



Aalto University
School of Engineering

COMBI

Kustannusoptimaaliset suunnitteluratkaisut uusissa ja vanhoissa palvelurakennuksissa

Paula Sankelo, Juha Jokisalo
Aalto-yliopisto
Konetekniikan laitos
25.1.2018

Vipuvoimaa
EU:lta
2014–2020



Tavoite

- Määrittää kustannusoptimaalisia suunnitteluratkaisuja:
 - uudelle
 - korjausvaiheessa
- olevalle palvelurakennukselle
kiinteistön omistajan näkökulmasta

Monitavoiteoptimoinnin toteutus

- Rakennuksen ja järjestelmien simulointi: IDA-ICE



- Optimointi:
 - MOBO (Multi Objective Building Optimization)
 - Käytössä geneettinen algoritmi: NSGA-II
 - Saatavilla ilmaiseksi: <http://ibpsa-nordic.org/tools.html>

Kustannusoptimaaliset ratkaisut kiinteistön omistajan näkökulmasta?

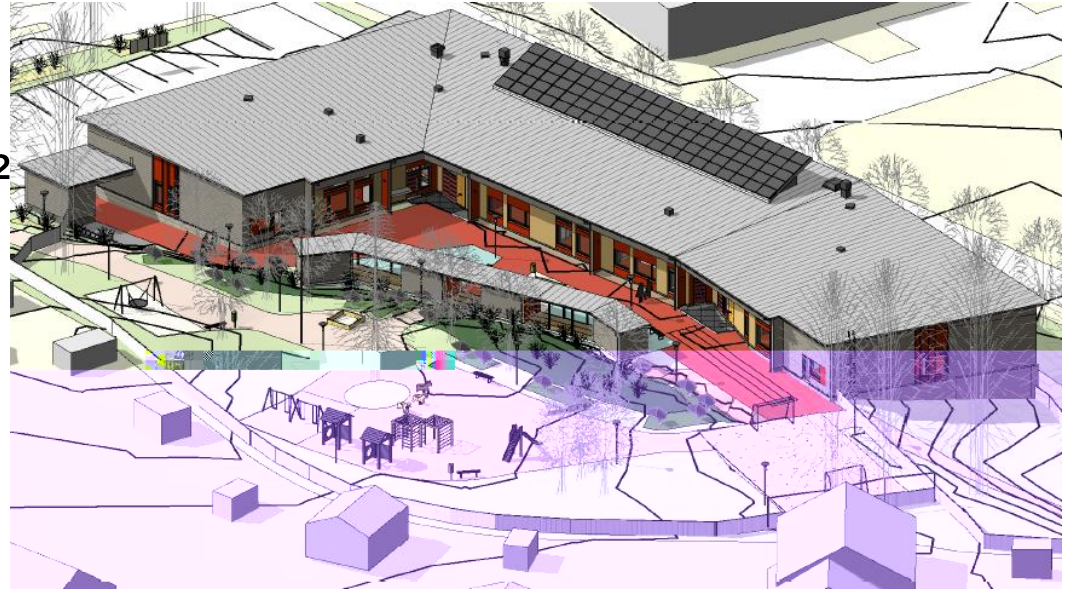
- *Minimoitavat tavoitefunktiot:*

- **Tavoite-energiankulutus:**
 - Vuotuinen ostoenergiankulutus (sähkö + lämpö) mahdollisimman todenmukaisella käytöllä
 - Rakennuksessa käytetty osuus paikan päällä tuotetusta aurinkosähköstä ja -lämmöstä vähentää tavoite-energiankulutusta

- **Elinkaarikustannukset:**
 - Tarkastelujakso 20v.
 - Reaalinen laskentakorko 3%
 - Energian hintakehitys 2%
 - Energian hinnat kohteiden todellisia hintoja
 - Investointikustannukset yrityksiltä sekä tutkimuksista

Luhtaan päiväkoti

- Valmistunut 2012
- Noin 140 lasta
- Lämmitetty nettoala 1438m²
- U-arvot, W/m²K
 - US: 0.09
 - YP: 0.06
 - AP: 0.07
 - Ikkunat: 0.66
- Nykyinen lämmitystapa: kaukolämpö
- Lämmönjako: vesik. lattialämmitys / IV-lämmitys / vesirad.
- IV: Kon. tulo- ja poisto (LTO LT-hyötysuhde 60-80%)
- Mitattu ilmavuotoluku $n_{50} = 0.34$ 1/h

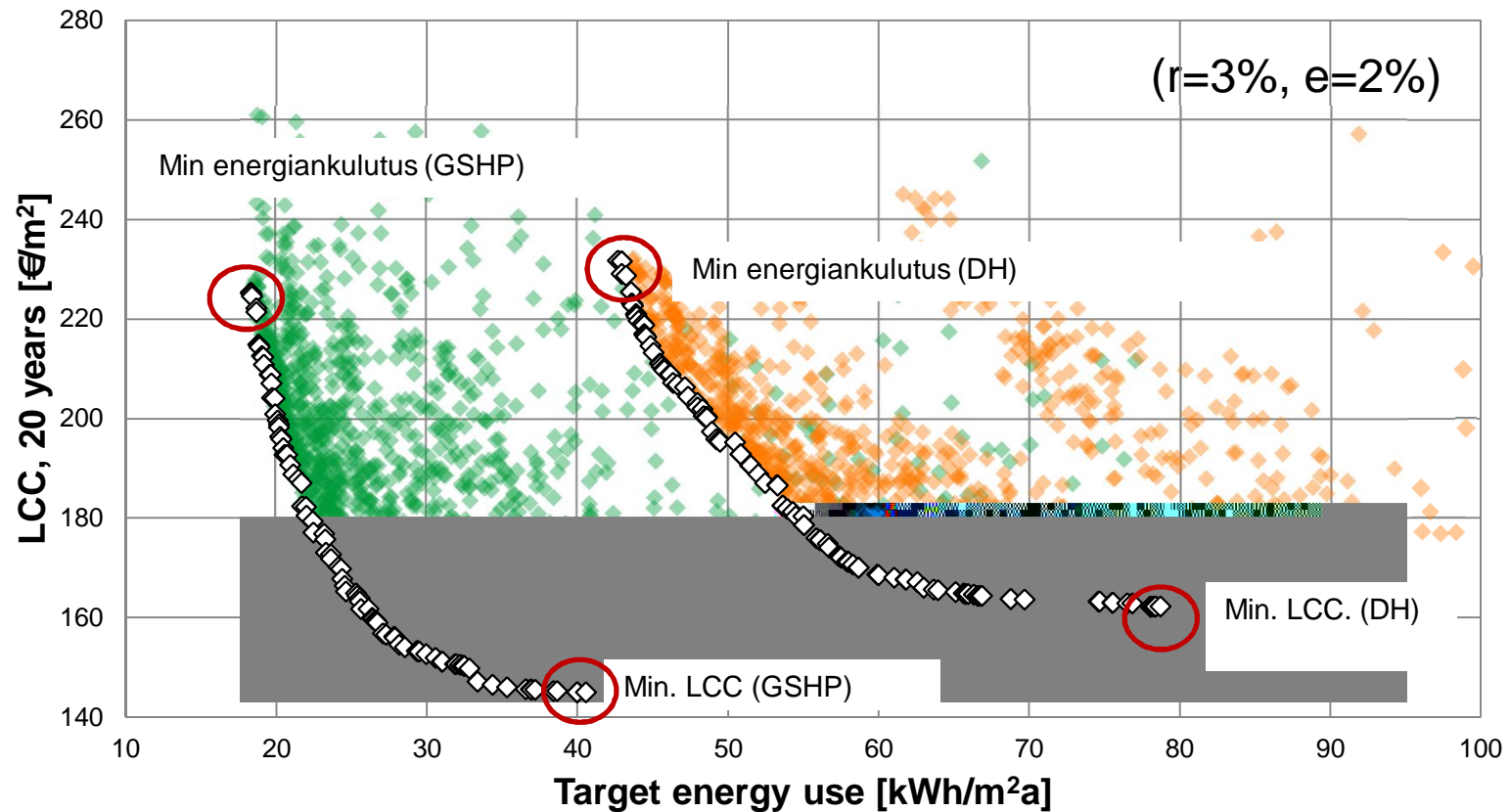


Luhtaa: optimoitavia ratkaisuja

Vaihtoehtoja	Pienin investointikustannus	Suurin investointikustannus	Muuttujantyyppi ja tutkitut vaihtoehdot
Lämmitysjärjestelmä	Kaukolämpö	MLP+ apulämmitys sähköllä	Diskreetti
MLP:n mitoitus-teho	1kW	72kW	Jatkuva, (pienin muutos 1kW)
Ulkoseinien lämmöneristys	U-arvo 0.17 W/m ² K	U-arvo 0.08 W/m ² K	Diskreetti (U-arvo: 0.17, 0.14 tai 0.08 W/m ² K)
Yläpohjan lämmöneristys	U-arvo 0.09 W/m ² K	U-arvo 0.07 W/m ² K	Diskreetti (vain 2 vaihtoehtoa)
Alapohjan lämmöneristys	U-arvo 0.16 W/m ² K	U-arvo 0.10 W/m ² K	Diskreetti (vain 2 vaihtoehtoa)
Ikkunavaihtoehdot	U-arvo 1.0 W/m ² K	U-arvo 0.5 W/m ² K	Diskreetti (U-arvo: 1.0, 0.9, 0.8, 0.7, 0.6 tai 0.5 W/m ² K)
Ilmanvaihdon CO ₂ -ohjaus	Ei	Kyllä	Diskreetti
Ilmanvaihdon LTO:n lämpötilasuhde (-)	0.6	0.80	Diskreetti
LTO WC tilojen erillispoistoissa	Ei	Kyllä	Diskreetti
Valaistuksen ohjaus	Ei automatiikkaa	Läsnäolo-, päivänvalo- ja vakiovalo-ohjaus	Diskreetti (Ohjaus: ei/kyllä)
Aurinkosähköpaneelien (PV) ala	1.6 m ²	600 m ²	Jatkuva, (pienin muutos 1.6 m ²)
Aurinkolämpökeräinten (ST) ala	0 m ² (I-VLP) / 6 m ² (KL)	24 m ²	Jatkuva, (pienin muutos 6 m ²)

à Vaihtoehtoja kaikkiaan 157×10^6

Luhtaa: optimointitulokset



- ◆ All solutions, GSHP (Maalämpöpumppu)
- ◆ All solutions, DH (Kaukolämpö)
- ◇ Optimal solutions

Luhtaan kustannusoptimaalisia ratkaisuja (Maalämpöpumppu)

Tavoite-energiankulutus [kWh/m ² a]	LCC [€/m ²]	PV-ala [m ²]	Aurinkolämpöpökeräinten ala [m ²]	MLP:n mitoitus [kW] * osuus max. tehontarpeesta	Ulkoseinä U-arvo [W/m ² K]	Yläpohja U-arvo [W/m ² K]	Alapohja U-arvo [W/m ² K]	Ikkunat U-arvo [W/m ² K]	LTO:n lämpötilasuhde, pääkoneet	Erilliskoistojen LTO (K/E)
Pienin elinkaarikustannus										
41	145	18	6	18 (25%)	0,17	0,09	0,16	0,9	0,6	K
Pienin elinkaarikustannus, kun tavoite-energiankulutus ≤ 30 kWh/m²a,										
30	153	168	6	15 (21%)	0,17	0,09	0,16	0,9	0,8	K
Pienin elinkaarikustannus, kun tavoite-energiankulutus ≤ 20 kWh/m²a,										
20	201	584	18	22 (31%)	0,14	0,09	0,10	0,6	0,8	K
Pienin tavoite-energiankulutus										
18	225	594	24	21 (29%)	0,08	0,07	0,10	0,6	0,8	K

- Kaikissa e.m. ratkaisuissa mukana myös ilmanvaihdon tarpeenmukainen CO₂-ohjaus

Luhtaan kustannusoptimaalisia ratkaisuja (kaukolämpö)

Tavoite-energiankulutus [kWh/m ² a]	LCC [€/m ²]	PV-ala [m ²]	Aurinkolämpöpökeräinteen ala [m ²]	MLP:n mitoitus [kW]	Ulkoseinä U-arvo [W/m ² K]	Yläpohja U-arvo [W/m ² K]	Alapohja U-arvo [W/m ² K]	Ikkunat U-arvo [W/m ² K]	LTO:n lämpötilasuhte, pääkoneet	Erillispoistojen LTO (K/E)
Pienin elinkaarikustannus										
79	162	23	6	N/A	0,17	0,09	0,16	0,8	0,6	K
Pienin elinkaarikustannus, kun tavoite-energiankulutus ≤ 60 kWh/m²a										
60	169	112	24	N/A	0,17	0,09	0,16	0,8	0,8	K
Pienin tavoite-energiankulutus, kun tavoite-energiankulutus ≤ 50 kWh/m²a										
49	195	311	24	N/A	0,08	0,09	0,16	0,6	0,8	K
Pienin tavoite-energiankulutus										
43	232	586	24	N/A	0,08	0,07	0,10	0,5	0,8	K

- Kaikissa e.m. ratkaisuissa mukana myös ilmanvaihdon tarpeenmukainen CO₂-ohjaus

Koukkuniemen vanhainkodin Jukola-talo



Kuva: Paula Sankelo

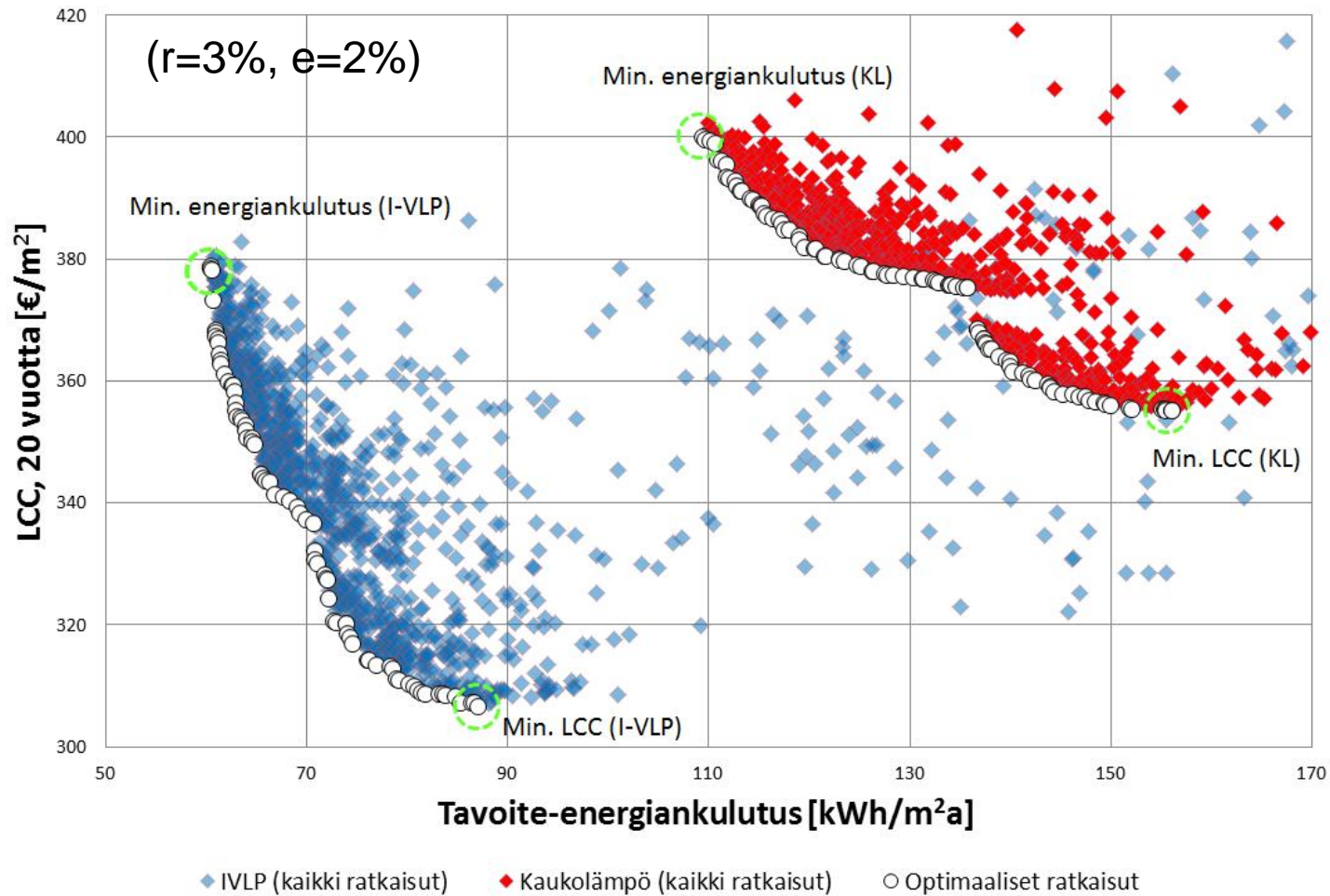
- Valmistunut 1955, peruskorjattu 2011–2013
- Lämmitetty nettoala 4709m², noin 70 asukasta
- Optimoinnin lähtökohta peruskorjausta edeltävä tilanne:
 - U-arvot, W/m²K
 - US: 0.7
 - YP: 1.2
 - AP: 0.36
 - Ikkunat: 2.9
 - Arvioitu ilmavuotoluku
 $n_{50} \sim 6.0$ 1/h
 - Kon. poisto IV, ei LTO:ta
 - Ilmanvaihdon tulo- ja poistoilmavirrat (5 m³/s) kuitenkin nykyisellä tasolla kaikissa ratkaisuissa

Jukola: optimoitavia ratkaisuja

Vaihtoehtoja	Pienin investointikustannus	Suurin investointikustannus	Muuttujantyyppi ja tutkitut vaihtoehdot
Lämmitysjärjestelmä	Kaukolämpö	I-VLP+ apulämmitys sähköllä	Diskreetti
I-VLP:n mitoitus-teho	1kW	202kW	Jatkuva, (pienin muutos 1kW)
Ulkoseinien korjaus	Kunnostus, eristystä ei paranneta, (U-arvo 0.7 W/m ² K)	+200 mm lisäeristys, (U-arvo 0.17 W/m ² K)	Diskreetti (lisäeristyspaksuus: 0, +50, +100, +150 tai +200 mm)
Yläpohjan korjaus	Ei korjausta, (U-arvo 1.2 W/m ² K)	+500 mm lisäeristys (U-arvo 0.08 W/m ² ,K)	Diskreetti (lisäeristyspaksuus: 0, +50, +100, +200, +300, +400 tai +500 mm)
Ikkunoiden korjaus tai vaihto	Kunnostus, ikkunoita ei vaihdeta, (U-arvo 2.9 W/m ² K)	Uudet ikkunat, (U=0.5 W/m ² K)	Diskreetti (U-arvo: 2.9, 1.0, 0.9, 0.8, 0.7, 0.6 tai 0.5 W/m ² K)
Ilmanvaihdon LTO:n lämpötilasuhde (-)	0	0.72	Diskreetti
Valaistuksen ohjaus	Ei automatiikkaa	Läsnäolo-, päivänvalo- ja vakiovalo-ohjaus käytävillä ja yhteisissä oleskelutiloissa	Diskreetti (Ohjaus: ei/kyllä)
Aurinkosähköpaneelien (PV) ala	1.6 m ²	1000 m ²	Jatkuva, (pienin muutos 1.6 m ²)
Aurinkolämpökeräinten (ST) ala	0 m ² (I-VLP) / 6 m ² (KL)	120 m ²	Jatkuva, (pienin muutos 6 m ²)

à Vaihtoehtoja kaikkiaan 2.6×10^9

Jukola: optimointitulokset



Jukolan kustannusoptimaalisia ratkaisuja (ilma-vesi lämpöpumppu)

Tavoite-energiankulutus (kWh/m ² a)	LCC (€m ²)	Ulkoseinät, U-arvo (W/m ² K)	Yläpohja, U-arvo (W/m ² K)	Ikkunat U-arvo (W/m ² K)	I-VLP Mitoitus-teho (kW) * osuus max. tehontarpeesta	IV:n lto	Valaistuksen ohjaus	PV-ala (m ²)	ST-ala [m ²]
Pienin LCC (globaali minimi)									
87	307	0.70	0.13	0.8	101 (47%)*	0.72	Kyllä	320	6
Pienin LCC tavoite-energiankulutuksen ollessa ≤ 80 kWh/m²a									
80	310	0.70	0.10	0.5	124(57%)*	0.72	Kyllä	492	8
Pienin LCC tavoite-energiankulutuksen ollessa ≤ 70 kWh/m²a									
70	337	0.39	0.08	0.5	99 (46%)*	0.72	Kyllä	844	6
Pienin tavoite-energiankulutus (globaali minimi)									
60	379	0.17	0.08	0.5	175 (81%)*	0.72	Kyllä	993	118

Jukolan kustannusoptimaalisia ratkaisuja (kaukolämpö)

Tavoite-energian- kulutus (kWh/m ² a)	LCC (€/m ²)	Ulkoseinä U-arvo (W/m ² K)	Yläpohja U-arvo (W/m ² K)	Ikkunat U-arvo (W/m ² K)	IV:n lto	Valais- tuksen ohjaus (ol.tilat)	Valais- tuksen ohjaus (käytäv- ät)	PV- ala (m ²)	ST-ala [m ²]
Pienin LCC									
156	355	0.7	0.13	0.8	0.72	Kyllä	Kyllä	275	22
Pienin LCC tavoite-energiankulutuksen ollessa ≤ 150 kWh/m²a									
150	356	0.7	0.08	0.8	0.72	Kyllä	Kyllä	274	64
Pienin LCC tavoite-energiankulutuksen ollessa ≤ 140 kWh/m²a									
140	362	0.7	0.08	0.8	0.72	Ei	Kyllä	602	117
Pienin LCC tavoite-energiankulutuksen ollessa ≤ 130 kWh/m²a									
130	377	0.39	0.1	0.8	0.72	Kyllä	Kyllä	368	89
Pienin LCC tavoite-energiankulutuksen ollessa ≤ 120 kWh/m²a									
120	382	0.27	0.13	0.8	0.72	Kyllä	Kyllä	497	117
Pienin tavoite-energiankulutus									
109	400	0.17	0.08	0.5	0.72	Kyllä	Kyllä	865	120

Yhteenveto (uudiskohde: Luhtaa)

- Maalämpöpumppu olisi kiinteistön omistajan näkökulmasta kustannustehokkaampi lämmitystapa kuin kaukolämpö
- Rakennuksen vaipan lämmöneristäminen ”passiivitasoon” asti ei ole kustannustehokkain tapa pienentää rakennuksen energiankulutusta.
- Suositeltavia investointeja kaikissa kustannusoptimaalisissa ratkaisuissa riippumatta tavoiteltavasta energiankulutustasosta ovat:
 - Aurinkosähkö- ja -lämpöjärjestelmien asentaminen
 - Ilmanvaihdon tarpeenmukainen CO₂-ohjaus ja erillispoistojen LTO
 - Valaistuksen läsnäolo-, päivänvalo-, ja vakiovalo-ohjauksen asentaminen
 - Energiatehokkaiden ikkunoiden asentaminen
- Kun kohteen energiankulutusta pyritään pienentämään, kustannustehokkainta olisi ensiksi parantaa ilmanvaihdon lämmön talteenottoa ja lisätä omaa aurinkosähkön ja -lämmön tuotantoa ja vasta sitten parantaa vaipan lämmöneristystasoa

Yhteenveto (saneerauskohde: Jukola)

- Ilma-vesilämpöpumppu olisi kiinteistön omistajan näkökulmasta kustannustehokkaampi lämmitystapa kuin kaukolämpö
- Ulkoseinien lisälämmöneristäminen ei ole tutkituista vaihtoehtoista kustannustehokkain tapa parantaa kohteen energiatehokkuutta
- Suositeltavia investointeja kaikissa kustannusoptimaalisissa ratkaisuissa riippumatta tavoiteltavasta energiankulutustasosta ovat:
 - Aurinkosähkö- ja –lämpöjärjestelmien asentaminen.
 - Yläpohjan lisälämmöneristäminen
 - Uusien energiatehokkaampien ikkunoiden asentaminen
 - Lämmöntalteenotolla varustetun koneellisen tulo- ja poisto IV-järjestelmän asentaminen kon. poisto IV-järjestelmän tilalle.
 - Valaistuksen läsnäolo-, päivänvalo-, ja vakiovalo-ohjauksen asentaminen.