallinnettu DBES-ohjelmassa black-box-malleina. Lämpöpumpun suorituskyky arvioidaan lämpölähteen ja lämpönielun lämpötilojen perusteella annetuista valmistajan testausarvoista standardin EN 15316-4-2 (Rakennusten lämmitysjärjestelmät, 2009) yksityiskohtaisempien laskentaohjeiden mukaan. Kylmäainekiertoa ei mallinneta ja lämpöpumpun malli energiakaivoa lukuun ottamatta on tasapainotilassa toimiva stationäärinen malli. Kylmäainekiertoa ei mallinnettu, sillä ilman hyvin yksityiskohtaisia laiteparametreja mallin tarkkuus olisi ollut testausdataan perustuvaa menetelmää epätarkempi. DBES-ohjelma käyttää maalämpöpumppujen suorituskyvyn arviointiin pohjatieltä sveitsiläisen lämpöpumppujen testauskeskuksen (Heat Pump Test Center WPZ) tarjoamia testituloksia. Ilmalämpöpumppujen suorituskyky arvioidaan kahden eri lähteen perusteella; Scanofficen tilaamat ja VTT:n suorittamat testit erilaisten ilmalämpöpumppujen lämpökertoimesta ulkolämpötilan funktiona (Scanoffice, VTT, 2010 - 2013), sekä

ruotsalaisen energiatoimiston (Swedish Energy Agency) testidataan kompressorin osatehon vaikutuksesta lämpökertoimeen. Termi suorituskyky sisältää lämpöpumpun lämpökertoimen ja maksimilämmitystehon.

Lämpöpumppujen suorituskyky vaihtelee paljon eri valmistajien ja mallien välillä. Koska ei ole tarkoituksenmukaista kasata kattavaa listaa kaikista eri lämpöpumppumalleista DBES-ohjelmaan, testatuista lämpöpumpuista on valittu lämpökertoimen perusteella kaksi mahdollisimman edustavaa mallia ja niiden testituloksiin perustuvaa suorituskykyä käytetty laskennassa. Käyttäjä voi valita lämpöpumpun suorituskyvyksi hyvän tai erinomaisen ja niiden suorituskyky vastaa testattujen lämpöpumppujen keskimmäisen kolmanneksen ja parhaan kolmanneksen keskiarvoa lähinnä olevien lämpöpumppujen suorituskykyä. Lämpöpumpun lämpötehon käyttäjä saa valita vapaasti, sillä se korreloi vain heikosti lämpökertoimen kanssa. Lämpöpumpun teho vaikuttaa kuitenkin siihen, mikä on lämpöpumpun tuottama energia ja mikä on järjestelmän tehollinen vuosilämpökerroin.

Maalämpöpumppujen suorituskyvyn arviointi

Maalämpöpumppujen suorituskyky ilmoitetaan testituloksissa lämmönlähteen ja lämpönielun lämpötilojen suhteen. Ne ovat kaksi ainoaa muuttujaa, jotka vaikuttavat maalämpöpumpun suorituskykyyn (lämpökertoimeen ja lämpötehoon) tässä mallissa. Lämmönlähteenä on energiakaivo, jonka keskimääräinen lämpötila lasketaan energiakaivon mallissa, joka esitellään myöhemmin. Lämpönielun lämpötilalla tarkoitetaan lämpötilaa, johon lämmitysvesi on lämpöpumpun lauhduttimessa lämmitettävä. Yleensä testitulokset sisältävät suorituskyvyn kahdessa eri lähteen ja nielun lämpötilassa, vastaten yhteensä neljää eri suorituskyvyn arvoa. Kaikki mahdolliset maalämpöpumpun toimintapisteet muodostavat siis tason, jonka neljässä pisteessä (testitulokset) suorituskyky tunnetaan. Tehtäväksi jää suorituskyvyn arvioiminen kaikissa muissa toimintapisteissä näiden neljän pisteen avulla käyttämällä standardin EN 15316-4-2 menetelmää. Menetelmässä testipisteiden rajaaman pinnan sisällä olevien toimintapisteiden suorituskyky voidaan arvioida interpoloimalla ne lineaarisesti testipisteiden arvoista. Interpolointia ei voida hyödyntää, jos toimintapiste ei sijaitse edellä mainitulla alueella, vaan silloin joudutaan käyttämään niin kutsuttua Carnot-menetelmää. Carnot-menetelmä perustuu ideaalisen Carnot-lämpöpumpun lämpökertoimeen, joka voidaan määrittellä vastaavan lämpötilaeron yli toimivan Carnot-kiertoa käyttävän lämpövoimakoneen hyötysuhteen käänteisarvona.

$$COP_{carnot} = \frac{1}{\eta_{carnot}} \quad (30)$$

$$\eta_{carnot} = 1 - \frac{T_C}{T_H} \quad (31)$$

missä T_H on lämpönielun ja T_C lämpölähteen lämpötila.

Carnot-lämpökerroin voidaan laskea suoraan koko lämpöpumpun toiminta-alueelle, eikä se riipu lämpöpumpun ominaisuuksista. Sen avulla lämpöpumpulle voidaan määrittellä exergiahyötysuhde lämpöpumpun jokaiselle testipisteelle tp .

$$\eta_{ex,tp} = \frac{COP_{tp}}{COP_{carnot}} \quad (32)$$

Exergiahyötysuhde pysyy jokseenkin vakiona koko toiminta-alueella, mutta etenkin testipisteiden läheisyydessä. Toimintapisteille, jotka ovat interpoloimisalueen ulkopuolella, voidaan arvioida suorituskykyä tämän hyötysuhteen avulla, kun tiedetään toimintapisteen Carnot-lämpökerroin ja lähimmän testipisteen exergiahyötysuhde.

$$COP = COP_{carnot} \eta_{ex,tp} \quad (33)$$

Näin siis interpoloimalla ja exergiahyötysuhdetta käyttämällä voidaan laskea lämpöpumpun lämpökerroin kaikissa toimintapisteissä. Maksimilämpöteho arvioidaan testipisteiden suorituskyvyn perusteella samalla tavalla, mutta exergiahyötysuhdetta käytettäessä lämpönielun lämpötilan vaikutusta lämpötehoon pienennetään kertoimella 0,3. Kerrointa ei käytetä standardin kuvaamassa menetelmässä, vaan se perustuu testituloksiin ja prosessin todellisiin ominaisuuksiin (WPZ, Heat Pump Test Center).

Ilmalämpöpumppujen suorituskyvyn arviointi

Ilmalämpöpumppujen suorituskyvyn arvioimisen pohjana käytetään VTT:n testiraportteja Scanoffice (Scanoffice, VTT, 2010 - 2013). Testissä käytetyn huoneen sisälämpötila pidettiin vakiona ilmalämpöpumpun ja varalämmityksen avulla, samalla kun huoneen ulkopuolisen ilman lämpötilaa vaihdeltiin välillä $-30\text{ °C} - +20\text{ °C}$. Ilmalämpöpumpun tuottama lämmitysteho ja ottama sähköteho mitattiin tarkasti ja niiden perusteella laskettiin lämpöpumpun lämpökerroin ja maksimilämmitysteho eri ulkolämpötiloissa. Eri lämpöpumppumallien lämpökertoimet ja lämmitystehot vaihtelivat suuresti, mutta koska yksi malli soveltui selvästi muita paremmin Suomen olosuhteisiin ja se oli hinnaltaan edullinen, mallinnettiin se ainoana testatuista ilmalämpöpumpuista DBES-ohjelmaan. Tuloksina saatuja lämpökertoimia korjattiin osakuorman vaikutuksen suhteen, minkä jälkeen kuvaajalle tehtiin viidennen asteen polynomisovite. Sisälämpötilaa ei tarvitse ottaa huomioon lämpökertoimen muuttujana, sillä se oletetaan aina lämmitettäessä vakioksi.

$$COP_{100\%} = bT_a^5 + cT_a^4 + dT_a^3 + eT_a^2 + fT_a + g \quad (34)$$

missä

T_a on ympäristön lämpötila (ulkolämpötila)

$COP_{100\%}$ on lämpökerroin maksimilämmitysteholla

b, c, d, e, f, g ovat valitusta lämpöpumppumallista riippuvia parametreja

Ulkolämpötilan lisäksi ilmalämpöpumpun lämpökertoimeen vaikuttaa kuormituksen taso, eli millä lämpötehoilla lämpöpumppu toimii suhteessa maksimilämpötehoon.

Toimittaessa alle maksimilämmitysteholla lämpöpumpun sisäisten lämmönvaihtimien yli tarvittava lämpötilaero laskee, mikä nostaa lämpökertointa suhteessa maksimilämmitystehon lämpökertoimeen. Osakuorman vaikutusta lämpökertoimeen on tutkittu Ruotsissa (Swedish Energy Agency) ja saatuihin testituloksiin perustuen vaikutukset on arvioitu. Lämpökeroitin mitattiin kompressoritehoilla 100 %, 75 % ja 50 %. Eri ilmalämpöpumppujen välillä ei huomattu suurta eroa osakuorman vaikutuksissa, joten käytettiin pienintä vaikutusta. Tällöin mallinnettu ilmalämpöpumppu ei ainakaan saa todellisuutta parempaa lämpökertointa osakuormilla. Lämpökertoimen laskentaan otetaan käyttöön muuttujat osakuormasuhde (part load ratio, PLR) ja osakuormakerroin (part load factor, PLF).

$$PLR = \frac{\phi_{tarve}}{\phi_{maksimi}} \quad (35)$$

$$PLF = a PLR + b \quad (36)$$

$$COP = COP_{100\%} PLF \quad (37)$$

Testitulosten perusteella parametrien a ja b arvoiksi valittiin 1,5714 ja 0,5714.

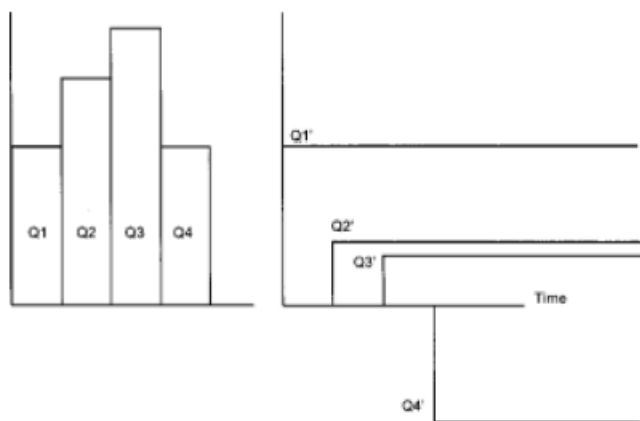
Ilmalämpöpumpun maksimilämpöteho riippuu käytössä pelkästään ulkolämpötilasta, mutta ilmalämpöpumpun tuotemallilla on myös suuri merkitys. Osa ilmalämpöpumpuista on suunniteltu vain lämpimiin olosuhteisiin, jolloin niiden lämmitysteho romahtaa jo pienemmälläkin pakkasilla. Mitään yleispätevää lämpötehon funktiota ei siis voi muodostaa. Maksimilämpöteho ulkolämpötilan funktiona perustuu samaan VTT:n testidataan kuin lämpökeroitin.

Energiakaivon malli

Maalämpöpumpun lämpökertoimeen vaikuttaa merkittävästi lämmönlähteen lämpötila. Yksinkertaisissa laskelmissa lämmönkeruuputkiston paluulämpötilana voidaan käyttää tilastotietoja maaperän keskilämpötiloista, mutta tarkempiakin menetelmiä on käytettävissä. Lämpötilojen tarkempaa laskemista varten hyödynnettiin Earth Energy Designer-ohjelmistoa (Earth Energy Designer), joka laskee käyttäjän määrittämistä lähtötiedoista ja kulutusprofiilista kuukausittaisen lämmönkeruunesteen lämpötilan tuleville käyttövuosille. Ohjelmistolla voidaan mallintaa yli 8000 erilaista porareikäkokoontapanoa, joista kiinnostavimpia ovat pientalojen tapauksessa kuitenkin lähinnä yhden tai muutaman porareikäkokoontapanot. EED tarjoaa kattavan tietokannan eri maalajien oleellisista ominaisuuksista ja käytetyistä porareikä- ja putkiko'oista.

EED-ohjelmiston käytettävyys sellaisenaan DBES-ohjelman rinnalla on heikko sen paljon suuremman mittakaavan takia. EED:n toiminta on hankala myös siinä suhteessa, että se laskee energiakaivon lämpötilat vasta, kun sille syötetään koko vuoden lämmönottoprofiili. DBES tarvitsee lämpötilatietoja jo laskennan aikana maalämpöpumpun lämpökertoimen laskemiseen. Ratkaisuksi ongelmaan EED ohjelman taustalla oleva laskentateoria selvitettiin ja sitä käytettiin yhdessä EED:n laajan tietokannan kanssa niin kutsuttujen g-funktioiden ratkaisemiseksi.

EED-ohjelmiston laskentatapa perustuu P. Eskilsonin (Eskilson, 1987) tekemään väitöskirjaan *Thermal analysis of heat extraction boreholes*. Malli perustuu osittain analyttisiin ratkaisuihin ja osittain numeeriseen ratkaisuun, jonka pohjana on kaksikulotteinen ja transientti äärellisistä alkioista koostuva radiaalikoordinaatistoon sijoitettu porareikä. Mallin vastaukset yksittäiseen lämpövirran askelpulssiin muutetaan dimensiottomiin energiakaivon lämpötilan vastekertoimiin, joita Eskilson nimitti g -funktioiksi. Kun energiakaivon vastekertoimet yhteen askelpulssiin tiedetään, voidaan lämpötilan muutokset laskea myös mille tahansa muulle lämpövirralle, kun se vain jaetaan sarjaksi askelpulseja, ja niiden vasteet summataan jokaisena ajan hetkenä. g -funktio on siis energiakaivon tai energiakaivokokoonpanon ja maaperän ominaisuus, mutta ei riipu energiakaivosta otettavasta lämpövirrasta. Kuva 15 näyttää miten lämpöpulssit jaetaan askelpulseiksi. Minkä tahansa aika-askeleen i askelpulssi Q_i' on siis $Q_i - Q_{i-1}$.



Kuva 15. Askelmaisten lämpöpulssien superpositio ajan suhteen. Askelpulssit Q2, Q3 ja Q4 superponoidaan ajassa ensimmäisen askelpulssin Q1 päälle.

Kaava (38) näyttää miten tunnettujen askelpulssien ja g -funktion avulla voidaan laskea aika-askeleen loppuhetken porareian keskimääräinen lämpötila. Eskilsonin numeerisissa mallissa ei ole otettu porareian lämmönjohtavuusominaisuuksia (keruuputken seinämä, porareian täyteaine) mukaan g -funktion laskentaan, mikä tekee siitä epätarkan pienillä aika-askelilla. Pienin käypä aika-askel vaihtelee tilanteesta riippuen joistain tunneista useisiin päiviin. (Spitler & Yavuzturk, 1999)

$$T_{kaivo} = T_{maaperä} + \sum_{i=1}^n \frac{(\phi'_i - \phi'_{i-1})}{2\pi k} g\left(\frac{t_n - t_{n-1}}{t_s}, \frac{r_b}{H}\right) \quad (38)$$

missä:

t_s on aikaskaala = $H^2/9\alpha'$ (s)

H on porareian syvyys (m)

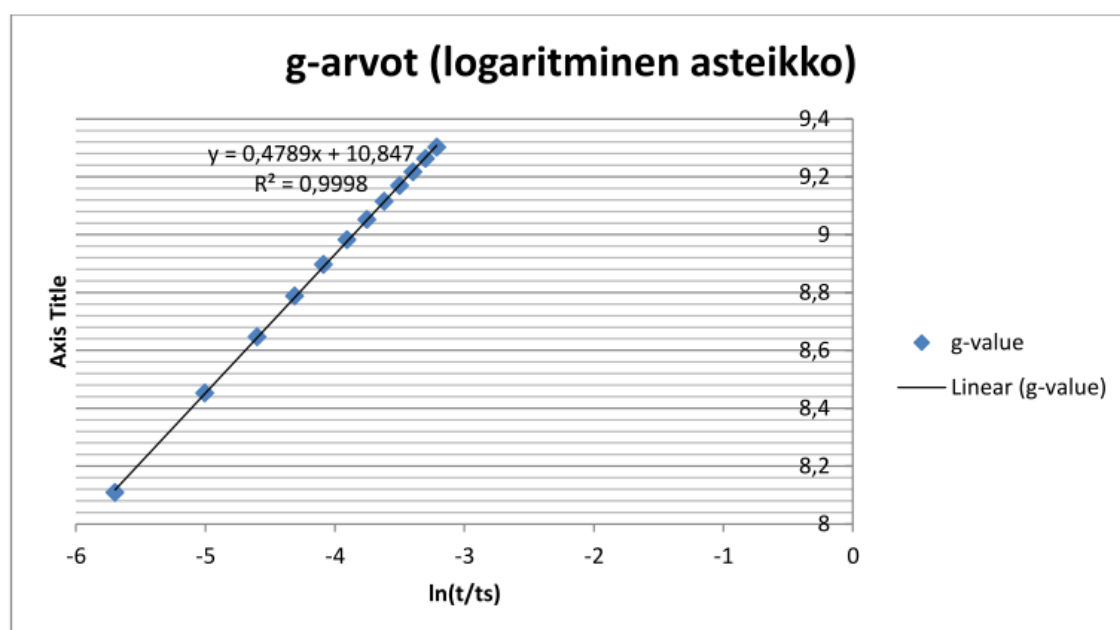
k on maaperän lämmönjohtavuus (W/m K)

- T_{kaivo} on porareian keruunesteen keskilämpötila ($^{\circ}\text{C}$)
 $T_{\text{maaperä}}$ on häiritsemättömän maaperän lämpötila ($^{\circ}\text{C}$)
 ϕ' on lämpöpulssi (W/m) (lämpöteho/pituus)
 r_b on porareian halkaisija (m)
 n on aika-askeleen indeksi
 α' on termien diffusiviteetti [m^2/s]

EED-ohjelman tuloksista voidaan ratkaista halutun energiakaivokokoonpanon g-funktion arvoja aikajanalla kuukauden välein (Kuva 16). Yksinkertaisten kokoonpanojen pisteet käyttäytyvät lähes täydellisen logaritmisesti ajan suhteen, joten g-funktio voidaan esittää kaavalla

$$g\left(x, \frac{r_b}{H}\right) = ax + b \quad (39)$$

missä $x = \ln(t/t_s)$. Parametrit a ja b ovat ominaisia porareian syvyydelle, niiden määrälle, asettelulle ja maaperälle. Kaksi parametria ja suora sovitekäyrä ovat riittäviä aika-askeleen vaihdellessa päivästä vuoteen ja lähekkäisten energiakaivojen määrän pysyessä alle viidessä.



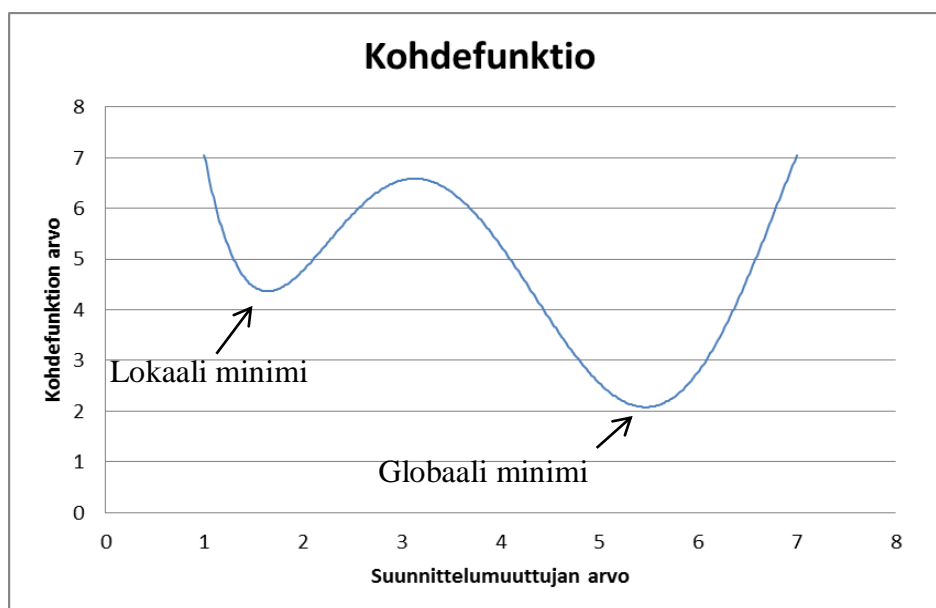
Kuva 16. Eräisiin EED ohjelmasta saatuihin g-funktion arvoihin sovitettu suora.

3 MONITAVOITEOPTIMOINTI

Yleisesti ottaen optimoinnin tavoitteena on löytää jonkin funktion optimiarvo, tapauksesta riippuen minimi tai maksimi. Funktiota, jolle haetaan optimia, kutsutaan kohdefunktioksi. Lisäksi optimointitehtävään liittyy aina rajoitusehtoja. Suunnittelumuuttujille haetaan optimoinnissa sellaiset arvot, että kohdefunktio saa optimiarvon kaikkien rajoitusehtojen täytyessä samanaikaisesti. Funktio voi olla lineaarinen yhtälö, jolloin optimin löytäminen on suhteellinen helppoa esimerkiksi sen derivaatta tai gradientteja tutkimalla. Toisaalta funktio saattaa olla erittäin monimutkainen tai epälineaarinen, kuten rakennuksen energiankulutuksen tapauksessa. Tällaisessa tapauksessa funktiota ei voida derivoida, vaan sen arvoja voidaan tarkastella vain yhdessä pisteessä kerrallaan. Myös lineaariset yhtälöt voivat olla vaikeita optimoitavia, jos rajoitusehtoja on useita. Monimutkaisten tai rajoitusehdollisten kohdefunktioiden optimointiin tarvitaan jonkinlainen ratkaisualgoritmi.

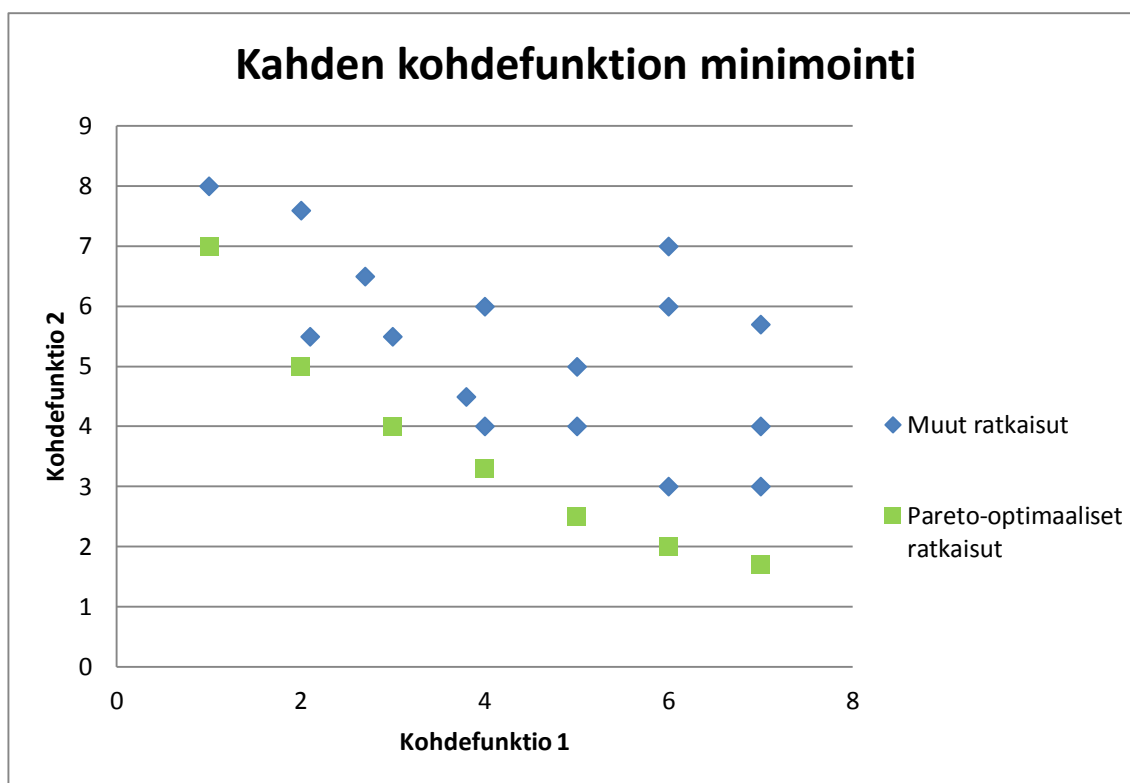
Kohdefunktion arvo riippuu suunnittelumuuttujista. Suunnittelumuuttujia voi olla yksi tai useampia ja kaikki suunnittelumuuttujat yhdessä muodostavat kohdefunktion ratkaisuvapauden. Ratkaisuvapaudessa on yhtä monta ulottuvuutta kuin funktiolla on suunnittelumuuttujia ja se voi olla diskreetti, jatkuva tai osittain molempia riippuen suunnittelumuuttujista.

Kohdefunktiolla voi olla useita minimejä, eli pisteitä joissa funktion derivaatta tai gradientti on nolla. Minimä, jossa kohdefunktion arvo on koko ratkaisuvapauden pienin, kutsutaan globaaliksi minimiksi, kun taas muita minimejä kutsutaan lokaaleiksi minimeiksi (Kuva 17). Optimoinnissa on osattava erottaa globaali minimi lokaaleista, mikä voi olla vaikeaa, jos kohdefunktiota ei tunneta kokonaisuudessaan. Monimutkaisten optimointiongelmien ratkaisussa on pidettävä huolta siitä, että algoritmi ei pysähdy lokaaleihin minimeihin, vaan löydetty ratkaisu on globaali minimi.



Kuva 17. Kohdefunktion minimejä olettaen, että suunnittelumuuttuja voi saada arvoja väliltä 1 – 7.

Monitavoiteoptimointi eroaa normaalista optimoinnista siten, että siinä on useampi kuin yksi kohdefunktio. Yhden kohdefunktion minimi ei todennäköisesti ole muiden kohdefunktioiden minimi, jolloin optimin määrittely vaikeutuu. Yksi vaihtoehto on muodostaa kaikista kohdefunktioista yksi kohdefunktio summaamalla ne yhteen, jolloin päästään takaisin normaaliin optimointiin. Yhteen summaaminen ei luonnollisesti toimi, jos kohdefunktioiden arvot ovat eri yksiköissä, kuten energiatehokkuus ja kustannukset. Tällaisessa tilanteessa ongelman ratkaisija voi antaa kohdefunktioille painokertoimet, joilla niiden arvot voidaan skaalata dimensiottomiksi ennen yhteen summaamista. Tämän menetelmän ongelmana on, että optimi määräytyy valittujen skaalauskerroimien perusteella, jotka pohjautuivat ratkaisijan omiin näkemyksiin. Täsmällisempää on olla yhdistämättä kohdefunktioita ja sen sijaan antaa vastaukseksi joukko ratkaisuja, jotka kaikki ovat joltain osin optimaalisia. Tällaista ratkaisua kutsutaan Pareto-optimaaliseksi. Pareto-optimin täsmällinen määritelmä on, että mitään suunnittelumuuttujaa ei voi muuttaa ilman, että joku kohdefunktioista huononee. Kuva 18 antaa esimerkin tuloksista kahden diskreetin kohdefunktion minimoinnissa. Pareto-optimaaliset ratkaisut muodostavat tässä tapauksessa ryhmän, jota voidaan kutsua Paretorintamaksi.



Kuva 18. Paretorintama kahden funktion minimoinnissa.

Kohdefunktion, jonka arvioimiseen ei riitä yksinkertainen matemaattinen funktio, optimointiin tarvitaan optimointialgoritmi. Sen tehtävänä on tutkia ratkaisuavaruutta ja löytää sieltä potentiaalisia optimaalisia ratkaisuja. Optimointiin ja monitavoiteoptimointiin on kehitetty monia erilaisia optimointialgoritmeja. Algoritmien tulee tasapainotella kahden rajoittavan tekijän välillä; toisaalta ratkaisuavaruus pitää tutkia mahdollisimman tarkasti, jotta globaali optimi erotetaan lokaaleista, mutta toisaalta kohdefunktion arvon laskeminen jokaisessa pisteessä vaatii liikaa laskentatehoa. Varsinkin tämän työn puitteissa, kun kohdefunktion arvon laskeminen kestää kymmeniä sekunteja ja ratkaisuavaruus sisältää satojatuhansia potentiaalisia ratkaisuja, on tärkeää löytää mahdollisimman tehokas ja sopiva optimointialgoritmi. Seuraavassa on käyty läpi kaksi hyvin erilaista optimointialgoritmia, minkä jälkeen esitellään kolmas, tähän työhön valittu optimointialgoritmi ja sen vahvuudet.

Yksinkertaisin ja varmaankin tehottomin optimointialgoritmi on satunnaisetsintä. Algoritmi valitsee satunnaisen pisteen ratkaisuavaruudesta, laskee kohdefunktion arvon ja tallentaa sen. Algoritmi jatkaa satunnaisten pisteiden valintaa, kunnes kaikki ratkaisuavaruuden pisteet on käyty läpi tai kunnes jokin muu lopetusehto täyttyy. Optimiksi satunnaisetsintä valitsee löytämänsä pisteen, jonka kohdefunktion arvo oli paras. Tämä menetelmä maksimoi ratkaisuavaruuden tutkimisen, mutta järjestelmällisyyden puuttuessa vaatii kohtuuttomasti laskentatehoa.

Niin kutsuttu vuorikiipeilijäalgoritmi taas pyrkii minimoimaan laskennan määrän ratkaisuavaruuden tutkimisen kustannuksella. Algoritmi aloittaa satunnaisesta ratkaisuavaruuden pisteestä ja etsii yksittäisillä suunnittelumuuttujan muutoksilla parempia kohdefunktion arvoja. Jos jokin suunnittelumuuttujan muutos tuo halutun muutoksen

kohdefunktion arvoon, algoritmi siirtyy ratkaisuavaruudessa tietyn matkan valitun suunnittelumuuttujan suuntaan. Algoritmi jatkaa tätä kunnes kohdefunktio ei enää parane suunnittelumuuttujien arvoa muuttamalla. Tällöin on saavutettu minimi, mutta se voi olla yhtä hyvin lokaali kuin globaali minimi. Menetelmä on tehokas, jos tiedetään, että kohdefunktiolla on vain yksi minimi, mutta suunnittelumuuttujien suuri määrä ja useampi kohdefunktio lisäävät vuorikiipeilijäalgoritmin työtä huomattavasti. Vuorikiipeilijäalgoritmia voi nopeuttaa käyttämällä gradienttia, eli liikkuminen voi tapahtua tarkalleen siihen suuntaan, mihin kohdefunktio paranee nopeimmin. Samat vahvuudet ja heikkoudet pätevät gradienttimenetelmässä kuin yksinkertaisessa menetelmässä.

3.1 Geneettinen algoritmi

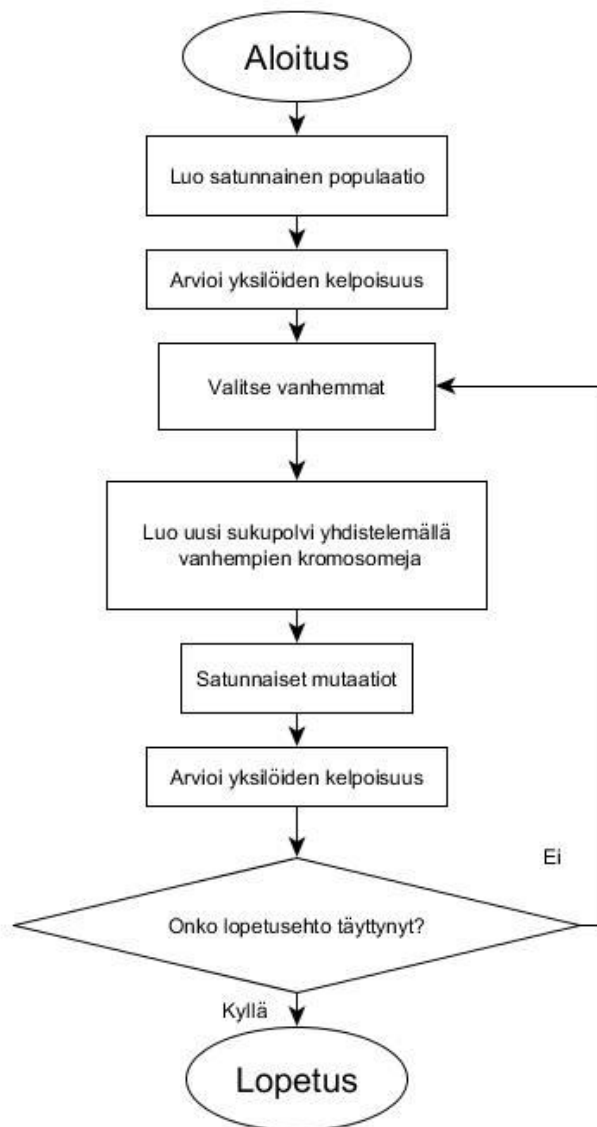
On selvää, että laajojen ja monimutkaisten kohdefunktioiden tutkimiseen tarvitaan algoritmi, joka on kompromissi satunnaisetsinnän kattavuuden ja vuorikiipeilijämenetelmän järjestelmällisyyden välillä. Tällaisen kompromissin tarjoaa geneettinen algoritmi. Geneettisen algoritmin laskennallinen perusta luotiin jo 1950-luvulla, mutta sitä on alettu käyttämään käytännölliseen optimointiin vasta viime vuosikymmenellä. Algoritmi pyrkii nimensä mukaisesti jäljittelemään luonnonvalintaa ja ottaa vahvasti vaikutteita muistakin luonnollisista prosesseista, jotka liittyvät evoluutioon. Menetelmä on huomattavasti yksinkertaisempi kuin todellinen evoluutio, mutta se on helpoin selittää käyttämällä biologiasta tuttuja termejä. (Sivanadam & Deepa, 2008)

Määritellään kromosomi listaksi arvoja, jotka yhdessä yksiselitteisesti määrittelevät optimointiongelman kaikki suunnittelumuuttujat. Yksittäinen arvo kromosomissa on geeni ja sen paikka ja tehtävä kromosomissa on aina sama. Perinteisesti geneettisessä algoritmissa geenit voivat saada joko arvon 0 tai 1 ja ne määrittelevät yksin tai ryhmässä optimointiongelman yhden suunnittelumuuttujan arvon. On myös mahdollista määrittää geeni vastaamaan suoraan yhtä suunnittelumuuttujaa, jolloin se voi saada samoja arvoja kuin suunnittelumuuttuja. Kromosomi on, kuten luonnossa, yksilön rakennusohje. Yksilö voidaan käsittää pisteenä ratkaisuavaruudessa ja sitä voidaan verrata toiseen yksilöön laskemalla optimointiongelman kohdefunktion arvo molemmille yksilölle. Kohdefunktiota kutsutaan tässä yhteydessä kelpoisuusfunktioksi ja sen arvoa yksilön kelpoisuudeksi. Nimi voi olla hieman hämäävä, sillä pienet kelpoisuuden arvot ovat parempia normaalissa minimointiin perustuvassa optimoinnissa. On tärkeää, että kromosomi määrittelee yksiselitteisesti yksilön ominaisuudet, kun taas samaa yhteyttä ei vaadita toisin päin. Sama yksilö voidaan tuottaa erilaisilla kromosomeilla, kunhan se on jokseenkin harvinaista (Sivanadam & Deepa, 2008).

Geneettinen algoritmi aloittaa luomalla joukon ongelman ratkaisemiseen soveltuvia kromosomeja, joiden geenien arvot on valittu kelpoiselta väliltä satunnaisesti. Kromosomien määrittelemää yksilöiden joukkoa kutsutaan populaatioksi. Populaation luomisen jälkeen jokaiselle yksilölle lasketaan sen kelpoisuus kelpoisuusfunktion avulla. Mitä parempi kelpoisuus, sitä paremmin yksilö on pärjännyt ympäristössään (tässä tapauksessa optimointitehtävässä). Luonnonvalinta astuu kuvaan seuraavassa vaiheessa,

kun luodaan uusi sukupolvi, joka koostuu kokonaan tai osin sitä edeltäneen sukupolven jälkeläisistä. Jokaista uuden sukupolven uutta yksilöä varten valitaan kaksi ”vanhempaa” edellisestä sukupolvesta. Yksilön todennäköisyys tulla valituksi vanhemmaksi perustuu sen kelpoisuuteen. Valintamenetelmiä on olemassa useita, joissa valittavien yksilöiden määrä ja valintamenetelmän satunnaisuus vaihtelevat. Kun vanhemmat on valittu, jälkeläisen kromosomi muodostetaan yhdistämällä vanhempien kromosomit valitulla tavalla. Ensimmäisen vanhemman kromosomista voidaan esimerkiksi valita satunnainen geeni, minkä jälkeen kaikki ensimmäisen vanhemman geenit korvataan toisen vanhemman geeneillä. Uusissa jälkeläisissä voi vielä yhdistelyn jälkeen tapahtua mutaatioita, mikä on toteutettu antamalla jokaiselle geenille pieni todennäköisyys muuttua sallituissa rajoissa. Elitismiksi kutsuttua menettelytapaa voidaan hyödyntää uutta sukupolvea luotaessa. Se siirtää kelpoisimmat yksilöt seuraavaan sukupolveen takaamaan, ettei kelpoisuus ainakaan huonone ja että hyvät kromosomit säilyvät populaatiossa.

Edellä kuvattu prosessi tuottaa uuden samankokoisen populaation, jonka kelpoisuus on todennäköisemmin parantunut kuin huonontunut valintaprosessin ansiosta. Algoritmi jatkaa uusien sukupolvien luomista, kunnes yksilöiden kelpoisuus ei enää merkittävästi parane tai sukupolvien on luotu ennalta päätetty määrä (kuva 19). Tällöin algoritmi on toivon mukaan saavuttanut globaalin minimin. Kun geneettistä algoritmia vertaa aiemmin esiteltyihin algoritmeihin, on merkittävin ero siinä, että yhden ratkaisun sijaan geneettinen algoritmi tarkastelee useita ratkaisuja (populaatio) kerralla ennen kuin siirtyy eteenpäin. Populaation koko määrää, kuinka kattavasti algoritmi tutkii ratkaisuvaihtelua, kun taas sukupolvien määrä vastaa etsinnän järjestelmällisyyttä. Lokaalit minimit ovat todellinen ongelma myös geneettiselle algoritmilta ja on aina vaarana, että saatu optimi onkin lokaali minimi. Globaalin minimin löytämiseen tarvitaan tarpeeksi suuri populaatio ja sopiva mutaatiotahti. Mutaatiot antavat mahdollisuuden ”kiivetä” ylös lokaaleista minimeistä, jos populaatio on sellaiseen päätenyt. Mutaatiot ovat myös tärkeitä tapauksissa, joissa jonkin sukupolven kromosomit eivät sisällä optimaalisen yksilön geenejä, sillä ne eivät voi ilmestyä tyhjästä ilman mutaatiota. (Sivanadam & Deepa, 2008)



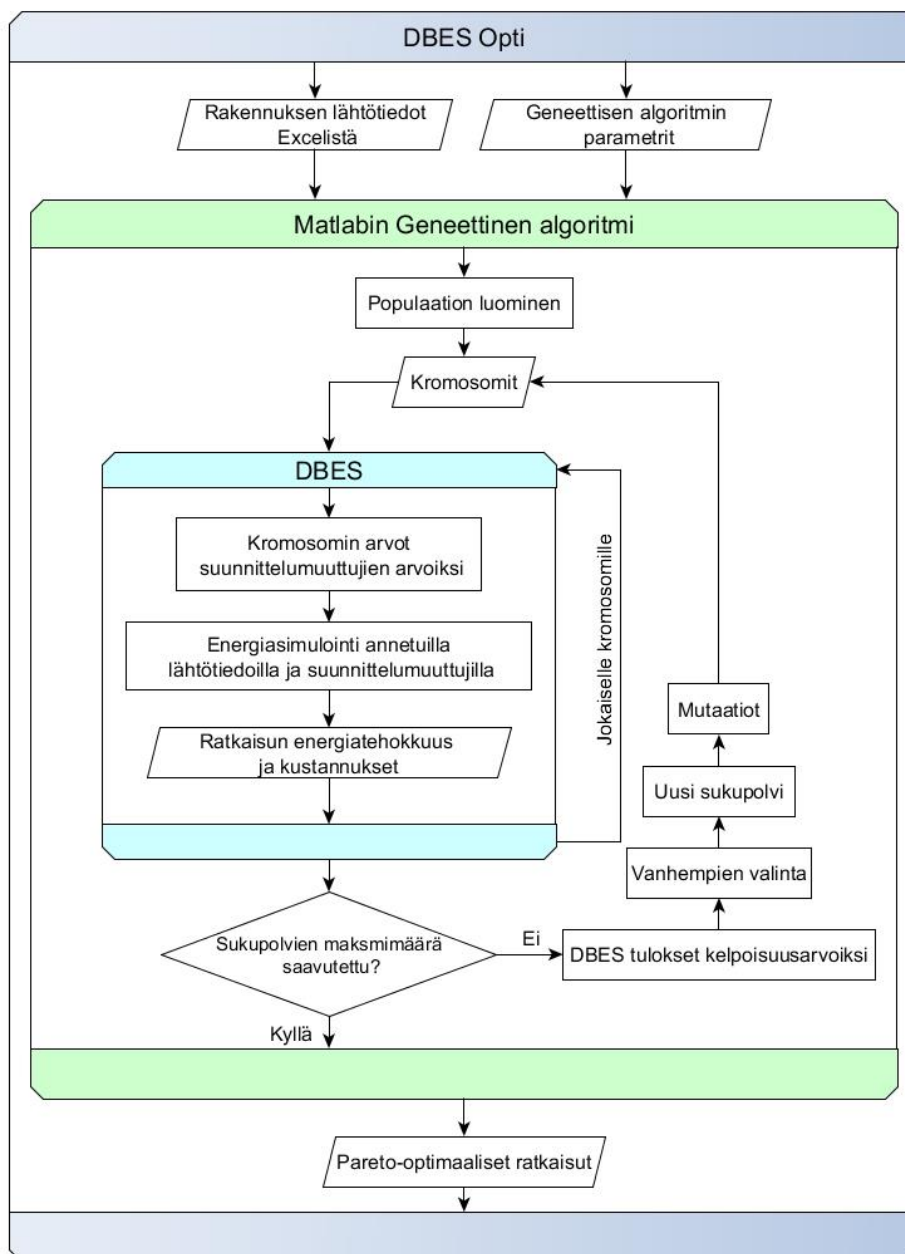
Kuva 19. Geneettisen algoritmin vuokaavio.

Monitavoiteoptimointi asettaa hieman lisävaatimuksia geneettiselle algoritmille, mutta se on jo lähtökohdiltaan hyvässä asemassa populaatioihin perustuvan laskennan ansiosta. Yksilöiden kelpoisuutta pitää tässä tapauksessa arvioida useilla kelpoisuusfunktioilla ja lisääntymisen valintaprosessia on muokattava tuottamaan pareto-optimaalisia yksilöitä tarpeeksi laajalta alueelta. Yksityiskohtaisemmat monitavoiteoptimoinnin parametrit ja menetelmät esitellään luvussa 3.4.

3.2 Optimointi-simulointityökalun rakenne

Energiasimulointiohjelmat on yleensä yhdistettävä erillisiin optimointityökaluihin, sillä ne harvoin sisältävät sellaisia valmiiksi. Tässä työssä optimointityökaluna toimii Matlab-ohjelman geneettisen algoritmin funktio ja se liitettiin DBES-ohjelmaan kirjoittamalla tarvittava Matlab-koodi. Kokonaisuus muodostaa optimointi-simulointityökalun DBES-Opti. Ohjelmalle ei ole käyttöliittymää, vaan muokkaukset optimointiin pitää tehdä muokkaamalla DBES-Optin lähdekoodia. Rakennuksen lähtötietojen syöttö tapahtuu samalla Excel-taulukolla kuin normaalissa DBES-ohjelmassa, mutta optimoitaviksi rakenteiksi valitaan optimointia varten nimetyt rakenteet, jolloin DBES ymmärtää muuttaa niiden rakennetta suunnittelumuuttujien perusteella.

Kuvassa 20 on esitetty DBES-Optin toiminta vuokaaviona. Hierarkiassa ylimpänä oleva DBES-Opti kerää lähtötiedot ja sisältää itsessään annetut geneettisen algoritmin parametrit, jotka se antaa geneettiselle algoritmille kutsuessaan sitä. DBES-Opti kutsuu geneettistä algoritmia vain kerran optimoinnin aikana, minkä jälkeen algoritmi aloittaa toimintansa valituilla parametreilla. Ensimmäinen populaatio luodaan ja yksilöiden kromosomit lähetetään yksi kerrallaan DBES-ohjelmalle, joka kääntää kromosomin tiedot suunnittelumuuttujiksi ja laskee niiden avulla rakennuksen energiankulutuksen ja kokonaiskustannukset. Kun DBES on laskenut kaikkien yksilöiden energiankulutuksen sekä kustannukset ja algoritmi on muuttanut ne kelpoisuusarvoiksi, valitaan seuraavan sukupolven vanhemmat. Uusien sukupolvien luomista ja niiden arvioimista DBES-ohjelmalla jatketaan, kunnes jokin lopetusehdoista täyttyy. Lopetusehdoja voivat olla joko laskenta-aika tai sukupolvien määrä.



Kuva 20. DBES-Opti: toiminnan vuokaavio.

DBES-Opti käyttää mahdollisuuksien mukaan paikallista rinnakkaisajoa, joka tarkoittaa tietokoneen prosessorin muiden ytimien hyödyntämistä yksilöiden arvioimisessa. Rinnakkaisajossa yksilöitä ei tarvitse arvioida DBES ohjelmalla yksi kerrallaan, vaan jokaiselle rinnakkaisajoon osallistuvalla yksiköllä voidaan lähettää yksi kromosomi DBES-ohjelmalla laskettavaksi. Tällä tavoin moninkertaistettiin kahdeksan-ytimisen prosessorin laskentanopeus. Rinnakkaisajo on mahdollista toteuttaa myös niin sanotuissa laskentaklustereissa, jotka sisältävät usein satoja tai tuhansia ytimiä, joille voi lähettää käskyjä verkon yli. Tämä mahdollistaa huomattavasti paikallista rinnakkaisajoa nopeamman laskennan, mutta populaation koko muodostaa ylärajan saadulle hyödyllä, sillä sukupolvia ei voida arvioida kerrallaan useampia. Jos esimerkiksi populaation koko

on sata, ei rinnakkaisajossa ole hyötyä useammasta kuin sadasta erillisestä laskentayksiköstä, koska niiden kaikkien ratkaisut tarvitaan, ennen kuin uusi sukupolvi voidaan luoda ja laskentaa jatkaa. Laskentaklusteria ei hyödynnetty tässä työssä, sillä sen käyttöönottoaminen on hankalaa, eikä optimoinnin epätarkkuutta pidetty tarpeeksi merkittävänä virhelähteenä.

3.3 Optimoinnin lähtötiedot ja suunnittelumuuttujat

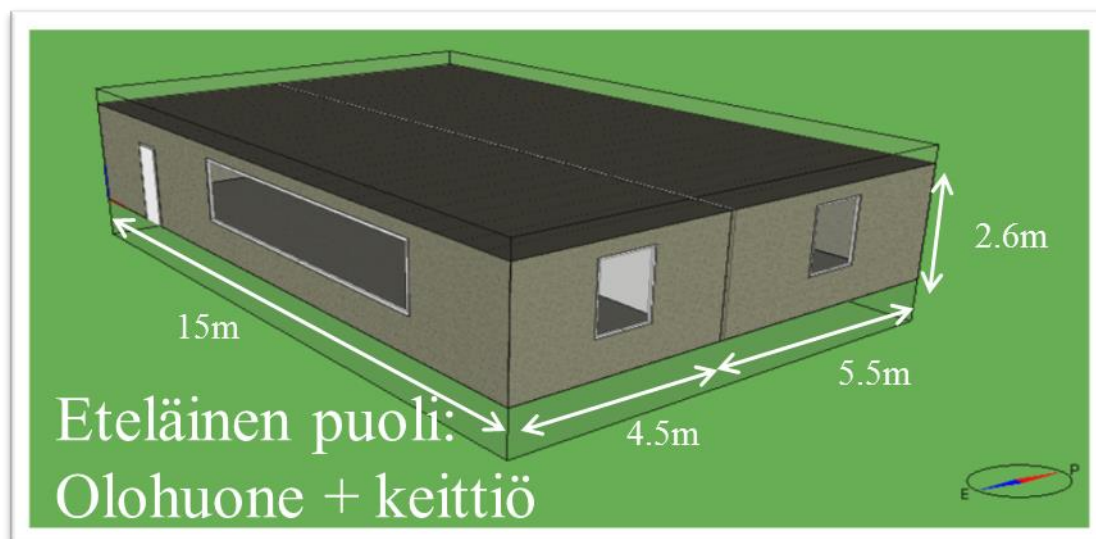
Suurin osa optimoitavan rakennuksen lähtötiedoista on pidettävä muuttumattomana optimoinnin aikana, jotta tehtävä ei muodostu liian suureksi. Taulukossa 1 on lueteltu rakennuksen olennaiset lähtötiedot.

Taulukko 1. Optimoitavan rakennuksen lähtötiedot.

			Määrä	Yksikkö	
Laskelmat	Menetelmä ja väline	Dynaaminen energiasimulointi DBES-ohjelmalla			
	Muuntokertoimet	sähkö 1,7; kaukolämpö 0,7			
Ilmasto-olosuhteet	Sijainti	Helsinki; 60,1 N; 24,9 E			
	Ilmastotietojen lähde	ilmatieteenlaitoksen Helsinki-Vantaa testivuosi 2012			
	Maaston kuvaus	avoin maasto, ei varjostuksia			
Rakennuksen geometria	Pituus x leveys x korkeus		10 x 15 x 2,6	m x m x m	
	Kerroslukku		1	-	
	Pinta-alan ja tilavuuden suhde		0,37	m ² /m ³	
	Ikkunapinta-alan suhde rakennuksen lattiapinta-alaan	Etelä		7,5	%
		Itä		2,25	%
		Pohjoinen		3	%
Länsi			2,25	%	
Suuntaus (julkisivun poikkeama etelästä)		0	°		
Sisäiset kuorimat	Rakennuksen käyttö	omakotitalo (RakMK D3)			
	Keskimääräinen lämpökuorma valaistus + laitteet + asukkaat		5	W/m ²	
	Käyttöprofiilit	keittiö + olohuone	Aamu - ilta	-	
makuuhuone		Ilta - yö	-		
Rakennuksen järjestelmät	Lämmöntuoton hyötysuhde	kaukolämpö	96	%	
		sähkövastus	100	%	

		lämpöpumppu	huomioitu lämpöker- toimessa	-	
	Jakelun hyötysuhde	Tilojen lämmitys (patterit)	90	%	
		Tilojen lämmitys (ilma)	95	%	
		Käyttövesi	90	%	
Rakennuksen asetusarvot ja käyttöajat	Lämpötilan asetus- arvot	Lämmitys	21	°C	
		Jäähdytys	-	°C	
	Käyttöajat ja säädöt	Oleskelu	käyttöprofiili (keskittyy aamuun ja iltaan)		
		Valaistus	käyttöprofiili (keskittyy aamuun ja iltaan)		
		Laitteet	käyttöprofiili (keskittyy aamuun ja iltaan)		
		Ilmanvaihto	aina		
		Lämmitysjärjes- telmä	aina		
Jäähdytysjärjes- telmä	ei koskaan				

Kuvassa 21 näkyy rakennuksen kolmiulotteinen malli. Rakennus on jaettu yhdellä sisäseinällä kahteen osaan. Eteläisellä puolella sijaitseva vyöhyke sisältää olohuoneen ja keittiön ja pohjoisella puolella olevalla vyöhykkeellä sijaitsevat makuuhuoneet. Vyöhykkeiden huonetyypit vaikuttavat ainoastaan ihmisistä ja laitteista syntyvien lämpökuormien aikaprofiileihin. Huoneita ei ole eroteltu tarkemmin, sillä se lisää nopeasti laskenta-aikaa. Kahdella vyöhykkeellä saavutetaan riittävä laskentatarkkuus ainakin lämmitystarpeen arvioimisessa.



Kuva 21. 3D-malli rakennuksesta. Kuvankaappaus IDA ICE ohjelmasta.

Ulkoseinä on puurunkoinen ja eritetty 175+50 millimetrin kivivillakerroksella. Seinän U-arvo tällä eristepaksuudella on noin $0,17 \text{ W/m}^2\text{K}$. Ulkoseinän eristystä voidaan parantaa U-arvoon $0,08 \text{ W/m}^2\text{K}$ asti, jota vastaa 50+300+100 millimetrin kivivillaeristys. Yläpohjassa on 100 millimetrin levyvilla, jonka päällä on 300 millimetriä puhallusvillaa. Yläpohjan U-arvoksi muodostuu $0,09 \text{ W/m}^2\text{K}$ ja sitä voidaan parantaa arvoon $0,05 \text{ W/m}^2\text{K}$ lisäämällä puhallusvillakerroksen paksuus 500 millimetriin asti. Maanvaraisessa alapohjassa on 200 millimetriä paksu EPS-eriste antaen U-arvon $0,16 \text{ W/m}^2\text{K}$. Alapohjan eristystä voidaan parantaa lisäämällä EPS-eristekerroksen paksuutta 400 millimetriin, jolloin saavutetaan U-arvo $0,10 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Taulukko 2 listaa optimoinnissa käytettävät suunnittelumuuttujat ja niiden sallitun vaihtelualueen. Suunnittelumuuttujista ulkoseinien, ylä- ja alapohjan U-arvot olivat diskreettejä muuttujia muiden ollessa jatkuvia muuttujia. Rakenteiden U-arvot eivät voi olla jatkuvia, sillä pulssivastekertoimia ei voida laskea DBES-ohjelman sisällä, vaan ne on laskettu jo etukäteen valmiiksi määritellyille rakenteille. Optimointia varten pulssivastekertoimia laskettiin kaikille kolmelle rakenteelle $0,01 \text{ W/m}^2\text{K}$ välein alarajalta ylärajalle. Toinen osittain diskreetti suunnittelumuuttuja oli aurinkokeräimen pinta-ala, jolle alle yhden neliön arvot tulkittiin nollassa, eli ei aurinkokeräinjärjestelmää. Käytetty geneettisen algoritmin funktio kuitenkin olettaa suunnittelumuuttujien olevan jatkuvia, joten algoritmin käyttämät jatkuvat suunnittelumuuttujat pyöristetään lähimpään diskreettiin arvoon, ennen kuin ne syötetään DBES-ohjelmalle. Diskreetit muuttujat aiheuttavat päällekkäistä laskemista tilanteessa, jossa algoritmi muuttaa suunnittelumuuttujan arvoa niin vähän, että muunnos jatkuvasta diskreetiksi tuottaa saman arvon kuin aikaisempi yritys. Samoin myös populaation monimuotoisuus kärsii, jos se sisältää merkittävän määrän jatkuvalla skaalalla erilaisia, mutta diskreetillä skaalalla samanlaisia yksilöitä. Työn suunnittelumuuttujien diskreettiys arvioitiin merkityksettömäksi algoritmin kannalta. Alun perin myös lämmitysjärjestelmän tyyppi oli diskreetti suunnittelumuuttuja, mutta

sen todettiin aiheuttavan mahdollisia ongelmia algoritmille. Päädyttiin siis suorittamaan optimointi erikseen kaikille tutkituille lämmitysjärjestelmille.

Taulukko 2. Suunnittelumuuttujat ja niiden rajat.

	Yläraja	Alaraja	Yksikkö
Ulkoseinän U-arvo	0,17	0,08	W/m ² K
Yläpohjan U-arvo	0,09	0,05	W/m ² K
Alapohjan U-arvo	0,16	0,10	W/m ² K
Ikkunoiden U-arvo	1,0	0,5	W/m ² K
Vuotoluku q ₅₀	4,0	0,6	m ³ /m ² h
IV:n lämmöntalteenoton hyötysuhde	80	65	%
Aurinkokeräimen pinta-ala	8	0	m ²
Lämmityspatterien kokokerroin	2	1	-

Tutkittaviksi lämmitysjärjestelmiksi valittiin maalämpöjärjestelmä käyttövesivaraajalla (integroitu tai erillinen) (Kuva 6, Kuva 7), ilmalämpöpumppujärjestelmä (Kuva 9) sekä kaukolämpöjärjestelmä, jonka kokoonpano riippui aurinkokeräinjärjestelmän olemassaolosta (Kuva 4, Kuva 5). Järjestelmissä käytettyjen varaajien koko vaihteli aurinkokeräinpinta-alan mukaan. Maalämpöpumppujärjestelmässä oli integroitu 180 litran käyttövesivaraaja tai 300 litran erillinen käyttövesivaraaja, jos järjestelmään kuului aurinkokeräin. Energiakaivon syvyys oli 120 m kaikissa maalämpöratkaisuissa. Ilmalämpöpumppujärjestelmään kuului 100 litran käyttövesivaraaja, jonka tilavuus nousi 300 litraan aurinkokeräimen kanssa. Kaukolämpöjärjestelmässä ei ollut energiavaraajaa, jos siihen ei kuulunut aurinkokeräimiä. Kaukolämpöjärjestelmään alle seitsemän neliön aurinkokeräimellä kuului 300 litran energiavaraaja ja sitä suurempaan 500 litran energiavaraaja.

Viimeinen suunnittelumuuttuja on lämmityspatterien kokokerroin. Rakennuksen lähtöarvoissa on määritelty lämmityspatterien korkeus ja pituus, joista jälkimmäiseen suunnittelumuuttujan arvo vaikuttaa. Ilmalämpöpumpun kanssa käytettyihin sähköpattereihin kokokerroin ei vaikuta, sillä niitä ei mallinneta DBES-ohjelmassa erikseen. DBES ei mitoita lämmityspattereita automaattisesti, vaan käyttäjän tekee sen manuaalisesti. Tämä ei ole mahdollista optimoinnissa, eikä optimoitavalle rakennukselle voida määrittää mitään yhtä yleispätevää patterikokoa. Myöskään suunnittelumuuttujien arvoista ei voi helposti päätellä, kuinka suuria pattereita rakennus tarvitsee. Jos kokokerroin jää liian pieneksi, eivätkä lämmityspatterit voi kattaa lämmitystarvetta, sähkövastukset hoitavat osan lämmityksestä. Koska sähkövastuksien käyttäminen ei ole kannattavaa, se näkyy korkeina kustannuksina ja huonona energiatehokkuutena. Liian suurta patterien mitoistusta estämään määritettiin pattereiden kokokertoimelle hinta, joka perustuu pattereiden

todelliseen hintaan. Näillä rajaehdoilla optimointialgoritmi pystyy kokeilun ja erehdyksen avulla mitoittamaan sopivat patterit erilaisiin rakennuksiin. Lämmityspatterien kokoroin ei itsessään ole mielenkiintoinen tulos, vaan sen tehtävä on siis määrätä järkevän kokoisia pattereita kunkin tyyppiselle rakennukselle sekä antaa lisäkustannus maalämpöpumppujärjestelmän tarvitsemille suuremmille lämmityspattereille.

3.4 Optimointialgoritmin parametrit

Geneettiseen algoritmiin liittyy monia parametreja, jotka vaikuttavat algoritmin toimintaan sen eri vaiheissa. Optimoinnissa käytetään Matlab ohjelmassa valmiina olevaa funktiota nimeltä `gamultiobj`, joka ratkaisee monitavoiteoptimointiongelman geneettisellä algoritmilla (MathWorks, 2014). Parametrien valinnalla on suuri merkitys optimin löytämiselle ja algoritmin tehokkuudelle. Seuraavassa on lueteltu tärkeimmät `gamultiobj`-funktion parametrit ja niiden vaikutus algoritmin toimintaan.

Populaation koko määrää kuinka monta yksilöä luodaan jokaiseen sukupolveen. Suuri populaation koko tehostaa ratkaisuvastuuden tutkimista ja siten globaalin optimin löytämistä, mutta myös laskenta-aika on lähes suoraan verrannollinen populaation kokoon (Sivanadam & Deepa, 2008). `Gamultiobj` käyttää populaation koon oletuksena 50 tai 200, jos suunnittelumuuttujia on yli viisi. Oletuksesta poiketen populaation kooksi valittiin 100.

Sukupolvien lukumäärä määrää, kuinka monta perättäistä sukupolvea algoritmi luo, ennen kuin se lopettaa optimoinnin. `Gamultiobj`-funktioilla ei ole muita lopetusehtoja kuin sukupolvien määrä. Normaalisti yhden kohdefunktion optimoinnissa lopetusehtona käytetään myös kelpoisuuden kasvun pysähtymistä, mutta monitavoiteoptimoinnissa se ei ole riittävä indikaattori. Mitä enemmän sukupolvia lasketaan, sitä lähemmäksi ratkaisut ajautuvat optimia. Tarkan optimin löytymistä ei kuitenkaan voi taata ja tietyn pisteen jälkeen hyödyt suhteessa lisääntyneeseen laskenta-aikaan laskevat liian pieniksi. `Gamultiobj` käyttää perusoletuksena sukupolvien määränä kaksisataa kertaa suunnittelumuuttujien määrä. Tässä suhteessa työssä käytetty sukupolvien määrä, 80, jäi huomattavasti pienemmäksi. Populaation koon ja sukupolvien määrän tulo määräävät lähes kokonaan laskenta-ajan tietylle optimointiongelmalle. Populaation koko vaikutti pareto-optimaalisten ratkaisujen määrään enemmän kuin sukupolvien määrä, joten laskenta-aikaa keskitetiin enemmän suurien populaatioiden suuntaan. Valituilla parametreilla optimointi yhdelle lämmitysjärjestelmälle yhdellä tietokoneella (kahdeksanytiminen, 2,5 GHz prosessori) kesti noin kaksi vuorokautta ja tuloksien muodosta päätellen ne olivat jokseenkin lähellä todellista pareto-optimia. Taloudellisen tarkastelun epätarkkuuden vuoksi ei pidetty tarpeellisena lisätä optimointimenetelmän tarkkuutta.

Seuraava parametri liittyy ensimmäisen populaation luomiseen. Oletuksena `gamultiobj` käyttää funktiota joka luo yksilöiden kromosomit satunnaisesti tasaisella todennäköisyysjakaumalla sallitulta alueelta. Toisena vaihtoehtona on käyttää valmista käyttäjän antamaa populaatiota. Työssä saadut tulokset pohjautuvat suurimmaksi osaksi

satunnaisesti pohjustettuun ensimmäiseen populaatioon, mutta niihin lisättiin myös populaation kokoa pienempi määrä aikaisempien optimointikertojen pareto-optimaalisia ratkaisuja. Näiden avulla algoritmi pääsee nopeammin alkuun ilman haittapuolia, kunhan annetut optimaaliset ratkaisut ovat tarpeeksi monipuolisia.

Normaalisti yksilöiden kelpoisuuden skaalaaminen ja valintafunktion tyyppi ovat oleellisia parametreja geneettisessä algoritmossa, mutta monitavoiteoptimoinnissa menetelmää yksinkertaistetaan. Koska yksilöillä on kaksi kelpoisuusarvoa, ei niistä voida yksiselitteisesti johtaa yhtä todennäköisyyttä tulla valituksi vanhemmaksi. Sen sijaan gamultiobj käyttää valintafunktiona turnajaisia. Turnajaisissa populaatiosta valitaan satunnaisesti neljä yksilöä, joista kelpoisuudeltaan paras yksilö valitaan vanhemmaksi. Funktion dokumentaatiossa ei kerrota tarkasti, miten se käsittelee yksilöitä useilla kelpoisuusarvoilla, mutta valinnassa suositaan yksilöitä, jotka ovat kauempana muista kelpoisuusarvoiltaan. Näin taataan populaation monimuotoisuus ja kattava paretorintama.

3.5 Kohdefunktioiden määrittely

Kohdefunktioiksi valittiin energiatehokkuus sekä investointi- ja energiakustannukset, sillä kustannusten tarkastelu yksinään ei tarjoa monipuolisia tai kovin kiinnostavia tuloksia. Myöskään pelkän energiatehokkuuden tarkastelu ei yksinään ole järkevää, koska jos kustannuksista ei välitetä, energiatehokkuutta pystyy parantamaan lähes rajattomasti. Molempien kohdefunktioiden hyvänä puolena on myös niiden helppo määrittely. Energiatehokkuuden mittariksi valittiin E-luku, joka ottaa huomioon energiatyyppien eriarvoisuuden ja suhteutetaan pinta-alaan (kaava (40)). Kustannukset koostuvat kahdesta osasta, investointikustannuksista ja energiakustannuksista (kaava (41)). Investointikustannuksiin lasketaan mukaan kaikki suunnittelumuuttujiin liittyvät investointikustannukset, mutta ei muita rakennukseen liittyviä kustannuksia. Investointikustannukset eivät siis ole absoluuttisia, vaan ne ovat hyödyllisiä ainoastaan vertailtaessa eri ratkaisuja keskenään. Energiakustannuksiin valittiin sisältyväksi 25 vuoden ostoenergian kustannukset. Muita kuin energiakustannuksia ei huomioida, eli ylläpito- ja huoltokustannukset arvioitiin eri järjestelmillä samoiksi. Korkokanta vuotuisten kustannusten laskemiseen oli 4 % ja energian hinnan oletettiin pysyvän vakiona. Energian hinnan kehityksen ennustaminen on vaikeaa ja se saattaa nousta rajustikin. Näiden tapausten vaikutuksia analysoidaan tuloksissa tarkemmin. Molemmat kohdefunktiot halutaan minimoida. Rakennuksen E-luku ja kokonaiskustannukset lasketaan kaavoista

$$E = \frac{1,7Q_{\text{sähkö}} + 0,7Q_{\text{kaukolämpö}}}{A_{\text{rakennus}}} \quad (40)$$

$$K = K_{\text{investointi}} + k_{\text{energia}} \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \quad (41)$$

missä

E on Rakentamismääräyskokoelman osan D3 kertoimilla painotettu E-luku

Q on ostoenergia [kWh]

K on kustannus [€/m²]

k on vuotuinen kustannus [€/m²]

i on korkokanta [%]

n on tarkasteluaika [a]

3.6 Energiankulutuksen ja hintojen määräytyminen

Energiasimuloinnissa lasketaan mallintamalla ainoastaan lämmitykseen ja jäädytykseen tarvittava energia. Muu sähkönkulutus, kuten valaistus, kuluttajalaitteet ja LVI-järjestelmien apulaitteet, lasketaan DBES-ohjelmassa jälkikäteen perustuen rakentamismääräyskokoelman antamiin ohjearvoihin. Suurin osa muusta sähkönkulutuksesta ei riipu suunnittelumuuttujista, joten ne eivät vaikuta optimointiin. Niitä haluttiin kuitenkin arvioida, jotta energiankulutus voitaisiin ilmoittaa absoluuttisena arvona.

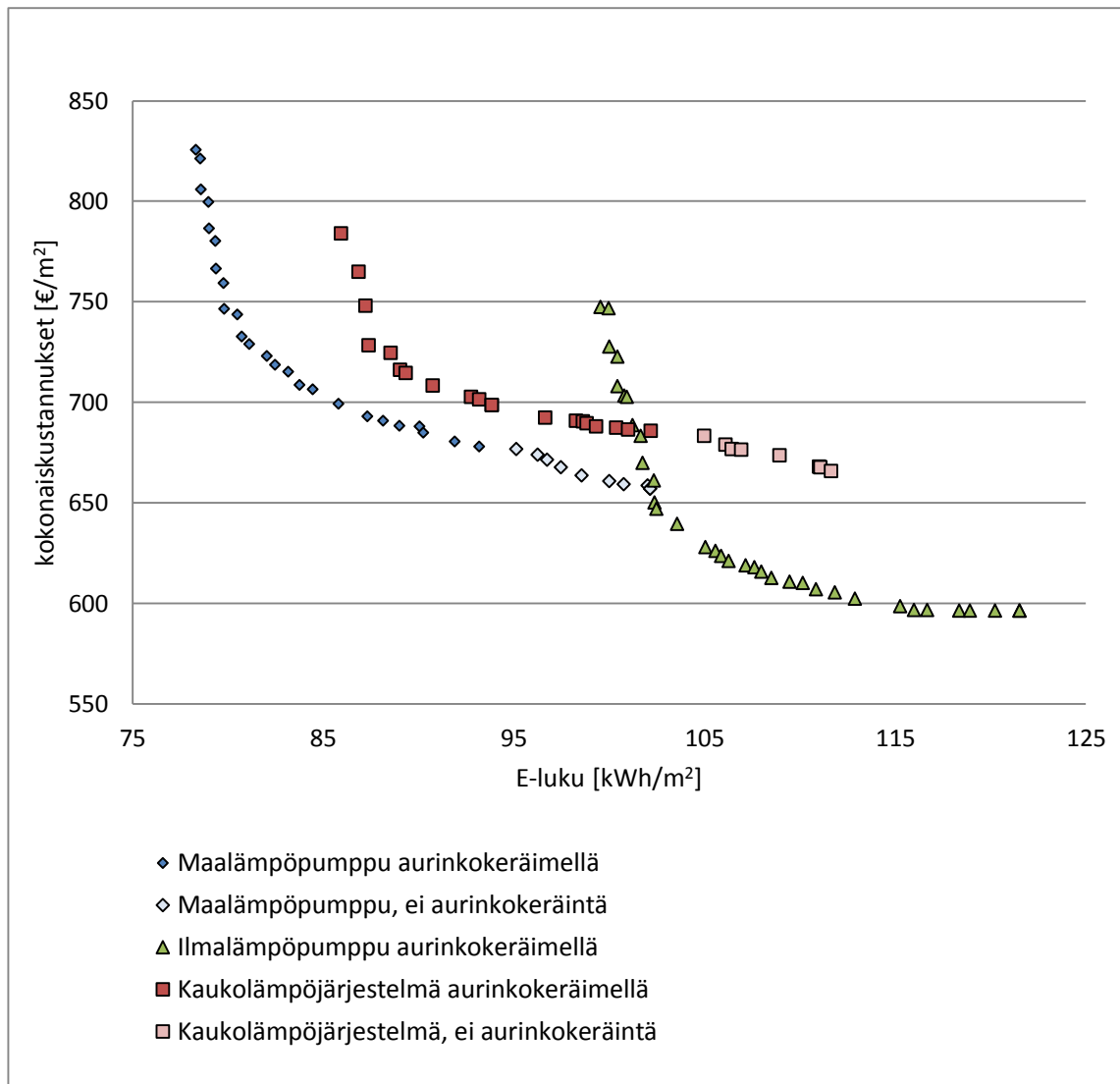
Investointikustannusten arvioiminen uudisrakentamisessa osoittautui vaikeaksi tehtäväksi. Rakenteiden hintojen lähteenä käytettiin raporttia ”Energiatehokkuutta koskevien vähimmäisvaatimusten kustannusoptimaalisten tasojen laskenta” (Ympäristöministeriö, 2012a). Raportissa käytettyjä hintoja tarkennettiin rakenteisiin liittyvien kustannusten osalta olemalla yhteydessä erääseen tutkimusryhmän jäseneseen. Rakenteiden lisäksi toisen merkittävän menoerän investointikustannuksiin aiheuttavat LVI-järjestelmät. LVI-järjestelmien hinnoitteluun ei ole yhtä kattavaa lähdettä, vaan niiden hinnoitteluun käytettiin LVI-katalogia (Onninen Oy, 2012) ja jälleenmyyjien hinnastoja (Taloon Yhtiöt Oy, 2014). Tehtävä oli vaikea, sillä samoille tuotteille löytyi useita hintoja ja osa hinnoista oli alennettuja. Yleisesti tuotteille pyrittiin käyttämään halvinta, luotettavaa ja alentamatonta hintaa. Myös tuotemallien väliset hinta-erot vaikeuttivat hinnoittelua. Esimerkiksi erilaisille lämpöpumppu- ja aurinkokeräinmalleille löytyi usein tarkkoja tietoja joko suorituskyvystä tai hinnasta, mutta ei molemmista. Tuotteiden lisäksi järjestelmiin liittyy asennuskustannuksia, joihin kysyttiin hinta-arvioita suunnittelutoimistoilta ja asennuksista vastaavalta yritykseltä. Rakenteiden hinnoitteluun käytetystä raportista saatiin myös hinnat ilmanvaihtokoneen lämmön talteenottoyksikölle sekä rakennuksen ilmatiiviydelle. Rakennuksen ilmatiiviyden hinta perustuu suoritettuihin ylimääräisiin tiiviysmittauksiin ja parannuksiin. Ikkunoiden neliöhinnasta muodostettiin U-arvon funktio perustuen useiden valmistajien ilmoittamiin hintatietoihin. Ikkunan U-arvon parantuessa paranevat myös aurinkosuojausominaisuudet. Taulukko 3 listaa kaikki rakenteisiin ja järjestelmiin liittyvät kustannukset, joita käytettiin investointikustannuksia arvioitaessa sekä käytetyt energian hinnat. Sähkön hinta otettiin energiaviraston sähkön hintavertailusivustolta (Energiavirasto) ja kaukolämmön hinta ja liittymiskustannukset Energiateollisuus ry:n uusimmista hinnastoista Helsingin alueelle (Energiateollisuus ry).

Taulukko 3. Optimointiin vaikuttavien rakenteiden ja järjestelmien hinnat, alv 0%.

Rakenteet		
Ulkoseinä (U= 0,17 0,13 0,08 W/Km ²)	146,8 151,4 207,7	€/us-m ²
Yläpohja (U= 0,09 0,07 0,05 W/Km ²)	77,2 82,0 89,9	€/m ²
Alapohja (U= 0,16 0,13 0,10 W/Km ²)	42,0 47,2 58,3	€/m ²
Ikkunat (W/Km ²)	134,9·U ^{-1,168}	€/ikk-m ²
Vuotoluku (q ₅₀ = 4 2 0,6 m ³ /(m ² h))	450 900 2100	€
<i>- m² ilman lisämääritteitä viittaa rakennuksen lattiapinta-alaan</i>		
LVI-järjestelmät		
Ilmanvaihto		
LTO hyötysuhde (65% 80%)	2100 2500	€
Maalämpöpumppu		
6 kW yksikkö	5211	€
6 kW yksikkö integroidulla 180 l KV varaajalla	5700	€
Asennuskustannukset (+ jos erillinen varaaja)	2016 (+ 800)	€
Energiakaivo	28	€/m
Ilmalämpöpumppu		
3,65 kW yksikkö	951	€
Asennus	600	€
Kaukolämpö		
Liittymiskustannukset	2177	€
Alajakokeskus	3145	€
Asennus	400	€
Aurinkokeräinjärjestelmä		
2 m ² aurinkokeräin (Savo Solar SF100)	475	€
Muut tarvikkeet	790	€
Asennus	800	€
Energia (sisältää muut verot paitsi alv)		
Sähkön hinta	124	€/MWh
Kaukolämmön hinta	63	€/MWh

4 TULOKSET

DBES-Opti-ohjelmalla saadut ratkaisut on esitelty molempien kohdefunktioiden suhteen kuvassa 22. Järjestelmien ratkaisut on esitetty erillään toisistaan, eli ne eivät vaikuta toisensa pareto-optimaalisuuteen. Jokaisen järjestelmän ratkaisujoukon alimmaisina ratkaisuna on kustannusoptimaalinen, kun taas sen yläpuolella olevat ratkaisut ovat kustannusoptimaalisimpia tapoja saavuttaa parempi E-luku. Paremman E-luvun ratkaisuja voi pitää itseisarvoltaan haluttavina, mutta ne myös muodostuvat kannattaviksi, jos energian hintojen kehitys on arvioitua nopeampaa. Talousennusteiden vaikutusta tarkastellaan myöhemmin luvussa 4.3. Tuloksista nähdään, että ilma-ilmalämpöpumppujärjestelmä on kaikista kustannustehokkain tarkastelluista järjestelmistä. Maalämpöpumppujärjestelmä on paras vaihtoehto, jos halutaan saavuttaa E-luku alle 102 kWh/m^2 . Kaukolämpöjärjestelmä ei tulosten mukaan ole missään tapauksessa paras vaihtoehto. Tuloksissa esitetyt kustannukset ovat kuluttajahintoja ja sisältävät kaikki verot. Ratkaisujoukkojen muodon perusteella voidaan päätellä, että optimointi on päässyt kohtalaisen lähelle optimaalisia ratkaisuja, sillä ratkaisut seuraavat tyypillistä paretokäyrän muotoa. Huonosti optimoitu ratkaisujoukko olisi harvempi, koska yksittäiset melko optimaaliset ratkaisut dominoisivat suurta aluetta muiden ratkaisujen ollessa kauempana optimista.



Kuva 22. Järjestelmien pareto-optimaaliset ratkaisut.

Suunnittelumuuttujien arvot osalle ratkaisuista on listattu taulukkoon 4. Täydellinen lista suunnittelumuuttujien arvoista löytyy liitteestä 1. Mielenkiintoisimmiksi suunnittelumuuttujiksi osoittautuivat rakenteiden lämmöneristys sekä ilmanpitävyys ja aurinkokeräimen ala. Lämmön talteenoton vuosihyötysuhde oli lähes poikkeuksetta ylärajalla kaikissa optimaalisissa ratkaisuissa. Voidaankin olettaa, että poikkeamat ylärajalta johtuvat optimointialgoritmin pienestä epätarkkuudesta ja että lämmön talteenoton hyötysuhde kannattaa aina maksimoida. Pattereiden pituuskerroin vaihteli melko odotetusti järjestelmien ja ratkaisujen välillä, mutta sen tarkastelu unohdetaan, koska sen tehtävä oli avustaa laskentaa mitoituksessa ja huomioida lämmityspattereihin liittyviä kustannuksia.

Taulukko 4. Suunnittelumuuttujien arvoja pareto-optimaalisissa ratkaisuissa. Järjestelmien kustannusoptimaaliset ratkaisut korostettu vihreällä.

Maalämpöpumpputjärjestelmä								
U-arvot [W/m ² K]				Ilmavuoto- luku q ₅₀ [m ³ /(m ² h)]	LTO hyötysuhde [%]	Aurinko- keräinala [m ²]	E-luku [kWh/m ²]	kustannukset [€/m ²]
Ulkoseinä t	Yläpohj a	Alapohj a	Ikkuna t					
0,09	0,06	0,10	0,50	0,63	80	7,83	78	826
0,12	0,06	0,10	0,51	0,62	80	7,82	79	767
0,13	0,06	0,14	0,58	0,69	80	7,80	82	723
0,13	0,06	0,12	0,74	0,73	80	7,26	82	719
0,15	0,08	0,15	0,92	1,07	80	6,67	88	691
0,17	0,08	0,16	0,99	1,96	80	4,85	93	678
0,15	0,06	0,14	0,88	0,68	80	-	95	677
0,13	0,08	0,16	1,00	1,39	80	-	99	664
0,17	0,08	0,16	1,00	2,04	80	-	102	657

Ilmalämpöpumpputjärjestelmä								
U-arvot [W/m ² K]				Ilmavuoto- luku q ₅₀ [m ³ /(m ² h)]	LTO hyötysuhde [%]	Aurinko- keräinala [m ²]	E-luku [kWh/m ²]	kustannukset [€/m ²]
Ulkoseinä t	Yläpohj a	Alapohj a	Ikkuna t					
0,08	0,06	0,11	0,51	0,73	80	7,89	100	748
0,11	0,06	0,11	0,58	0,62	80	7,78	102	683
0,13	0,06	0,12	0,82	0,82	80	7,74	106	626
0,15	0,08	0,14	0,93	1,33	80	7,55	112	605
0,16	0,08	0,16	0,99	3,86	80	7,05	122	597

Kaukolämpöjärjestelmä								
U-arvot [W/m ² K]				Ilmavuoto- luku q ₅₀ [m ³ /(m ² h)]	LTO hyötysuhde [%]	Aurinko- keräinala [m ²]	E-luku [kWh/m ²]	kustannukset [€/m ²]
Ulkoseinä t	Yläpohj a	Alapohj a	Ikkuna t					
0,10	0,05	0,12	0,58	0,89	78	7,36	86	784
0,13	0,06	0,12	0,56	1,12	78	7,97	89	725
0,13	0,07	0,13	0,71	0,72	79	7,07	91	709
0,16	0,08	0,15	0,99	1,84	78	4,94	102	686
0,13	0,06	0,14	0,77	0,97	78	-	105	684
0,14	0,07	0,14	0,92	1,47	77	-	109	674
0,16	0,08	0,15	0,99	1,33	78	-	112	666

4.1 Järjestelmien energiatehokkuus

Lämmitysjärjestelmän valinnalla voidaan todeta olevan suuri merkitys rakennuksen energiatehokkuudelle. Maalämpöpumpputjärjestelmä osoittautui vertailun energiatehokkaimmaksi vaihtoehdoksi saavuttamalla parhaimmillaan E-luvun 78 kWh/m². Kaukolämpöjärjestelmän paras E-luku oli 86 kWh/m² ja ilmalämpöpumpputjärjestelmän 100 kWh/m².

Kun katsotaan tuloksien suunnittelumuuttujien arvoja ratkaisussa kustannusoptimaalisimmasta energiatehokkaimpaan, nähdään miten energiatehokkuutta parantavat toimenpiteet pärjäävät kustannustehokkuudessa suhteessa toisiinsa. Maa- ja kaukolämpöjärjestelmissä rakenteiden eristystason parantaminen on kannattavampaa kuin aurinkokeräinjärjestelmän käyttäminen tiettyyn pisteeseen asti. Kun eristämiskustannukset kasvavat kohtuuttomasti suhteessa saatuihin hyötyihin, aurinkokeräinjärjestelmä muodostuu seuraavaksi kannattavimmaksi toimenpiteeksi noin viiden neliön keräinalalla. Tätä pienemmät aurinkokeräinjärjestelmät eivät ole kannattavia suurten lähtökustannusten takia. Aurinkokeräinjärjestelmän kanssa lämmöneristys lähtee uudelleen samasta tasosta kuin kustannusoptimaalisessa ratkaisussa ilman keräintä, mikä kertoo siitä, että aurinkokeräinjärjestelmällä ja eristystasolla ei ole merkittävää päällekkäistä vaikutusta. Eristäminen vähentää tilojen lämmitystarvetta, kun taas aurinkokeräin vähentää pääasiassa käyttöveden lämmitystarvetta.

4.2 Kustannusoptimaaliset ratkaisut

Kustannusoptimaalinen lämmöneristystaso maalämpöpumppujärjestelmälle löytyi suunnittelumuuttujien ylärajalta. Tämä tarkoittaa sitä, että kustannuksia olisi ehkä mahdollista laskea entisestään valitsemalla määräyksiä heikompi eristystaso. Muille järjestelmille kustannusoptimaalinen eristystaso oli hieman määräyksien minimivaatimusten alapuolella. Määräyksien minimivaatimusten energiankulutus kuitenkin alitetaan merkittävästi parannetun lämmöntalteenoton avulla. Ilmalämpöpumpulla kustannusoptimaalisessa ratkaisussa energiatehokkuutta on parannettu myös aurinkokeräimellä. Maa- ja kaukolämpöjärjestelmien kustannusoptimaalisiin ratkaisuihin ei kuulu aurinkokeräintä. Tulos on järkevä, sillä käyttöveden lämmittäminen sähkövastuksilla nostaa sekä käyttökustannuksia että E-lukua merkittävästi.

Koska DBES-ohjelmalla lasketut E-luvut eivät vastaa täysin rakentamismääräyskokoelman D5 laskentatavalla saatuja tuloksia, on vertailun vuoksi rakentamismääräysten minimivaatimuksilla DBES-ohjelmalla lasketut E-luvut esitetty taulukossa 5. Minimivaatimuksia vastaava rakennus vastasi rakenteiden eristyksen suunnittelumuuttujien U-arvojen ylärajoja, ilmavuotolukua $2,0 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ ja lämmöntalteenoton vuosihyötysuhdetta 45 %. Muita rakennuksen lähtöarvoja ei muutettu. Kustannusoptimaalinen E-luku oli maalämpöjärjestelmälle 9 %, ilmalämpöpumppujärjestelmälle 31 % ja kaukolämpöjärjestelmälle 12 % matalampi kuin määräysten minimivaatimustaso (Taulukko 5).

Taulukko 5. Rakentamismääräyskokoelman vertailuarvoilla lasketut E-luvut.

	Minimivaatimusten E-luku [kWh/m ²]	Kustannusoptimaalinen E-luku [kWh/m ²]	Muutos
Maalämpöpumppu	112	102	- 9 %
Ilmalämpöpumppu	179	122	- 31 %
Kaukolämpö	127	112	-15%

4.3 Tarkasteluajan ja energian hinnan herkkyystarkastelu

Tarkastellaan eri järjestelmien kustannusoptimaalisia ratkaisuja energiakustannusten tarkasteluajan ja energian hinnan nousun suhteen. Hankintahintojen herkkyystarkastelu sen sijaan jätetään pois, koska erilaisten hinnoitteluvaihtoehtojen läpikäyminen ja tulosten esittäminen olisi liian työlästä. Järjestelmien perushankintakustannuksia voidaan kuitenkin korjata suoraan tuloksissa ilman, että se vaikuttaa ratkaisuihin. Esimerkiksi maalämpöpumpun hintaa tai kaukolämmön liittymiskustannuksia voidaan korjata muuttamalla kaikkien järjestelmän ratkaisujen kokonaiskustannuksia hinnan muutosta vastaavalla määrällä. Muiden järjestelmien, kuten aurinkokeräimen hintaa ei voi muuttaa ilman vaikutusta optimaalisten ratkaisujen suunnittelumuuttujiin.

Valitut kohdefunktiot mahdollistavat sen, että herkkyystarkastelu voidaan tehdä suoraan saaduille tuloksille ilman uusia optimointikierroksia. Toinen kohdefunktioista, E-luku, voidaan muuntaa takaisin energiankulutukseksi, jolloin pareto-optimaalisia ratkaisuja voidaan pitää kustannusoptimaalisena tapana saavuttaa tietty energiankulutus. Voidaan todeta, että energian hinta ja tarkastelu aika eivät vaikuta siihen, miten tietty energiankulutus saavutetaan kustannusoptimaalisesti. Tästä seuraa, että tarkasteluajan tai energian hinnan muuttaminen eivät muuta pareto-optimaalisten ratkaisujen paikkaa x-akselilla (E-luvun suhteen) tai ratkaisujen suunnittelumuuttujien arvoa. Ainoastaan ratkaisujen kokonaiskustannukset muuttuvat ja sitä myötä ratkaisu saattaa menettää asemansa pareto-optimaalisena ratkaisuna. Koska suunnittelumuuttujat määräävät yksiselitteisesti investointikustannukset, ne pysyvät vakiona tässä tarkastelussa. Kun tarkastelu aikaa tai energian hintaa muutetaan, ratkaisujen uudet kokonaiskustannukset voidaan laskea kaavasta

$$K' = K_{investointi} + e K_{energia} \quad (42)$$

missä

$K_{investointi}$ on perustapauksen ja uuden tapauksen investointikustannukset (ei muutosta)

$K_{energia}$ on koko tarkasteluajan kattavien energiakustannusten nykyarvo perustapauksessa (25 vuoden tarkastelu aika, 4 % korkokanta ja 0 % vuotuinen energian hintojen nousu)

e on uuden tapauksen ja perustapauksen (tarkastelu aika 25 vuotta) energiakustannusten suhde, jota kutsutaan nyt energiakustannusten kertoimeksi. Energiakustannusten kertoimen e arvo on tarkasteluajan ja energian hinnan muutoksen funktio ja sen arvoja on laskettu taulukkoon 6.

Taulukko 6. Energiakustannusten kertoimen e arvoja.

Energiakustannusten kerroin e	Tarkasteluaika (korkokanta 4 %)		
	25 vuotta	35 vuotta	50 vuotta
+0 %/vuosi	1	1.19	1.36
+2 %/vuosi	1.23	1.57	1.95
+5 %/vuosi	1.53	2.51	3.83

Energiakustannusten kerroin on hyödyllinen, sillä se yhdistää useamman eri yksikössä olevan muuttujan vaikutuksen yhteen kertoimeen. Kasuvat energiakustannukset siirtävät kustannusoptimaalista ratkaisua kohti matalampien E-lukujen ratkaisuja, sillä niiden kokonaiskustannuksista pienempi osa muodostuu energiakustannuksista. Taulukkoon 7 on kerätty kustannusoptimaalisia ratkaisuja eri järjestelmille viidellä eri energiakustannusten kertoimen arvolla. Tarkastelun tuloksista nähdään, että energiakustannusten kertoimen tulee olla yli kaksinkertainen, ennen kuin kustannusoptimaalinen ratkaisu siirtyy merkittävästi. Tämä vastaa perustapaukseen verrattuna pidempää tarkasteluaikaa ja nopeaa energian hintojen nousua. Kustannusoptimaalinen E-luku laskee perustapauksesta energiakustannuksiltaan kaikista kalleimpaan tapaukseen 9 – 15 % järjestelmästä riippuen.

Taulukko 7. Energiakustannusten kertoimen e vaikutus järjestelmien kustannusoptimaalisiin ratkaisuihin.

Kustannusoptimaaliset ratkaisut	U-arvot [W/m ² K]				Ilmavuotoluku q_{50} [m ³ /(m ² h)]	LTO hyötysuhde [%]	Aurinkokeräinala [m ²]	E-luku [kWh/m ²]	kustannukset [€/m ²]
	Ulkoseinä	Yläpohja	Alapohja	Ikkunat					
e = 1,0									
Maalämpöpumppu	0,17	0,08	0,16	1,00	2,04	80	-	102	657
Ilmalämpöpumppu	0,16	0,08	0,16	0,99	3,86	80	7,05	122	597
Kaukolämpö	0,16	0,08	0,15	0,99	1,33	78	-	112	666
e = 1,5									
Maalämpöpumppu	0,17	0,08	0,16	1,00	2,04	80	-	102	728
Ilmalämpöpumppu	0,16	0,08	0,16	0,98	2,02	80	7,63	116	678
Kaukolämpö	0,16	0,08	0,15	0,99	1,33	78	-	112	752
e = 2,0									
Maalämpöpumppu	0,17	0,08	0,16	1,00	1,39	80	-	101	799
Ilmalämpöpumppu	0,16	0,08	0,16	0,98	2,02	80	7,63	116	758
Kaukolämpö	0,16	0,08	0,15	0,99	1,33	78	-	112	839
e = 2,5									
Maalämpöpumppu	0,13	0,08	0,16	1,00	1,39	80	-	99	869
Ilmalämpöpumppu	0,15	0,07	0,15	0,97	0,88	80	7,55	111	838
Kaukolämpö	0,14	0,08	0,14	0,79	0,61	79	6,85	94	912
e = 3,5									
Maalämpöpumppu	0,15	0,08	0,15	0,85	0,78	80	6,20	87	997
Ilmalämpöpumppu	0,13	0,07	0,15	0,89	0,72	80	7,80	109	989
Kaukolämpö	0,13	0,07	0,13	0,71	0,72	79	7,07	91	1049

Energian hinnan noustessa maalämpöpumppujärjestelmä kuroi umpeen kokonaiskustannuseroa ilmalämpöpumppujärjestelmään, mutta se ei ollut kustannustehokkain järjestelmä edes viimeisessä tapauksessa. Kaukolämpöjärjestelmä ei ole kustannustehokkain järjestelmä missään tapauksessa.

Tulokset ovat linjassa muiden tutkimuksien kanssa. Ympäristöministeriön raportissa ”Energiatehokkuutta koskevien vähimmäisvaatimusten kustannusoptimaalisten tasojen laskenta” (Ympäristöministeriö, 2012a) kustannusoptimaaliseksi ratkaisuksi valittiin pakettiratkaisu kaksi, kun oletettiin sama korkokanta ja maltillinen energian hintojen nousu. Pienemmällä korkokannalla ja nopeammalla energian hintojen nousulla (vastaten energiakustannusten kerrointa 2,10) pakettiratkaisu kolme oli kustannusoptimaalinen kaikille muille järjestelmille paitsi maalämmölle, jolle kakkosratkaisu oli edelleen paras. Pakettiratkaisut vastaavat melko hyvin tässä työssä löydettyjä ratkaisuja. Suurimmat poikkeamat selittyvät aurinkokeräimen käytöllä, jota ei ympäristöministeriön raportissa huomioitu. Taulukkoon 8 on kerätty raportin pakettiratkaisujen suunnittelumuuttujien arvot.

Taulukko 8. Ympäristöministeriön raportin pakettiratkaisujen muuttujien arvot.

	U-seinä W/Km ²	U-katto W/Km ²	U-ala- pohja W/Km ²	U-ikku- nat W/Km ²	Ilmavuoto- luku q ₅₀ m ³ /m ² h	LTO
PT 1	0.17	0.09	0.16	1.00	4.00	0.65
PT 2	0.17	0.09	0.16	0.80	2.00	0.80
PT 3	0.13	0.07	0.13	0.80	2.00	0.80
PT 4	0.08	0.05	0.10	0.80	0.60	0.80

Kaukolämpö oli kaikissa raportin tarkasteluissa kokonaiskustannuksiltaan kalliimpi kuin maalämpö, mutta kuitenkin halvempi kuin sähkölämmitys ilmalämpöpumpulla. Raportissa kuitenkin oletettiin ilmalämpöpumpun lämmitysosuudeksi rakentamismääräysten suosittama 1000 kWh/a, joka on huomattavasti pienempi osuus kuin mihin DBES-ohjelmassa mallinnettu ilmalämpöpumppu pääsee. Tutkimuksen tuloksissa todettiin, että kustannusoptimaalinen energiatehokkuus on järjestelmästä riippuen 11 – 17 % parempi kuin määräysten vaatima taso. Ainoastaan ilmalämpöpumppujärjestelmä poikkesi tästä tuloksesta merkittävästi ja sille voidaan hyväksi syyksi esittää aurinkokeräintä, joka mahdollistaa energiatehokkuuden merkittävän nostamisen kustannustehokkaalla tavalla.

5 PÄÄTELMÄT

Tuloksien perusteella voidaan todeta, että lämmitysjärjestelmä vaikuttaa olennaisesti rakennuksen energiatehokkuuteen ja kustannuksiin. Ilmalämpöpumpulla saavutettiin matalimmat kokonaiskustannukset kaikissa tarkasteluissa, kun taas maalämpöpumpulla päästiin parhaaseen energiatehokkuuteen. Kaukolämpöjärjestelmä hävisi maalämpöpumppujärjestelmälle niin kustannuksissa kuin energiatehokkuudessa. Optimoinnin löytämät kustannusoptimaaliset ratkaisut eri lämmitysjärjestelmille olivat energiatehokkuudeltaan 9 – 31 % paremmat kuin rakentamismääräyskokoelman määrittämä vertailuarvo vastaavalla lämmitysjärjestelmällä. Kustannusoptimaalisuutta silmällä pitäen rakentamismääräyksien vaatimuksia voidaan siis vielä joiltain osin tiukentaa. Rakenteiden kustannusoptimaalinen lämmöneristys oli lähellä määräyksien tasoa, mutta etenkin ilmanvaihdon lämmön talteenoton hyötysuhdetta voi parantaa vaaditusta tasosta aina 80 prosenttiin kustannustehokkaasti. Aurinkokeräinjärjestelmä oli kannattava investointi ainoastaan ilmalämpöpumppujärjestelmässä noin seitsemän neliömetrin keräinalalla. Kustannusoptimaaliset ratkaisut osoittautuivat taloudellisessa herkkyystarkastelussa vakaisiksi, eivätkä ne muuttuneet merkittävästi kuin vasta energiakustannuksiltaan huomattavan korkeissa taloudellisissa ennusteissa. Jos energian hintojen oletetaan nousevan nopeammin kuin 5 % vuodessa, on syytä harkita tuloksissa esitetyjä entistä energiatehokkaampia ratkaisuja.

Ilmalämpöpumppujärjestelmän kannattavuus oli odotuksia parempi ja se herätti osaltaan kysymyksiä mallin ehkä liian ideaalisesta toiminnasta. Tarkasteltaessa järjestelmän toimintaa tuntitasolla lämpöpumpun suorituskyky näytti kuitenkin vastaavan testituloksia, joita se yritti jäljitellä. Tämän lisäksi DBES-ohjelman tuloksissa ei huomattu ongelmia. Simulointiohjelman soveltuvuus optimointiin oli hyvä ja laskenta-ajat pysyivät kohtalaisina.

Geneettisellä algoritmilla suoritettu optimointi toimi odotetusti ja saadut tulokset olivat järkeviä. Laskentaklusteriin pohjautuvaa rinnakkaisajoa voisi harkita optimointiin, sillä käytetty sukupolvien määrä jäi alhaisemmaksi kuin missään muussa tutkimuksessa. Se ei kuitenkaan näkynyt merkittävästi tuloksissa. Tulokset olivat osiltaan yhteneviä aikaisempien tutkimuksien kanssa ja uusina tuloksina saatiin aurinkokeräimien kannattavuus eri lämmitysjärjestelmissä. Myös lämmitysjärjestelmille tehty monitavoiteoptimointi tuloksineen on uutta tutkimusta ainakin siinä mielessä, että vastaavia tutkimuksia ei kirjallisuuskatsauksessa löytynyt. Energiatehokkuuden ja kokonaiskustannusten optimoinnin yhdistäminen osoittautui erittäin käytännölliseksi sen salliessa taloudellisen herkkyystarkastelun suoraan saaduille tuloksille.

LÄHTEET

- Aittomäki, A., Kalema, T., Haapala, T. & Tala, J. (1976-1989). *TASE: Tietokoneohjelma rakennusten lämpötaseen laskemiseksi (In Finnish)*. Otaniemi: Technical Research Center of Finland.
- CEN. (28.9.2007a). EN15255. *Energy performance of buildings. Sensible room cooling load calculation. General criteria and validation procedures*.
- CEN. (28.9.2007b). *Energy performance of buildings. Calculation of energy needs for space heating and cooling using dynamic methods. General criteria and validation procedures*.
- Duffie, J. & Beckman, W. (2006). *Solar engineering of thermal processes*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Earth Energy Designer. (ei pvm). *BuilgindPhysics.com*. Haettu 17.6.2014 osoitteesta <http://www.buildingphysics.com/index-filer/Page1099.htm>
- Energiateollisuus ry. (ei pvm). *energia.fi*. Haettu 4.9.2014 osoitteesta <http://energia.fi/tilastot/kaukolammon-hinnat-tyyppitaloissa-eri-paikkakunnilla>
- Energiavirasto. (ei pvm). *sähkönhintafi.fi*. Haettu 4.9.2014 osoitteesta <http://www.sahkonhintafi.fi/>
- Eskilson, P. (1987). *buldingphysics.com*. Noudettu osoitteesta <http://www.buildingphysics.com/Eskilson1987.pdf>
- Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi energiatehokkuudesta 2012/27/EU*. (2012).
- Haapala, T., Kalema, T. & Tala, J. (1989). *TASE Tietokoneohjelma rakennusten lämpötaseen laskentaan*. Tampere: Tampereen teknillinen korkeakoulu.
- Hasan, A., Vuolle, M. & Siren, K. (2008). Minimisation of life cycle cost of a detached house using combined simulation and optimisation. *Building and environment*, pp. 2022-2034.
- Heat Pump Test Center WPZ*. (ei pvm). Haettu 22.7.2014 osoitteesta Institute for Energy Systems: <http://institute.ntb.ch/ies/competences/heat-pump-test-center-wpz.html?L=1>
- Karjalainen, S., Kärki, S., Salsbury, T. & Tuhkanen, R. (1999). *Rakennusten lämpöteknisen suunnittelun ja ylläpidon simulointityökalun kehityisperusteet*. Espoo: VTT.
- Ljung, L. & Glad, T. (1994). *Modelling of Dynamic Systems*. Prentice Hall. 368 p.
- MathWorks. (2014). *Documentation Center*. Haettu 24. 7. 2014 osoitteesta <http://www.mathworks.se/help/gads/gamultiobj.html>
- Mills, A. F. (1999). *Basic heat and mass transfer, second edition*. Los Angeles: Prentice Hall. 1000 p.
- Mitalas, G. & Arsenault, J. (1972). *Fortran IV program to calcuate z-transfer functions for the colculation of transien heat transfer through walls and roofs*. Ottawa: National Research Council of Canada.
- Onninen Oy. (1.7.2012). LVI-tuotteet, Hinnasto.

- Ooka, R. (2009). Optimal design method for building energy systems using genetic algorithms. *Energy and Environment*, pp. 1538-1544.
- Palonen, M., Hasan, A. & Siren, K. (2009). A genetic algorithm for optimization of building envelope and HVAC system parameters. *Eleventh International IBPSA Conference*. Glasgow, Scotland.
- Rakennusten Lämmitysjärjestelmät. Järjestelmien energiavaatimusten ja järjestelmätehokkuuden laskenta. Osa 4-2: Lämmöntuottojärjestelmät. Lämpöpumppujärjestelmät. (26.1.2009). Suomen Standardisoimisliitto SFS.
- Sivanadam, S.N. & Deepa S.N. (2008). *Introduction to Genetic Algorithms*. Springer. p.442
- Scanoffice, VTT. (2010 - 2013). Haettu 22.7.2014 osoitteesta
Ilmalämpöpumppuverailu: <http://www.scanoffice.fi/fi/tietoa-laempoepumpuista/vtt-n-testiraportit/>
- Solar Rating & Certification Corporation. (ei pvm). Haettu 17.6.2014 osoitteesta <http://www.solar-rating.org/index.html>
- Spitler, J. D. & Yavuzturk, C. (1999). A short time step response factor model for vertical ground loop heat exchangers. *ASHRAE Transactions*. 105(2), pp. 475-485.
- Swedish Energy Agency. (ei pvm). *energimyndigheten.se*. Haettu 12.6.2014 osoitteesta <http://www.energimyndigheten.se/Hushall/Testerresultat/Testresultat/Luftluftvarmepumpar-2013-2009/?tab=2>
- Taloon Yhtiöt Oy. (2014). Haettu 30.7.2014 osoitteesta Taloon.com: www.taloon.com
- Tuhus-Dubrow, D. & Krarti, M. (2010). Genetic-algorithm based approach to optimize building envelope design for residential buildings. *Building and Environment*, pp. 1574-1581.
- Työ- ja elinkeinoministeriö. (9.6.2009). Energiatehokkuustoimikunnan mietintö: Ehdotus energiasäästön ja energiatehokkuuden toimenpiteiksi. Helsinki, Suomi.
- Wang, W., Zmeureanu, R. & Rivard, H. (2005). Applying multi-objective genetic algorithms in green building design optimization. *Building and Environment*, Volume 40, Issue 11, pp. 1512-1525.
- Viot, M. & Hilpinen, J. (2014). *DBES Results*. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto.
- WPZ, Heat Pump Test Center. (ei pvm). Haettu 11.6.2014 osoitteesta <http://institute.ntb.ch/ies/competences/heat-pump-test-center-wpz/test-results.html?L=1>
- Wright, J. A. (2002). Optimization of building thermal design and control by multi-criterion genetic algorithm. *Energy and Buildings*, pp. 959-972.
- Ympäristöministeriö. (2012a). *Energiatehokkuutta koskevien vähimmäisvaatimusten kustannusoptimaalisten tasojen laskenta*.
- Ympäristöministeriö. (30.3.2012b). D3 Suomen rakennusmääräyskokoelma. *Rakennusten energiatehokkuus*. Helsinki.
- Ympäristöministeriö, Asunto- ja rakennusosasto. (17.4.2013). Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta. Helsinki, Suomi.

LIITE 1: TULOKSET: SUUNNITTELUUUTTUJIIEN ARVOT PARETO-OPTIMAALISISSA RATKAISUISSA

Maalämpöpumppu aurinkokeräimellä									
U-arvot [W/m ² K]				Ilma- vuoto- luku q ₅₀ [m ³ /m ² h]	LTO hyöty- suhde [%]	Aurinko- keräin ala [m ²]	Patte- reiden pituus- kerroin	E-luku [kWh/ m ²]	kokonais kustan- nukset [€/m ²]
Ulko- seinät	Ylä- pohja	Ala- pohja	Ikku- nat						
0.09	0.06	0.10	0.50	0.63	80	7.83	1.74	78	826
0.09	0.06	0.10	0.54	0.63	80	7.82	1.75	79	821
0.10	0.06	0.10	0.50	0.62	80	7.83	1.80	79	806
0.10	0.06	0.10	0.56	0.64	80	7.81	1.75	79	800
0.11	0.06	0.10	0.50	0.61	80	7.83	1.80	79	787
0.11	0.06	0.10	0.56	0.66	80	7.76	1.86	79	780
0.12	0.06	0.10	0.51	0.62	80	7.82	1.81	79	767
0.12	0.06	0.10	0.57	0.65	80	7.75	1.86	80	760
0.13	0.06	0.10	0.51	0.67	80	7.82	1.82	80	746
0.15	0.06	0.10	0.51	0.64	80	7.83	1.80	80	744
0.13	0.06	0.11	0.60	0.62	80	7.77	1.82	81	733
0.13	0.06	0.11	0.65	0.65	80	7.69	1.78	81	729
0.13	0.06	0.14	0.58	0.69	80	7.80	1.82	82	723
0.13	0.06	0.12	0.74	0.73	80	7.26	1.79	82	719
0.14	0.07	0.13	0.63	0.66	80	7.06	1.92	83	715
0.14	0.07	0.13	0.76	0.66	80	7.74	1.82	84	709
0.13	0.07	0.14	0.77	0.82	80	7.26	1.79	84	707
0.15	0.07	0.13	0.93	0.85	80	6.87	1.91	86	699
0.15	0.08	0.15	0.85	0.78	80	6.20	1.92	87	693
0.15	0.08	0.15	0.92	1.07	80	6.67	1.84	88	691
0.15	0.08	0.15	0.90	1.82	80	7.17	1.94	89	689
0.16	0.08	0.15	0.88	1.59	80	6.13	1.83	90	688
0.16	0.08	0.16	0.91	1.54	80	6.36	1.97	90	685
0.17	0.08	0.16	0.96	1.60	80	5.24	1.96	92	681
0.17	0.08	0.16	0.99	1.96	80	4.85	1.99	93	678

Maalämpöpumppu, ei aurinkokeräintä									
U-arvot [W/m ² K]				Ilma- vuoto- luku q ₅₀ [m ³ /m ² h]	LTO hyöty- suhde [%]	Aurinko- keräin- ala [m ²]	Patte- reiden pituus- kerroin	E-luku [kWh/ m ²]	Kokonais kustan- nukset [€/m ²]
Ulko- seinät	Ylä- pohja	Ala- pohja	Ikku- nat						
0.15	0.06	0.14	0.88	0.68	80	-	1.88	95	677
0.16	0.07	0.13	0.88	0.82	80	-	1.89	96	674
0.15	0.07	0.15	0.86	0.93	80	-	1.89	97	672
0.13	0.08	0.15	0.90	1.40	80	-	1.98	97	668
0.13	0.08	0.16	1.00	1.39	80	-	1.97	99	664
0.15	0.08	0.16	0.99	1.57	80	-	1.97	100	661
0.17	0.08	0.16	1.00	1.39	80	-	1.97	101	659
0.17	0.08	0.16	0.94	2.04	80	-	1.93	102	659
0.17	0.08	0.16	1.00	2.04	80	-	1.99	102	657
0.17	0.08	0.16	1.00	2.04	80	-	1.99	102	657

Ilmalämpöpumppu aurinkokeräimellä								
U-arvot [W/m ² K]				Ilma- vuoto- luku q ₅₀ [m ³ /m ² h]	LTO hyöty- suhde [%]	Aurinko- keräinala [m ²]	E-luku [kWh/ m ²]	Kokonais- kustannuk- set [€/m ²]
Ulko- seinät	Ylä- pohja	Ala- pohja	Ikku- nat					
0.08	0.06	0.11	0.51	0.73	80	7.89	100	748
0.08	0.06	0.11	0.51	0.85	80	7.76	100	747
0.09	0.06	0.11	0.52	0.71	80	7.96	100	728
0.09	0.06	0.11	0.57	0.66	80	7.83	100	723
0.10	0.06	0.11	0.52	0.62	80	7.85	100	708
0.10	0.06	0.11	0.57	0.64	80	7.91	101	703
0.10	0.06	0.11	0.58	0.64	80	7.87	101	703
0.11	0.06	0.11	0.52	0.73	80	7.98	101	689
0.11	0.06	0.11	0.58	0.62	80	7.78	102	683
0.12	0.06	0.11	0.51	0.70	80	7.85	102	670
0.12	0.06	0.11	0.62	0.63	80	7.88	102	661
0.13	0.06	0.11	0.52	0.70	80	7.74	102	650
0.13	0.06	0.11	0.55	0.70	80	7.87	102	647
0.13	0.06	0.12	0.58	0.71	80	7.77	104	640
0.13	0.06	0.12	0.78	0.74	80	7.81	105	628
0.13	0.06	0.12	0.82	0.82	80	7.74	106	626
0.13	0.06	0.13	0.78	0.75	80	7.65	106	624
0.13	0.06	0.13	0.84	0.84	80	7.80	106	621
0.13	0.07	0.13	0.80	0.83	80	7.57	107	619
0.13	0.07	0.15	0.74	0.73	80	7.78	108	618
0.13	0.07	0.13	0.88	0.99	80	7.62	108	616
0.13	0.07	0.15	0.89	0.72	80	7.80	109	613
0.13	0.07	0.15	0.93	0.92	80	7.61	109	611
0.14	0.07	0.14	0.95	1.10	80	7.53	110	610
0.15	0.07	0.15	0.97	0.88	80	7.55	111	607
0.15	0.08	0.14	0.93	1.33	80	7.55	112	605
0.14	0.08	0.16	0.97	1.21	80	7.36	113	602
0.16	0.08	0.16	0.97	1.54	80	7.23	115	599
0.16	0.08	0.16	0.98	2.02	80	7.63	116	597
0.16	0.08	0.16	0.98	2.02	80	7.13	117	597
0.16	0.08	0.16	0.99	2.67	80	7.10	118	597
0.16	0.08	0.16	0.99	2.86	80	7.05	119	597
0.16	0.08	0.16	0.99	3.36	80	7.05	120	597
0.16	0.08	0.16	0.99	3.86	80	7.05	122	597
0.16	0.08	0.16	0.99	3.86	80	7.05	122	597

Kaukolämpöjärjestelmä aurinkokeräimellä									
U-arvot [W/m ² K]				Ilma- vuoto- luku q ₅₀ [m ³ /m ² h]	LTO hyöty- suhde [%]	Aurinko- keräinala [m ²]	Patte- reiden pituus- kerroin	E-luku [kWh/ m ²]	Kokonais kustan- nukset [€/m ²]
Ulko- seinät	Ylä- pohja	Ala- pohja	Ikku- nat						
0.10	0.05	0.12	0.58	0.89	78	7.36	1.53	86	784
0.11	0.05	0.12	0.58	0.94	78	7.23	1.51	87	765
0.12	0.05	0.12	0.55	0.92	78	7.04	1.62	87	748
0.13	0.06	0.12	0.53	0.79	79	7.57	1.72	87	729
0.13	0.06	0.12	0.56	1.12	78	7.97	1.56	89	725
0.13	0.06	0.13	0.62	0.82	79	7.53	1.77	89	716
0.13	0.06	0.13	0.65	0.70	79	7.07	1.99	89	715
0.13	0.07	0.13	0.71	0.72	79	7.07	1.60	91	709
0.14	0.07	0.13	0.79	0.82	79	6.65	1.77	93	703
0.14	0.07	0.13	0.84	1.06	79	7.19	1.68	93	702
0.14	0.08	0.14	0.79	0.61	79	6.85	1.99	94	699
0.14	0.08	0.14	0.79	0.61	79	6.85	1.99	94	699
0.15	0.08	0.14	0.92	0.99	79	6.05	1.73	97	692
0.13	0.08	0.15	0.91	1.71	79	5.74	1.71	98	691
0.15	0.08	0.15	0.93	0.73	79	4.57	1.90	99	691
0.15	0.08	0.14	0.96	1.76	78	6.45	1.36	99	690
0.15	0.08	0.15	0.97	1.55	78	6.08	1.53	99	688
0.15	0.08	0.15	0.98	2.24	78	6.95	1.50	100	688
0.15	0.08	0.15	0.97	2.00	78	5.46	1.58	101	687
0.16	0.08	0.15	0.99	1.84	78	4.94	1.55	102	686

Kaukolämpöjärjestelmä, ei aurinkoke- räintä									
U-arvot [W/m ² K]				Ilma- vuoto- luku q ₅₀ [m ³ /m ² h]	LTO hyöty- suhde [%]	Aurinko- keräin- ala [m ²]	Patte- reiden pituus- kerroin	E-luku [kWh/ m ²]	Kokonais kustan- nukset [€/m ²]
Ulko- seinät	Ylä- pohja	Ala- pohja	Ik- ku- nat						
0.13	0.06	0.14	0.77	0.97	78	-	1.13	105	684
0.14	0.06	0.13	0.91	1.21	78	-	1.28	106	679
0.14	0.07	0.14	0.86	0.74	78	-	1.89	106	677
0.14	0.07	0.14	0.90	0.69	77	-	1.55	107	677
0.14	0.07	0.14	0.92	1.47	77	-	1.24	109	674
0.15	0.08	0.13	0.99	1.98	78	-	1.42	111	668
0.16	0.08	0.14	0.99	1.36	78	-	1.50	111	668
0.16	0.08	0.15	0.99	1.33	78	-	1.51	112	666

LIITE 2: VARAAJAN KONVEKTION MALLINNUSTULOKSET