

Energiaoptimointiraportti

Virtanen Yhtiöt, Rasion kauppakeskus



GRANLUND CONSULTING OY
MALMINKAARI 21
00701 HELSINKI

PUHELIN 010 759 2000
ETUNIMI.SUKUNIMI@GRANLUND.FI
WWW.GRANLUND.FI

Y-TUNNUS 2654080-6
KOTIPAikka HELSINKI

Kohde	Virtanen Yhtiöt, Raision kauppakeskus
Työnumero	CH201352
Raportin päiväys	28.8.2020
Viimeisin muutos	28.8.2020
Tekijät	Granlund Consulting Oy Niklas Söderholm Tuomo Niemelä Essi Kuikka Timo Karvinen

Tiivistelmä

Työssä tutkittiin Virtanen yhtiöt Raision kauppakeskus -uudisrakennuksen rakenne- ja LVI-tekniisiä ratkaisuja energia- ja kustannustehokkuuden näkökulmasta. Työ toteutettiin monitavoiteoptimoinnilla, jossa minimoitiin samanaikaisesti rakennuksen ostoenergiankulutusta (sähkö ja kaukolämpö) sekä 20 vuoden elinkaarikustannuksia. Työn tuloksien avulla saadaan tietoa kannattavista energiatehokkuustoimenpiteistä, joita kannattaa toteuttaa rakennuksessa perustuen siihen, halutaanko painottaa matalaa elinkaarikustannusta, investointia vai ostoenergiankulutusta.

Optimoinnissa tutkittiin seuraavia rakennuksen energiankulutukseen vaikuttavia ratkaisuvaihtoehtoja:

- ulkoseinien eristystaso
- yläpohjan eristystaso
- alapohjan eristystaso
- aurinkosähköjärjestelmän mitoitus
- lauhdelämpöpumppujärjestelmän mitoitus
- jäähdytyksen tuottaminen joko vedenjäähdytyskoneella tai lämpöpumpulla
- energiakaivojen tai energiapaalujen asentaminen lauhdelämpöpumppujärjestelmän yhteyteen
- ilma-vesilämpöpumppujen asentaminen lauhdelämpöpumppujärjestelmän yhteyteen
- hukkalämmön täysi varastointi geoenergiakenttään tai vaihtoehtoisesti osittainen myynti kaukolämpöverkkoon ja osittainen varastointi geoenergiakenttään
 - hukkalämmön varastoinnin yhteydessä selvitettiin lisäksi geoenergiakentän mitoitusta ja hukkalämmön myynnin kannattavia toteutustapoja

Monitavoiteoptimointitarkastelulla määritetyssä suositeltavassa ratkaisussa edellä mainitut ratkaisuvaihtoehdot saivat alla esitetyt arvot. Suositeltavalla ratkaisulla saavutetaan alhaisimmat elinkaarikustannukset, matala ostoenergiankulutus ja matalat käyttökustannukset.

Suosittelava energiaratkaisukonsepti sisältää seuraavat toimenpiteet:

- ulkoseinien U-arvo on 0,22 W/m²K
- yläpohjan U-arvo on 0,18 W/m²K
- alapohjan U-arvo on 0,32 W/m²K
- aurinkosähköpaneelija asennetaan maksimimäärä 4 600 m² ja rakennuksessa hyödyntämätön aurinkosähkö myydään sähköverkkoon
- kiinteistöön asennetaan lauhdelämpöpumppujärjestelmä, jonka nimellisteho on 200 kW
- kiinteistöjäähdytys tehdään sekä lauhdelämpöpumppujärjestelmällä että vedenjäähdytyskoneella, jonka teho on 350 kW
- hukkalämmön myynti kaukolämpöverkkoon on kannattavaa, jos hukkalämmön hinnoitteluperuste on lähellä Fortumin pääkaupunkiseudun hintatasoa
 - hukkalämpöä on suositeltava myydä kaukolämpöverkkoon lämpöpumpulla, joka pystyy tuottamaan korkeita lämpötiloja, noin 75 °C. Suositeltavassa ratkaisussa korkean lämpötilan lämpöpumppu tuottaa kiinteistöjäähdytystä ja syntyvää lauhdetta myydään korkeassa lämpötilatasossa kaukolämpöverkkoon
 - osa kaupan kylmän lauhteesta on suositeltavaa myydä CO₂ -kylmäkoneikon lämmönsiirtimen kautta
- kiinteistössä hyödynnetään energiapaaluihin pohjautuvaa geoenergiajärjestelmää, jos rakennus perustetaan joka tapauksessa paalujen varaan.
 - tarvittava energiapaalujen määrä on noin 400 kpl, jos hukkalämpöä ei päätetä myydä kaukolämpöverkkoon. Toteutusratkaisussa rakennuksessa hyödyntämätön kaupan kylmän lauhte siirretään kokonaisuudessaan geoenergiakenttään.
 - tarvittava energiapaalujen määrä on noin 160 kpl, jos hukkalämpöä myydään kaukolämpöverkkoon. Toteutusratkaisussa osa kaupan kylmän lauhteesta siirretään geoenergiakenttään, jotta varmistetaan geoenergiakentän riittävä lämpötilataso ja siten rakennuksen energiatehokkuus.
- rakennuksen lisälämmönlähteeksi valitaan sähkökattila, jos hukkalämpöä ei päätetä myydä kaukolämpöverkkoon. Hukkalämmön myynnin yhteydessä liitetään paikalliseen kaukolämpöverkkoon.

Suosittelavaa ratkaisua verrattiin tarkasteluissa sellaiseen referenssiratkaisuun, jossa ulkovaipparakenteet ovat voimassa olevien rakentamismääräysten vertailuarvojen mukaiset. Referenssiratkaisussa hyödynnetään kaupan kylmän lauhte suoraan kylmäkoneikon lämmönsiirtimistä ja ratkaisuun sisältyy 2200 m² kokoinen aurinkosähköjärjestelmä. Aurinkopaneelien mitoitusperusteena referenssiratkaisussa on, että kaikki aurinkosähkö voidaan hyödyntää rakennuksen sähköverkossa. Energiaoptimointitarkastelun perusteella suositeltavalla ratkaisulla (Ratkaisu 1, kun hukkalämpöä ei myydä kaukolämpöverkkoon) on tähän referenssiratkaisuun nähden:

Ratkaisu 1, kun hukkalämpöä ei myydä kaukolämpöverkkoon

- 1,5 miljoonaa euroa pienempi elinkaarikustannusten nettonykyarvo
- 140 000 € suuremmat investointikustannukset
- 77 kWh/m² pienempi ostoenergian kulutus
- 54,1 kWh/m² pienempi kaukolämmön kulutus
- 22,2 kWh/m² pienempi sähköenergian kulutus
- alle kahden vuoden takaisinmaksuaika.

Ratkaisu 2, kun hukkalämpöä myydään kaukolämpöverkkoon:

- Hukkalämmön myynnin kannattavuutta tutkittiin erillistarkasteluilla (raportin kappale 3.3), joiden perusteella myynnin todettiin olevan kannattavaa, jos hukkalämmöstä saadaan kilpailukykyinen korvaus. Tarkastelluista hinnoittelumalleista, Fortumin pääkaupunkiseudun hukkalämmön hinnoittelu tarjoaa kilpailukykyisen vaihtoehdon edellä suositellulle ratkaisulle, jossa hukkalämpöä ei myydä kaukolämpöverkkoon.
- Kilpailukykyisellä hukkalämmön hinnoittelulla elinkaarikustannuksissa säästetään edellä mainittua enemmän mutta investointikustannukset kasvavat. Rakennuksen elinkaaren aikana hukkalämmön myynti säästää kuitenkin kokonaisuudessaan enemmän kuin edellä mainittu ratkaisu ilman hukkalämmön myyntiä.
- Hukkalämmön myynti kaukolämpöverkkoon ei ole automaattisesti suositeltava ratkaisu ennen kuin paikallisen kaukolämpötoimittajan hukkalämmön hinnoittelumalli on tiedossa. Johtopäätösten tekeminen hukkalämmön myynnin kannattavuudesta vaatii lisäselvittelyä, joka ottaa huomioon vuodenajoittain muuttuvan hintatason myytävälle lauhteelle.

Ominaisostoenergiankulutuksen laskennassa käytettiin rakennuksen pinta-alan arvoa 12 658 m² käytetyn laskentamallin mukaisesti. Tuloksissa on esitetty tarkemmin pienempää investointia painottavat ratkaisut, joilla päästään lähes samoihin elinkaarikustannuksiin kuin suositellussa ratkaisussa, mutta joiden ostoenergiankulutus on suurempi.

SISÄLLYSLUETTELO

1	Työn tavoite	6
2	Keskeiset lähtötiedot	6
2.1	Rakennuksen ominaisuudet	6
2.2	Työn suorittamistapa	7
2.3	Optimointitarkastelun vaihtoehdot	7
2.4	Elinkaarikustannuslaskennan lähtötiedot ja periaatteet	9
2.5	Energiasimuloinnin laskentaperiaatteet	10
2.6	Simuloinnin tulosten esitystapa	21
3	Tulokset	23
3.1	Suositus valinnoiksi optimoinnin perusteella	23
3.2	Yhdistetyt optimitulokset tavoite-energiankulutuksen laskennassa	23
3.3	Hukkalämmön myynti kaukolämpöverkkoon	26
3.4	Optimointitulosten muuttujakohtainen analysointi	32

1 Työn tavoite

Työn tavoitteena oli löytää monitavoiteoptimoinnin avulla kustannustehokkaimmat suunnitteluratkaisut Virtanen Yhtiöt Raision kauppakeskus -uudisrakennukseen sovittujen reunaehtojen mukaisesti. Työn tuloksien avulla pyritään ohjaamaan hankkeen suunnittelua kustannus- ja energiatehokkaisiin toteutusratkaisuihin ja hyödyntämään uusiutuvia energianlähteitä. Työn laskentamenetelmät ja tulokset keskittyvät rakennushankkeen kustannus- ja energiatehokkuuden kokonaisuuteen, missä on otettu huomioon eri toimenpidevaihtoehtojen taloudellinen kannattavuus, energiansäästöpotentiaali sekä huolto- ja ylläpito- ja ylläpitonäköt. Työn tulokset toimivat suunnittelun päätöksenteon tukena sekä lähtötietona yksityiskohtaisemmalle toteutussuunnittelulle.

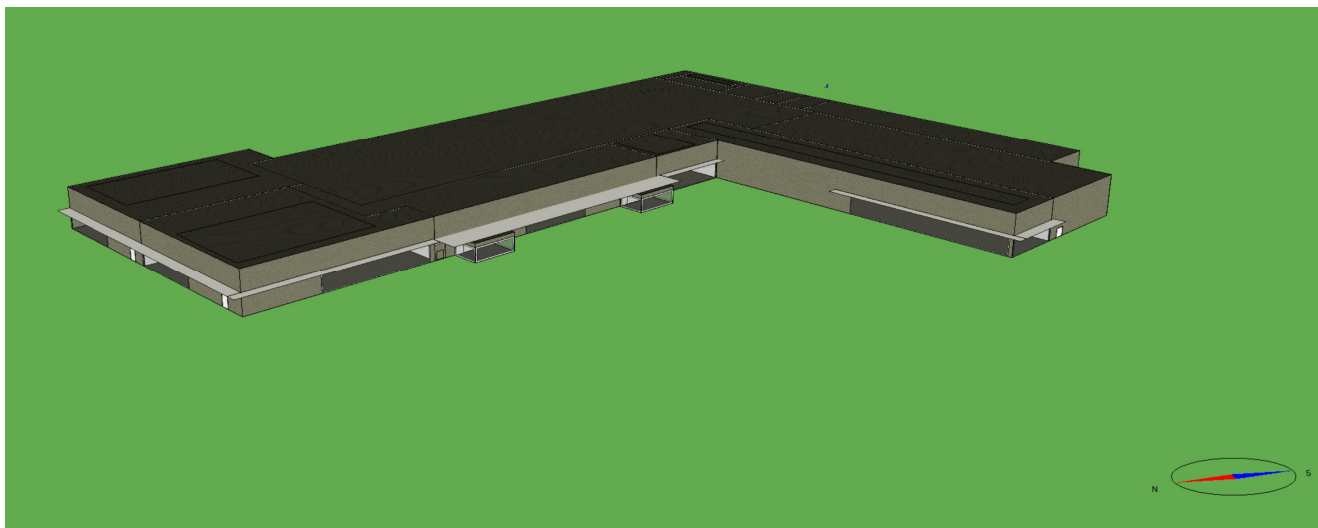
Vertailut suoritettiin optimoimalla kaikki tarkasteltavat suunnitteluratkaisut MOBO-optimointityökalulla (VTT:n ja Aalto-yliopiston kehittämä optimointityökalu). Näin saatiin selville kustannusoptimaaliset energiatehokkuuden parantamiskonseptit. MOBO-optimointi etsii vaihtoehtoista kaikkia ne toimenpiteet, jotka säästävät energiaa ja ovat elinkaari- ja taloudellisesti kannattavia tarkasteluajanjakson aikana.

2 Keskeiset lähtötiedot

2.1 Rakennuksen ominaisuudet

Työn lähtökohtana toimi huhtikuussa 2020 saatu hyvin varhaisessa vaiheessa oleva suunnitteluaineisto, joka käsittää rakennuksen ulkomuodot ja eri tilatyypin osuudet rakennuksen kokonaispinta-alasta.

- Arkkitehti eli rakennuksen 3-ulotteinen geometriamalli, jota käytettiin energialaskentamallin pohjana. Rakennuksen geometriamalli on esitetty kuvassa 1. Rakennuksen ominaisstoenergiankulutusta ($\text{kWh/m}^2/\text{a}$) laskettaessa on käytetty pinta-alan arvoa 12658 m^2 .
- Ulkovaipparakenteiden ja talotekniikkajärjestelmien alustavat suunnitteluarvot.

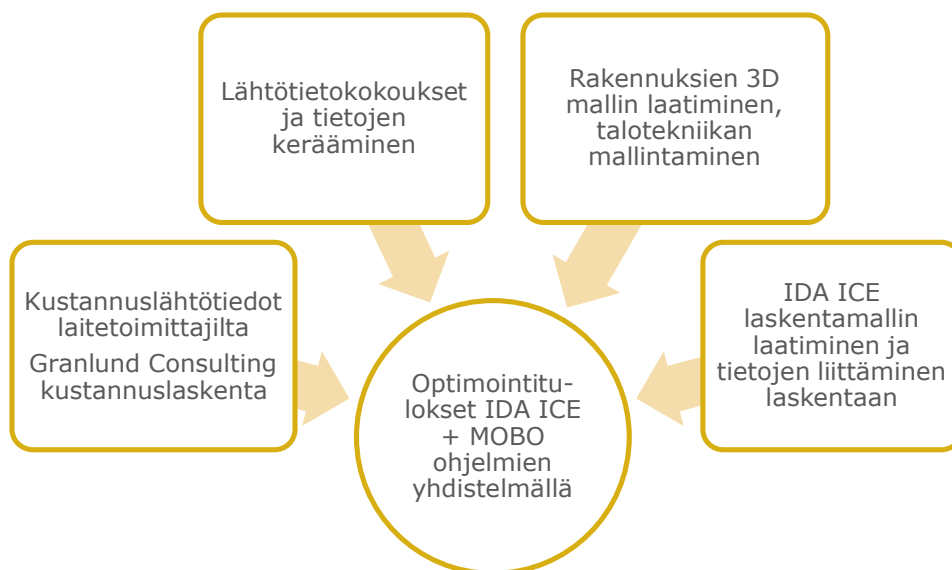


Kuva 1. Kauppakeskuksen geometriamalli energiasimulointiohjelmistoa varten.

Tavoite-energiankulutuksen laskennassa käytettiin Ilmatieteenlaitoksen vuonna 2019 mitattua Turun säädataa, koska se oli Raisiota lähinnä käytettävissä oleva sääasema.

2.2 Työn suorittamistapa

Työ suoritettiin alla esitetyn kuvan 2 mukaisesti keräämällä lähtötietoja ja tekemällä niistä energialaskentamalli IDA Indoor Climate and Energy -laskentaohjelmaan. IDA Indoor Climate and Energy (IDA ICE) on simulointityökalu, jonka avulla voidaan simuloida dynaamisesti rakennusten sisäilmaolosuhteita, energiankulutusta sekä energiantuottojärjestelmiä. IDA ICE -ohjelmaa käytettiin MOBO-optimointiohjelmalla varsinaisten elinkaarikustannusoptimien määrittämiseen. Itse optimointiprosessi vaatii tuhansia energiasimulointeja optimiratkaisujen määrittämiseksi. Lisäksi tehtiin useita kymmeniä erillislaskentoja tulosten oikeellisuuden varmistamiseksi ja analysoimiseksi.



Kuva 2. Energiaoptimoinnin toteutuksen periaatekaavio.

2.3 Optimointitarkastelun vaihtoehdot

Laskennassa tutkittiin seuraavan sivun taulukossa 1 esitettyjä energiatehokkuuden parantamisvaihtoehtoja. Kaikki muutujat ovat yhtä aikaa käytössä laskennassa, ja optimointiohjelma valitsee elinkaarikustannusten ja energiankulutuksien monitavoiteoptimin kannalta parhaat vaihtoehtoyhdistelmät. Kaikki tulokset perustuvat työn toteutusajankohtana käytössä olleisiin kustannustietoihin ja -arvioihin, joten tuloksia käytettäessä tulee kiinnittää huomiota mahdollisiin eroihin selvitystyössä käytettyjen kustannusten ja hankkeessa toteutuvien lopullisten kustannusten välillä. Tuloksista on mahdollista nähdä kustannuserojen vaikutus elinkaarikustannuksiin.

Tuloksia tulkittaessa on myös hyvä huomioida se, että toimenpiteiden ominaisuuksien valikoituminen riippuu pääasiassa toimenpiteiden eri vaihtoehtojen sisäisistä erokustannuksista. Tämä tarkoittaa siis sitä, että esimerkiksi ulkoseinien optimaalisen eristepaksuuden valikoituminen riippuu vain eri eristepaksuusvaihtoehtojen kustannusten erotuksista. Toimenpiteiden absoluuttisella hintatasolla ei ole siis merkitystä optimoinnin valitsemien toimenpidevaihtoehtojen kannalta. Tämän takia taulukossa 1 ei ole huomioitu esim. kaikille vaihtoehdoille yhteisiä työmaan perustamiskustannuksia yms. kiinteitä ja hankkeessa joka tapauksessa toteutuvia kustannuksia. Optimointituloksissa mainitut investointikustannukset eivät tällöin myöskään kuvaa koko rakennuksen rakentamiseen vaadittavaa kokonaiskustannusta.

Tuloksia tulkittaessa tulee myös huomioida rakennuksen mahdolliset laajuusmuutokset käytettyihin lähtötietoihin verrattuna. Jos rakennuksen laajuus pienenee selvästi, muuttuvat myös investointikustannukset ja energiankulutukset, jolloin järjestelmien suhteellinen kannattavuus saattaa muuttua.

Taulukko 1. Optimoinnissa tarkasteltujen suunnitteluvaihtojen kustannukset, kaikki hinnat ovat alv. 0 %.

Toimenpide	Toimenpidevaihtoehdot	Kustannukset
Ulkoseinien eristystaso *1	Eristyspaksuus 100 mm, U-arvo 0,32 W/m ² K Eristyspaksuus 150 mm, U-arvo 0,22 W/m ² K Eristyspaksuus 200 mm, U-arvo 0,17 W/m ² K Eristyspaksuus 250 mm, U-arvo 0,14 W/m ² K	-6,5 €/us-m ² -3,2€/us-m ² 0 €/us-m ² +3,2 €/us-m ²
Yläpohjan eristystaso *1	Eristyspaksuus 190 mm, U-arvo 0,18 W/m ² K Eristyspaksuus 240 mm, U-arvo 0,14 W/m ² K Eristyspaksuus 390 mm, U-arvo 0,09 W/m ² K Eristyspaksuus 490 mm, U-arvo 0,07 W/m ² K	-12,0 €/yp-m ² -9,0 €/yp-m ² 0 €/yp-m ² +6,0 €/yp-m ²
Alapohjan eristystaso *1	Eristyspaksuus 100 mm, U-arvo 0,32 W/m ² K Eristyspaksuus 150 mm, U-arvo 0,22 W/m ² K Eristyspaksuus 200 mm, U-arvo 0,17 W/m ² K Eristyspaksuus 250 mm, U-arvo 0,14 W/m ² K	-5,6 €/ ap-m ² -2,8 €/ ap-m ² 0 €/ ap-m ² +2,8 €/ ap-m ²
Referenssiratkaisun energiajärjestelmä *2	Sisältää energiajärjestelmään tarvittavat komponentit sekä asennuksen. Ei sisällä vedenjäähdytyskonetta.	0 €
Lauhdelämpöpumppuun pohjautuva energiajärjestelmä *3	1. 100 kW lauhdelämpöpumppu (1 – 3 kpl) 2. 3x 100 kW lauhdelämpöpumppu + 400 kW lämpöpumppu lisäjäähdytykseen (järjestelmässä ei VJK:ta) 3. 3x 100 kW lauhdelämpöpumppu + 450 kW korkean lämpötilan lämpöpumppu hukkalämmön myyntiin (järjestelmässä ei VJK:ta) 4. 1x 280 kW suuritehoinen lauhdelämpöpumppu + 400 kW lämpöpumppu lisäjäähdytykseen (järjestelmässä ei VJK:ta) 5. 1x 600 kW suuritehoinen lauhdelämpöpumppu (järjestelmässä ei VJK:ta)	1. 640 – 550 €/kW 2. 350 €/kW 3. 390 €/kW 4. 320 €/kW 5. 310 €/kW
Ilma-vesi lämpöpumppu *4	1. lämpöpumpun lämpöteho 480 kW (käyttö: lämmitys / jäähdytys) 2. lämpöpumpun lämpöteho 370 kW (käyttö: lämmitys / jäähdytys)	1. 120 €/kW 2. 40 €/kW
Vedenjäähdytyskone	Jäähdytysteho 250 kW – 550 kW, kokonaishinta asennettuna	440 – 270 €/kW
Aurinkosähköjärjestelmä *5	Aurinkosähköjärjestelmä asennuksineen, aurinkopaneeleja 2000 – 4600 m ²	0,8 – 0,6 €/Wp paneelien määrästä riippuen
Energiakaivot	Sisältää 320 m syvät energiakaivot ja työkustannukset	27 €/m + 20000 €
Energiapaalut *6	Sisältää 15 m syvät energiapaalut ja työkustannukset	410 €/paalu
Hukkalämmön myynti kaukolämpöverkkoon	1. Perusratkaisu, CO ₂ -kylmäkoneikon lämmönsiirtimestä 2. CO ₂ -kylmäkoneikon lämmönsiirtimestä + lämpöpumpun avulla IV -jäähdytyksen lauhteesta 3. CO ₂ -kylmäkoneikon lämmönsiirtimestä + lämpöpumpun avulla IV -jäähdytyksen lauhteesta sekä kaupan kylmän lauhteesta	1. 25000 € 2. 33000 € 3. 40000 €
Sähkökattila	Sähkökattila asennettuna, esimerkki: 100 – 400 kW	32 – 39 €/kW

*1) Eristekustannukset on suhteutettu rakentamismääräysten vertailutasoon mukaisesti U -arvoihin

Absoluuttisia kustannuksia laskettaessa käytettiin seuraavia laskentamalliin pohjautuvia pinta-aloja:

Ulkoseinä: 4040 m²

Yläpohja: 11400 m²

Alapohja: 11400 m²

*2) Referenssiratkaisun energiajärjestelmällä ei ole vertailutasosta liittyen lisäinvestointikustannuksia. Referenssijärjestelmään liittyy kuitenkin 550 kW vedenjäähdytyskone, jonka kustannukset on ilmoitettu erikseen.

*3) Investointikustannukset ovat lisäkustannuksia referenssijärjestelmään verrattuna. Investointikustannusten lisäksi optimoinnissa otetaan huomioon kompressorien uusimiskustannukset 15 vuoden kuluttua käyttöönotosta sekä lämpöpumppujen vuotuiset huoltokustannukset

*4) Ilma-vesilämpöpumppuun pohjautuvaan energiajärjestelmään sisältyy aina 1 – 2 kpl 100 kW lauhdelämpöpumppua, joiden investointikustannukset on ilmoitettu erikseen.

*5) Investointikustannusten lisäksi optimoinnissa otetaan huomioon aurinkopaneelien vuotuiset huoltokustannukset

*6) Rakennus perustetaan joka tapauksessa paalujen varaan, jolloin ilmoitetut energiapaalujen kustannukset ovat lisäkustannuksia perusratkaisuun verrattuna

Taulukossa 1 listattujen suunnitteluvaihtoehtojen kustannukset muodostavat perustan optimoinnin laskentavaihtoehtojen yhdessä taulukossa 2 listattujen energiajärjestelmien kanssa (esitetty raportin kappaleessa 2.5.3). Tarkasteltavien vaihtoehtojen kombinaatiomäärä optimoinnissa on noin 7500 kpl. Kombinaatiomäärä sisältää vaihtoehtoiset rakennuksen ulkovaipan eristysratkaisut, taulukossa 2 listatut energiajärjestelmät (kappale 2.5.3) sekä aurinkosähköjärjestelmän vaihtoehtoiset laajuudet. Kaikki energiajärjestelmät referenssijärjestelmää lukuun ottamatta laskettiin kahdella vaihtoehtoisella lisälämmönlähteellä, kaukolämpö ja sähkökattila. Referenssijärjestelmän lisälämmönlähde on kaukolämpö.

Optimointiin sisällytettyjen kombinaatioiden lisäksi hukkalämmön myynnin kannattavuutta tarkasteltiin erillislaskennan avulla. Erillislaskentaan sisällytettiin neljä toisistaan hyvin poikkeavaa eristystason kombinaatiota (ulkoseinä – yläpohja – alapohja) sekä taulukossa 2 listatut energiajärjestelmien vaihtoehdot. Edellä mainituissa kombinaatioissa hukkalämmön myynti kaukolämpöverkkoon on toteutettu kaupan kylmän CO₂ -kylmäkoneikon lämmönsiirtimen kautta. Vaihtoehtoinen tarkasteltu toteutustapa on myydä osa kaupan kylmän lauhdesta CO₂ -kylmäkoneikon lämmönsiirtimen kautta ja osa lämpöpumpulla joko IV -jäähdytyksen lauhdesta tai sekä IV -jäähdytyksen että jäljelle jäävästä kaupan kylmän lauhdesta. Tarkasteltuja hukkalämmön myyntitilanteita on vertailtu vastaaviin laskentatilanteisiin ilman hukkalämmön myyntiä.

Hukkalämpötarkasteluiden yhteydessä on myös selvitetty, miten hukkalämmön osittainen lataus geoenergiakenttään vaikuttaa energiatehokkuuteen ja kustannuksiin tilanteessa, jossa hukkalämpöä ei myydä kaukolämpöverkkoon.

2.4 Elinkaarikustannuslaskennan lähtötiedot ja periaatteet

Elinkaarikustannuslaskennassa käytettiin seuraavia lähtötietoja:

- Kaikki raportissa esitetyt kustannukset on esitetty ilman arvonlisäveroa.
- Laskentakorko oli 3 % ja elinkaarikustannuslaskelmien tarkasteluajanjakso 20 vuotta.
- Ostettavan sähkön kokonaishinta oli 71,1 €/MWh, joka sisältää energia- ja siirtomaksut sekä sähköveron. Sähkön hintakomponenttien oletettu keskimääräinen hintakorotus oli laskelmissa 2 % vuodessa.
- Aurinkopaneelien mitoitukselta riippuen rakennuksessa hyödyntämätön aurinkosähkö myydään Turku Energialle pörssisähkön Spot -hinnan mukaan 3 €/MWh vähennettynä. Laskennassa käytettiin Suomessa vuoden 2019 toteutuneita kuukausittaisia sähkön Spot -hintoja.
 - Vuonna 2019 pörssisähkön keskimääräinen Spot -hintaa koko vuodelle oli noin 55 €/MWh
 - Viimeisen viiden vuoden aikana keskimääräinen Spot -hintaa on vaihdellut 58 ja 40 €/MWh välillä
- Sähkön kuukausipohjainen tehomaksu asetettiin Turku Energian vuoden 2020 toukokuussa voimassa olevan hinnaston mukaiseksi 1,76 €/kW / kuukausi (keskijännitesiiro)

- Kaukolämmön energia- ja vesivirtamaksut asetettiin Turku Energian vuoden 2020 toukokuussa voimassa olevan kaukolämpöhinnoinnaston mukaisiksi:
 - Energiamaksu, tammikuu – helmikuu: 84,02 €/MWh
 - Energiamaksu, maaliskuu – toukokuu: 70,81 €/MWh
 - Energiamaksu, kesäkuu – elokuu: 52,19 €/MWh
 - Energiamaksu, syyskuu – marraskuu: 69,48 €/MWh
 - Energiamaksu, joulukuu: 84,02 €/MWh
- Kaukolämmön tehomaksu määräytyy Turku Energian hinnaston mukaan seuraavasti:
 - Tehomaksu, P (kW) 165 kW – 650 kW: $1,03 * (P * 13,6032 + 2465,58) \text{ €/vuosi}$
 - Tehomaksu, P (kW) 65 kW – 165 kW: $1,03 * (P * 27,2064 + 221,052) \text{ €/vuosi}$
 - Tehomaksu, P (kW) 15 kW – 65 kW: $1,03 * (P * 30,6072) \text{ €/vuosi}$
 - Tehomaksu, P (kW) alle 15 kW: $1,03 * 362,752 \text{ €/vuosi}$
- Kaukolämmön kustannusten oletettu hintakorotus edellisvuoteen nähden oli laskelmissa 2 %.
- Kaukolämpöyhtiölle myytävän hukkalämmön hinnoitteluperusteet on esitetty tämän raportin luvussa 2.5.5
- Esitetyt tulokset ja kustannukset koskevat nimenomaan optimoinnin muuttujina olevia toimenpiteitä. Tuloksissa esitetyt investointikustannukset eivät siis vastaa hankkeen kaikkia rakentamiskustannuksia.
- Elinkaarikustannukset on määritetty nettonykyarvomenetelmällä lisäämällä tarkasteltujen toimenpiteiden investointeihin tarkasteluajanjakson aikana toteutuvien energia-, huolto-, ylläpito- ja uusimiskustannusten kassavirtojen nykyarvot.

2.5 Energiasimuloinnin laskentaperiaatteet

Energiaoptimoinnin tuloksia varten tarvittavat energiankulutustiedot simuloidaan IDA ICE -energiaskentaohjelmistolla, johon mallinnetaan kaikki rakennuksen energiankulutukseen vaikuttavat tekijät mahdollisimman tarkasti käytettävissä olevilla lähtötiedoilla. Ohjelman antamien ostoenergiankulutusten avulla määritetään lopulliset elinkaarikustannukset.

Energiankulutuslaskennan oikeellisuus varmistettiin vertailemalla simuloitua kaukolämmön ja sähköenergian kulutusta olemassa olevien kohteiden toteutuneisiin energiankulutuksiin. Tavoitteena, että ostoenergiankulutuksen referenssitaso ennen energiatehokkuutta parantavia investointeja olisi samaa tasoa vastaavatyypisten uudiskohteiden kanssa.

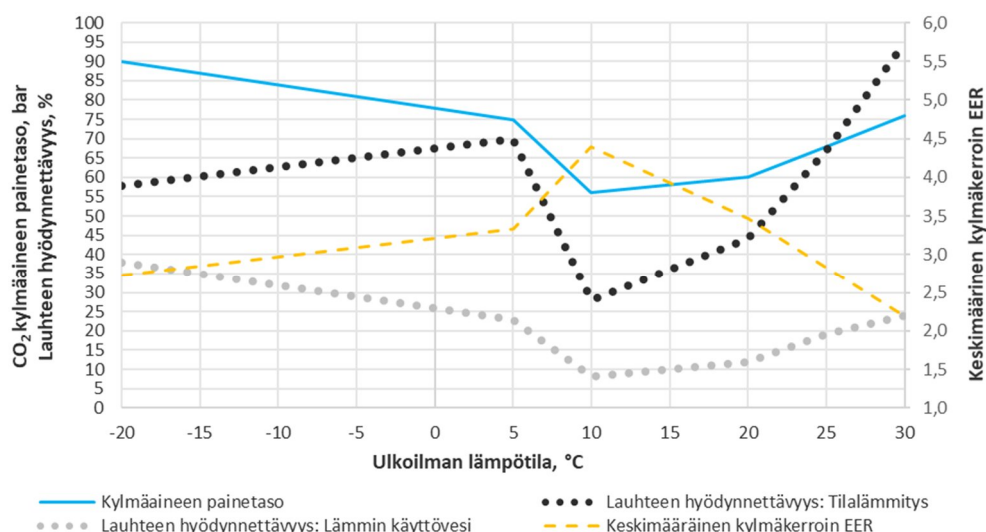
Eri optimointitapauksille lasketut elinkaari- ja investointikustannukset suhteutettiin referenssijärjestelmälle laskettuihin kustannuksiin vertailtavuuden vuoksi. Laskennassa käytetty referenssijärjestelmä edustaa nykyisin rakennettavaa perustasoa, käsittäen vertailutason rakenteiden U -arvot (ulkoseinä, yläpohja ja alapohja) sekä lauhdelämmöntalteenoton suoraan kaupan kylmän CO₂ -kylmäkoneikon lämmönsiirtimistä. Taloteknisten järjestelmien osalta referenssijärjestelmässä hyödynnetään CO₂ -pitoisuuden mukaan ohjattavaa tarpeenmukaista ilmanvaihtoa kaikissa liiketiloissa. Myymälätiloja palvelevia ilmanvaihtokoneita ohjataan CO₂ -pitoisuuden sekä ilman absoluuttisen kosteuden mukaan, hyödyntämällä mahdollisimman paljon kiertoilmaa. Myymälätilojen tuloilmaa kuivataan ympäri vuoden tuloilman jäähdytyspatterilla ilman absoluuttisen kosteuden asetusarvojen puitteissa (maks. 8 g H₂O / kg kuivaa ilmaa). Tuloilman kuivauksesta (jäähdytys) johtuen tarvetta on tuloilman jälkilämmitykselle koko vuoden ajan, erityisen paljon kesällä. Kaikissa tulo - poisto ilmanvaihtokoneissa käytetään tehokasta lämmöntalteenottoa roottorilla (lämpötilahyötysuhde 78 %).

Ilmanvaihdon talotekniset ratkaisut edustavat referenssijärjestelmässä vuonna 2020 tehtävää normaalia tasoa, joten tämän takia ilmanvaihtoratkaisuja ei sisällytetty optimoinnin muuttujiksi.

2.5.1 Kaupan kylmän lauhdelämmöntalteenotto referenssijärjestelmässä

Referenssijärjestelmässä CO₂ -kylmäkoneikon painetasoa ohjataan lämmöntarpeen mukaisesti painealueella 55 bar – 90 bar ja saatava lauhdelämpö ohjataan lämmitysjärjestelmän puskurivaraajaan. Tavoitteena on hyödyntää mahdollisimman paljon kaupan kylmän lauhdetta rakennuksen lämmityksessä, tosin kylmäkoneikon lisääntyneen sähköenergiankulutuksen kustannuksella. Simuloinnissa käytetty CO₂ -kylmäkoneikon painetason ohjaus, jäähdytyksen keskimääräinen kylmäkerroin

EER ja lauhteen hyödynnettävyys, on esitetty kuvassa 3 ulkoilman lämpötilasta riippuen. Lauhteen hyödynnettävyys IV- ja tilalämmityksen osalta on määritetty lämmitysverkostolle, jonka mitoittavat lämpötilatasot ovat 55 / 40 °C (meno / paluu). Lämpimän käyttöveden lämmityksessä CO₂-kylmäkoneikon lämmönsiirtimelle tulevan veden lämpötila on 55 °C.



Kuva 3. Kuvassa on esitetty CO₂-kylmäkoneikon painetaso ohjaus, jähdytyksen keskimääräinen kylmäkerroin EER sekä lauhteen hyödynnettävyys referenssijärjestelmän osalta. Matalalla ulkoilman lämpötilalla (alle -20 °C) kylmäaineen painetaso on korkeimmillaan 90 bar. Matalammillaan kylmäaineen painetaso on 56 bar ulkoilman lämpötilalla +10 °C, jonka jälkeen painetaso nousee ulkoilman lämpötilan noustessa. Keskimääräisen kylmäkerroimen laskennassa on oletettu, että pakkaskylmän osuus kaupan kylmän tarpeesta on noin 15 %. Kaasunjähdyttimien puhaltimien sähköteho sisältyy keskimääräiseen kylmäkerroimeen. Vaikutus kylmäkerroimeen on havaittavissa erityisesti ulkoilman lämpötiloilla > +20 °C.

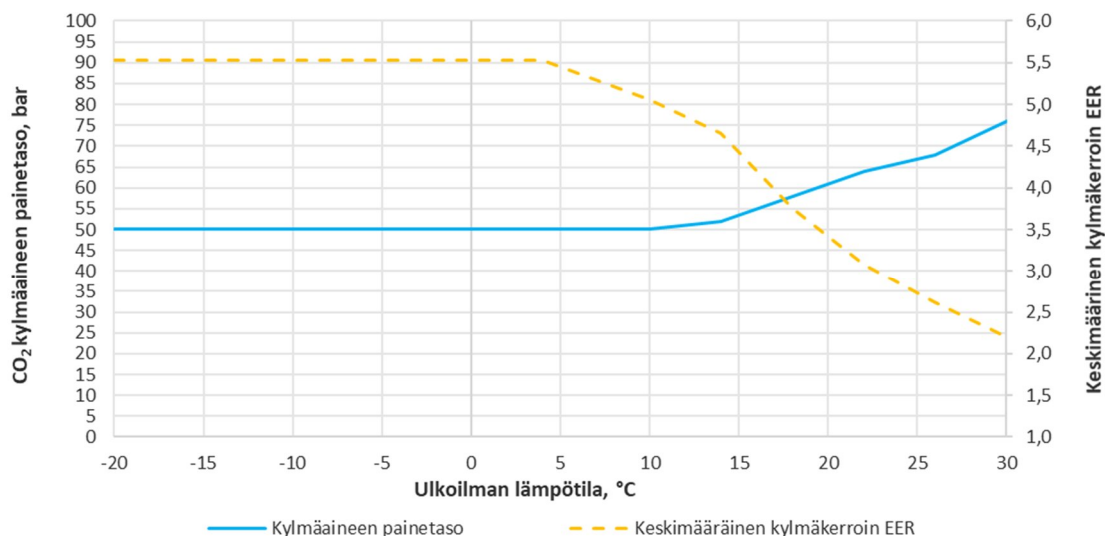
Referenssijärjestelmässä kaupan kylmän lauhdetta hyödynnetään ensisijaisesti IV- ja tilalämmitykseen kuvassa 3 esitetyn lauhteen hyödynnettävyyskäyrän mukaisesti "Lauhteen hyödynnettävyys: Tilalämmitys". Mahdollisesti ylitse jäävä lauhide hyödynnetään lämpimän käyttöveden lämmitykseen enintään kuvassa 3 esitetyn hyödynnettävyyskäyrän mukaisesti "Lauhteen hyödynnettävyys: Lämmin käyttövesi".

Referenssijärjestelmän osalta lauhteen kokonaismäärä vuoden aikana on 1620 MWh ja CO₂-kylmäkoneikon keskimääräinen kylmäkerroin EER noin 3,4. Kylmäkoneikon sähköenergiankulutus on vastaavasti 370 MWh.

2.5.1 Kaupan kylmän lauhdelämmöntalteenotto lauhdelämpöpumppujen yhteydessä

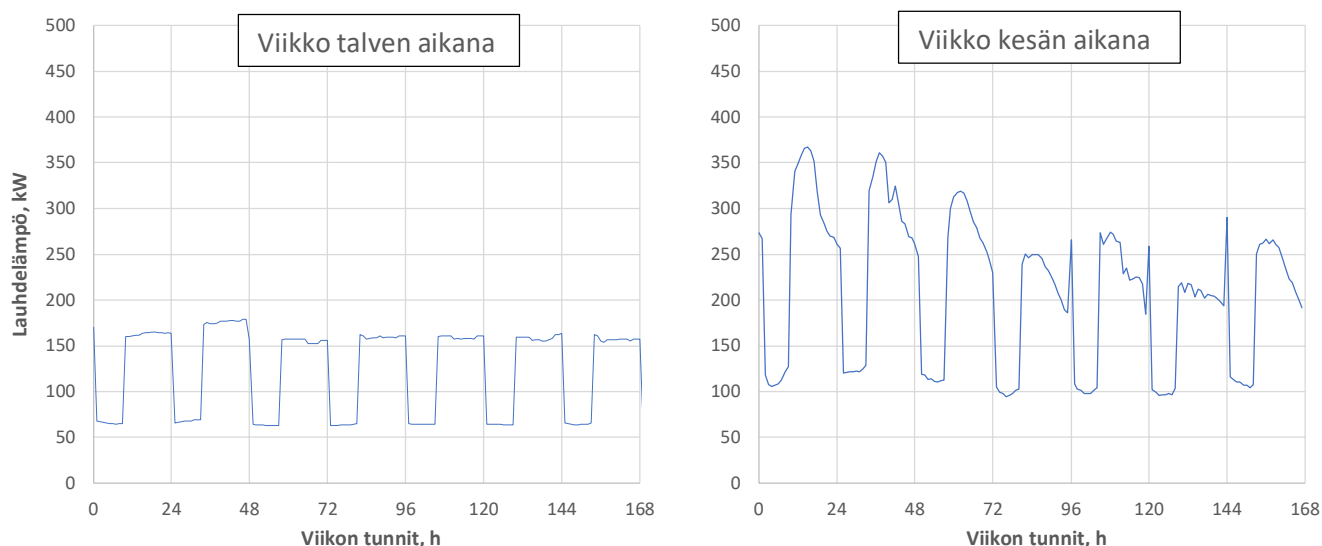
Lauhdelämpöpumppujen yhteydessä kaupan kylmän CO₂-kylmäkoneikkoa ajetaan mahdollisimman energiatehokkaasti alhaisella painetasolla, lämmityskaudella 50 bar. Kaupan kylmän lauhide-energia voidaan lämpöpumppujen mitoituksista riippuen hyödyntää rakennuksen lämmityksessä täysimääräisenä. Simuloinnissa lauhdelämpöpumppu pyrkii jähdyttämään kylmäkoneikon lämmönsiirtimelle palaavan etanolivesiliuoksen 13 °C lämpötilaan (lämmönsiirtimestä ulos 17 °C), mikäli rakennuksessa on lämmön tarvetta. Lämmönsiirtimen kautta siirrettävää lauhdelämpöä ladataan simuloinnissa varaajaan, jonka lämpötila vaihtelee rakennuksen lämmön tarpeen mukaan 17 °C ja 30 °C välillä. Hukkalämpöä (T > 30 °C), jota ei voida suoraan hyödyntää rakennuksen lämmityksessä siirretään simuloitavasta tapauksesta riippuen joko geoenergiakenttään (energiakaivot tai -paalut), myydään osittain tai täysimääräisenä kaukolämpöverkkoon tai siirretään nestejähdyttimien kautta ulkoilmaan.

Simuloinnissa käytetty CO₂-kylmäkoneikon painetaso ohjaus ja jähdytyksen keskimääräinen kylmäkerroin EER, on esitetty kuvassa 4 ulkoilman lämpötilasta riippuen. Kuvassa esitetty ulkoilman lämpötilasta riippuva kylmäkerroin saavutetaan rakennuksen lämmöntarpeesta riippumatta, koska kylmäainetta alijähdytetään CO₂-kaasunjähdyttimissä.



Kuva 4. Kuvassa on esitetty CO₂-kylmäkoneikon painetason ohjaus, jäähdytyksen keskimääräinen kylmäkerroin EER sekä lauhteen hyödynnettävyys lauhdelämpöpumpun yhteydessä. Kylmäaineen painetaso on vakio 50 bar aina ulkoilman lämpötilaan +4 °C asti, jonka jälkeen kylmäaineen painetaso nousee ulkoilman lämpötilan noustessa. Keskimääräisen kylmäkerroimen laskennassa on oletettu, että pakkaskylmän osuus kaupan kylmän tarpeesta on noin 15 %. Kaasunjäähdyttimien puhaltimien sähköteho sisältyy keskimääräiseen kylmäkerroimeen. Vaikutus kylmäkerroimeen on havaittavissa erityisesti ulkoilman lämpötiloilla > +20 °C.

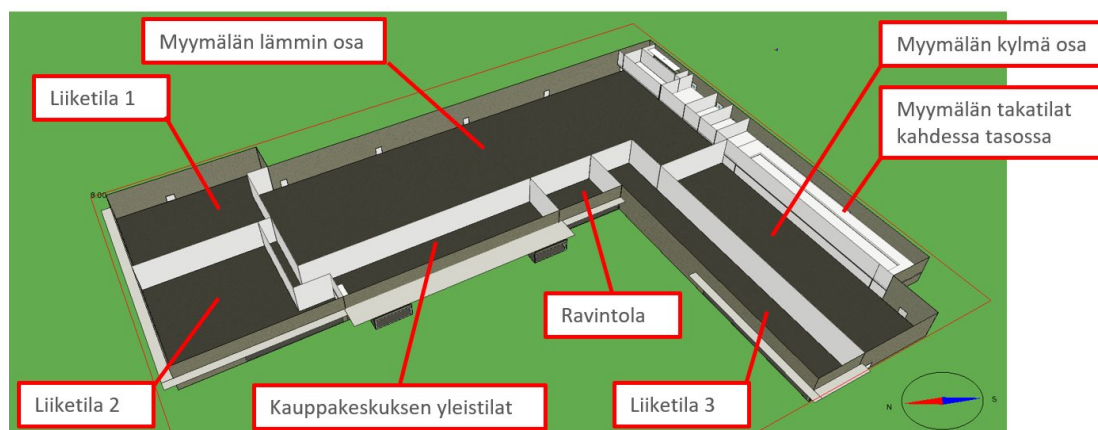
Lauhdelämpöpumppujen yhteydessä kaupan kylmän lauhteen määrä vuoden aikana on noin 1540 MWh ja CO₂-kylmäkoneikon keskimääräinen kylmäkerroin EER noin 4,5. Kylmäkoneikon sähköenergiankulutus on vastaavasti 280 MWh. Kaupan kylmän lauhde-energian vuotuista ja yhden esimerkkipäivän aikaista jakaumaa on havainnollistettu kuvassa 5.



Kuva 5. Kuvassa on esitetty kaupan kylmän tuntitasoinen lauhdeprofiili hypermarkettitasoiselle päivittäistavarakaupalle kahden esimerkkiviikon osalta: talviviikko ja kesäviikko. Kaupan kylmästä saadaan reilusti lauhdelämpöä hyödyksi päiväsaikaan, mutta esimerkiksi talviviikon aikana yöllä vain noin 40 % päiväsaikan lauhteesta.

2.5.2 Kauppakeskuksen energiasimulointimalli

Kauppakeskusta kuvaava energiasimulointimalli rakennettiin IDA ICE -energiälaskentaohjelmaan saatujen lähtötietojen (luku 2.1) pohjalta. Energiamallin teossa hyödynnettiin Granlundin sisäistä tietopankkia, jotta erityisesti päivittäistavara-kauppaa palvelevat oheistilat ja näiden vaatima talotekniikka saatiin riittävän kattavasti mukaan simulointimalliin. Simuloidun kauppakeskuksen kokonaispinta-ala on 12658 m², josta päivittäistavarakaupan osuus on noin 7500 m² sisältäen mm. kylmä- ja kuivavarastot sekä toimistotilat. Kauppakeskuksen liiketilat jaettiin simulointimallissa kolmeen osaan, liiketilat 1 – 3, yhteensä 3000 m². Näiden lisäksi kauppakeskuksessa on 250 m² kokoinen ravintola ja noin 900 m² edestä yleistä aula- ja sosiaalitalaa. Loput noin 1000 m² jakaantuu IV- ja kylmäkonehuoneen sekä sähkötilojen välille. Kauppakeskuksen tilatyypit on esitetty kuvassa 6.



Kuva 6. Kuvassa on esitetty kauppakeskuksen energiasimulointimallin tilatyypit ja sijainnit rakennuksessa. Liiketilojen, ravintolan sekä kauppakeskuksen yleistilan julkisivuilla on 3,5 m korkuiset ikkunat, joita varjostaa noin 2 syvät katokset. Kauppakeskuksessa on kaksi tuulikaappia, joiden ovet ovat osittain auki kauppakeskuksen aukioloaikana. Rakennuksen korkeus on 8 m.

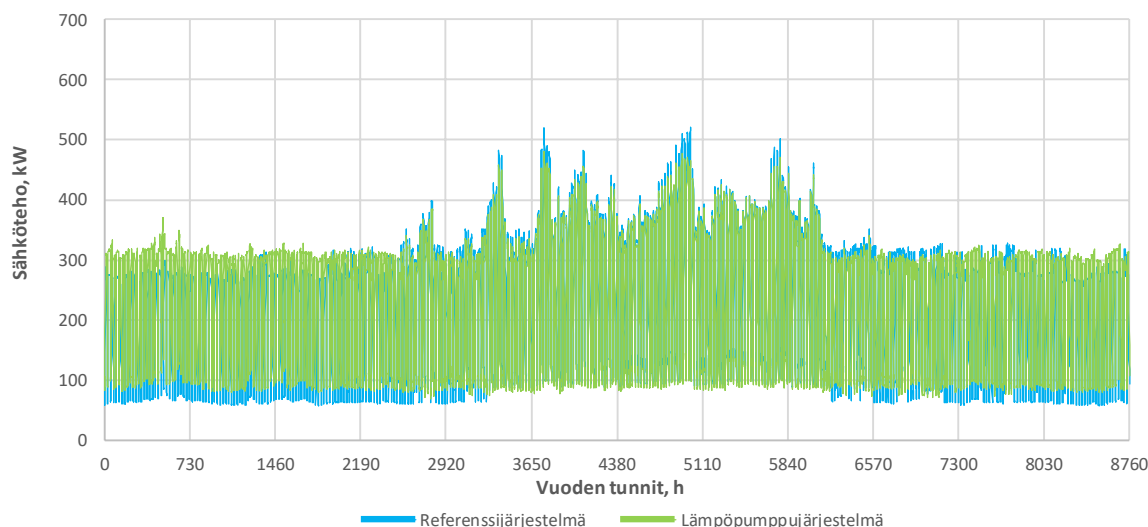
Energiasimulointimallissa olevien tulo – poistoilmanvaihtokoneiden yhteenlaskettu mitoitusilmavirta on noin 25 m³/s ja paikallispoistojen yhteenlaskettu mitoitusilmavirta noin 1 m³/s. Ilmanvaihdon oletettu normaali käyttötila on maanantai – lauantai kello 06.00 – 23.00 ja sunnuntai kello 08.00 – 23.00. Poissaoloaikana tulo – poistoilmanvaihtokoneet toimivat 1/3 osateholla ja paikallispoistot 1/2 osateholla.

Vertailutason U -arvoilla laskettuna, energiasimuloinnissa käytetyn kauppakeskuksen nettoenergiankulutukset ovat:

- Tila- ja IV -lämmitys: 1354 MWh
- Lämmin käyttövesi: 97 MWh
- Sähköenergia:
 - Referenssiratkaisun energiasimulointimalli: 1970 MWh
 - Lauhdelämpöpumppuja ja energiakaivoja hyödyntävä energiasimulointimalli: 1900 – 2070 MWh

Lämpimän käyttöveden osalta simuloinnissa käytettiin tuntipohjaista käyttöveden kulutusprofiilia, jossa kulutushuiput painottuvat kauppakeskuksen aukioloajalle. Energiasimulointimallista aiheutuvat häviöt kuten varaajien lämpöhäviöt ja kauko-lämmönsiirrossa tapahtuvat häviöt otettiin huomioon kauppakeskuksen energiasimulointimallissa laskettavasta tapauksesta riippuen.

Kauppakeskuksen simuloitua sähkötehoa jakaumaa (nettoteho ilman aurinkosähköä) on havainnollistettu kuvassa 7 referenssijärjestelmän sekä energiakaivoilla varustetun lämpöpumppujärjestelmän osalta.



Kuva 7. Kuvassa on esitetty kauppakeskuksen simuloitujen sähkätehojen jakaumat referenssijärjestelmän sekä energiakai-voilla varustetun lämpöpumpputermostuksen osalta. Lämpöpumpputermostus lisää sähköenergiankulutusta lämmitys-kauden aikana mutta toisaalta sähköenergiaa säästyy kaupan kylmän ja kesällä kiinteistöjäähdytyksen osalta. Kesäi-kaiseen sähköenergian säästöön vaikuttaa, tehdäänkö kiinteistöjäähdytys lämpöpumpuilla tai vedenjäähdytyskoneella.

2.5.3 Optimointiin valittujen energiajärjestelmien mallinnus

Kauppakeskuksen optimointiin valitut energiajärjestelmät mallinnettiin IDA ICE -energiatarkentamissuunnitelmassa ESBO -plant järjestelmärakenteeseen pohjautuen. Kaikissa tutkimuksissa energiajärjestelmissä hyödynnetään lauhdelämpöpumpputermostusta referenssijärjestelmää lukuun ottamatta, jotta kaupan kylmän lauhde-energia saadaan hyödyksi kauppakeskuksen lämmitykseen. Lauhdelämpöpumpputermostuksen lämpöteho vaihtelee simuloitavasta ratkaisusta riippuen 100 kW ja 600 kW välillä (nimellisteho), 45 °C menoveden lämpötilalla. Tehokkaimmalla lämpöpumpulla (lämpöteho 600 kW) tuotetaan sekä rakennuksen tarvitsema lämmitys että jäähdytys kokonaisuudessaan. Simulointiin valittiin esimerkkilaitteiksi kahden valmistajan lämpöpumpputermostusta (Gebwell ja Oilon) lämmitys- ja jäähdytystehon tuottamiseksi rakennukseen. Taulukossa 2 listattuja esimerkkilaitteita on kuvattu alla:

1. 100 kW lauhdelämpöpumpputermostus (LLP): Scroll-kompressorilla varustettu lämpöpumpputermostus, jossa erillinen lämmönsiirrin tulistuksen poistoa varten. Optimoinnissa 1 – 3 kpl 100 kW lämpöpumpputermostusyksikköä.
 - a. Lämpöpumpputermostus hyödyntää kaupan kylmän lauhteen tilalämmityksen ja lämpimän käyttöveden tuottamiseksi. Lämpöpumpputermostus tuottaa kesällä myös kylmää rakennuksen lämmitysverkostoniin. Jäähdytyksen lauhde hyödynnetään rakennuksen lämmitysverkostoniin. Geoenergiakentän yhteydessä lämpöpumpputermostus sekä kerätään lisälämpöä maasta että ladataan hukkalämpöä maahan.
2. 280 kW ja 600 kW lauhdelämpöpumpputermostus (LLP): Ruuvikompressorilla varustettu lämpöpumpputermostus, jossa erillinen lämmönsiirrin tulistuksen poistoa varten.
 - a. Sama toimintalogiikka kuin 100 kW -lämpöpumpputermostusyksiköillä. Reilusta tehosta johtuen samalla lämpöpumpputermostus tuottaa kattavasti tilalämmitystä, lämmintä käyttövettä ja jäähdytystä rakennukseen. 600 kW lämpöpumpputermostus tuottaa rakennuksen tarvitsema lämmitys ja jäähdytys kokonaisuudessaan.
3. Lisäjäähdytykseen tarkoitetut lämpöpumpputermostukset: Scroll-kompressorilla varustettu lämpöpumpputermostus, jolla tuotetaan ensisijaisesti kylmää rakennuksen jäähdytysverkostoniin. Jäähdytyksen lauhde hyödynnetään mahdollisuuksien mukaan rakennuksen lämmitysverkostoniin.
4. 450 kW korkean lämpötilan lämpöpumpputermostus: Mäntäkompressorilla varustettu lämpöpumpputermostus, jota hyödynnetään vain simulointitapauksissa, joissa hukkalämpöä myydään kaukolämpöverkkoon.
 - a. Lämpöpumpputermostusta käytetään simuloinnissa 100 kW lauhdelämpöpumpputermostusyksiköiden rinnalla, pääosin tuottamaan rakennuksen jäähdytysverkostoniin lisäjäähdytystä. Jäähdytysmoodissa valtaosa syntyneestä lauhdesta myydään kaukolämpöverkkoon 75 °C lämpötilatasossa.
 - b. Toisessa vaihtoehtoisessa käyttötilanteessa lämpöpumpputermostus kerää höyrystinpuolelta lämpöä vuorotellen rakennuksen jäähdytysverkostoniin ja kaupan kylmän lauhdesta ja siirtää tuotetun lauhdelämmön kaukolämpöverkkoon 75 °C lämpötilatasossa.

Ilma-vesilämpöpumppuun pohjautuvissa simulointitapuksissa (IVLP) lämpöpumput tuottavat lisälämmitystä rakennuksen lämmitysverkostoihin sekä kesällä lisäjäähdytystä rakennuksen jäähdytysverkostoihin. Ilma-vesilämpöpumppuja käytetään yhdessä 100 kW lauhdelämpöpumppujen yhteydessä, jotta kaupan kylmän lauhdelämpö saadaan myös hyödynnettyä. Edellä mainitulla laiteyhdistelmällä voidaan tuottaa samanaikaista lämmitystä ja jäähdytystä sekä lämmintä käyttövetä ainoastaan 100 kW lauhdelämpöpumppuyksiköillä.

Optimointiin valitut energiajärjestelmät 1 – 22 ja näiden tekniset tiedot on listattu taulukossa 2. Lisälämmönlähteenä toimii joko kaukolämpöliittymä tai sähkökattila. Tietyissä simulointitapauksissa lämpöpumppujärjestelmä kattaa rakennuksen lämmöntarpeen kokonaisuudessaan.

Taulukko 2. Taulukossa on esitetty optimointiin valitut energiajärjestelmät ja näiden tekniset tiedot. Järjestelmävaihtoehdot on numeroitu 1 – 22. Referenssijärjestelmä, rivi numero 7, on esitetty tummennettuna.

Järjestelmä- vaihtoehto	Energiajärjestelmä	LLP lämpöteho ja COP @ T _{H,in} = 10 °C / T _{L,out} = 45 °C sekä jäähdytysteho ja EER @ T _{H,in} = 12 °C / T _{L,out} = 35 °C				VJK jäähdytysteho ja EER @ CO ₂ T _{H,out} = 7 °C / T _{L,in} = 28 °C koneikosta			Suora LTO CO ₂ T _{H,out} = 7 °C / T _{L,in} = 28 °C koneikosta			VILP lämpöteho ja COP @ T _{air} = - 5 °C / T _{L,out} = 45 °C sekä EER @ T _{H,in} = 12 °C / T _{L,out} = 35 °C			Lisäjäähdytys- LP lämpöteho ja COP @ T _{H,out} = 7 °C / T _{L,in} = 35 °C lukumäärä			Energia- kaivojen Energia- paalujen
		Φ _H (kW)	Φ _C (kW)	COP	EER * ¹	Φ _C (kW)	EER * ²		Φ _H (kW)	COP	EER	Φ _H (kW)	COP	EER	Φ _H (kW)	COP	* ³	* ⁴
1	1x LLP yksikkö 100 kW (skrolli)	110 kW	97 kW	4,7	4,6	450 kW	3,6	ei	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	2x LLP yksikkö 100 kW (skrolli)	220 kW	194 kW	4,7	4,6	350 kW	3,6	ei	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	3x LLP yksikkö 100 kW (skrolli)	330 kW	291 kW	4,7	4,6	250 kW	3,6	ei	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	1x LLP yksikkö 100 kW (skrolli)	110 kW	97 kW	4,7	4,6	450 kW	3,6	ei	-	-	-	-	-	-	-	-	14 kpl	-
5	2x LLP yksikkö 100 kW (skrolli)	220 kW	194 kW	4,7	4,6	350 kW	3,6	ei	-	-	-	-	-	-	-	-	14 kpl	-
6	3x LLP yksikkö 100 kW (skrolli)	330 kW	291 kW	4,7	4,6	250 kW	3,6	ei	-	-	-	-	-	-	-	-	14 kpl	-
7	Referenssiratkais	-	-	-	-	550 kW	3,6	kyllä	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	1x LLP yksikkö 280 kW (ruuvi) + 400 kW LP lisäjäähdytykseen	305 kW	290 kW	3,8	4,1	-	-	ei	-	-	-	410 kW	5,4	-	-	-	-	-
9	1x LLP yksikkö 600 kW (ruuvi)	595 kW	570 kW	3,8	4,1	-	-	ei	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	1x LLP yksikkö 100 kW (skrolli) + IVLP	110 kW	97 kW	4,7	4,6	-	-	ei	480 kW	2,8	2,9	-	-	-	-	-	-	-
11	2x LLP yksikkö 100 kW (skrolli) + IVLP	220 kW	194 kW	4,7	4,6	-	-	ei	370 kW	2,8	2,8	-	-	-	-	-	-	-
12	1x LLP yksikkö 280 kW (ruuvi) + 400 kW LP lisäjäähdytykseen	305 kW	290 kW	3,8	4,1	-	-	ei	-	-	-	410 kW	5,4	-	-	-	14 kpl	-
13	1x LLP yksikkö 600 kW (ruuvi)	595 kW	570 kW	3,8	4,1	-	-	ei	-	-	-	-	-	-	-	-	14 kpl	-
14	2x LLP yksikkö 100 kW (skrolli) + 550 kW LP lisäjäähdytykseen	220 kW	194 kW	4,7	4,6	-	-	ei	-	-	-	540 kW	5,4	-	-	-	14 kpl	-
15	3x LLP yksikkö 100 kW (skrolli) + 400 kW LP lisäjäähdytykseen	330 kW	291 kW	4,7	4,6	-	-	ei	-	-	-	410 kW	5,4	-	-	-	14 kpl	-
16	1x LLP yksikkö 100 kW (skrolli)	110 kW	97 kW	4,7	4,6	450 kW	3,6	ei	-	-	-	-	-	-	-	-	-	407 kpl
17	2x LLP yksikkö 100 kW (skrolli)	220 kW	194 kW	4,7	4,6	350 kW	3,6	ei	-	-	-	-	-	-	-	-	-	407 kpl
18	3x LLP yksikkö 100 kW (skrolli)	330 kW	291 kW	4,7	4,6	250 kW	3,6	ei	-	-	-	-	-	-	-	-	-	407 kpl
19	1x LLP yksikkö 280 kW (ruuvi) + 400 kW LP lisäjäähdytykseen	305 kW	290 kW	3,8	4,1	-	-	ei	-	-	-	410 kW	5,4	-	-	-	-	407 kpl
20	1x LLP yksikkö 600 kW (ruuvi)	595 kW	570 kW	3,8	4,1	-	-	ei	-	-	-	-	-	-	-	-	-	407 kpl
21	2x LLP yksikkö 100 kW (skrolli) + 550 kW LP lisäjäähdytykseen	220 kW	194 kW	4,7	4,6	-	-	ei	-	-	-	540 kW	5,4	-	-	-	-	407 kpl
22	3x LLP yksikkö 100 kW (skrolli) + 400 kW LP lisäjäähdytykseen	330 kW	291 kW	4,7	4,6	-	-	ei	-	-	-	410 kW	5,4	-	-	-	-	407 kpl

*¹) Ei sisällä pumppaukseen tarvittavaa sähköä eikä nestejäähdyttimien puhallinsähköä, jos IV- ja tilajäähdytyksen lauhdelämpö joudutaan siirtämään nestejäähdyttimien kautta ulkoilmaan

*²) Ei sisällä nestejäähdyttimien puhallinsähköä eikä pumppaukseen tarvittavaa sähköä

*³) Energiakaivojen syvyys 320 m

*⁴) Energiapaalujen syvyys 15 m

Energiajärjestelmien mallinnuksessa otettiin huomioon lämmityksen ja jäähdytyksen puskurivaraajat, järjestelmien tarvitsemat pumput sekä nestejäähdyttimet. Jäähdytyksen osalta, lämpöpumppujärjestelmissä otettiin huomioon saatavissa oleva vapaajäähdytys geoenergiakentästä (vaihtoehdot, joissa energiakaivot tai energiapaalut) sekä vapaajäähdytys ulkoilmasta nestejäähdyttimien avulla. Vedenjäähdytyskoneen yhteydessä hyödynnettiin myös vapaajäähdytystä ulkoilmasta.

Hukkalämmön myynnin yhteydessä käytetyn korkean lämpötilan lämpöpumpun suoritusarvot (lämmön tuoton lämpökerroin ja lämpöteho) ovat toimintapisteittäin:

- Tilajäähdytyksen tuotto 7 / 12 °C verkostoon ja lauhdutus kiinteistön lämmitysverkostoon lämpötilassa 35 °C
COP: 4,6 (ei sisällä pumppaukseen tarvittavaa sähköä)
Lämpöteho: 500 kW
- Tilajäähdytyksen tuotto 7 / 12 °C verkostoon ja lauhdutus kaukolämpöverkostoon, menovesi 75 °C ja paluuvesi 45 °C
COP: 2,9 (ei sisällä pumppaukseen tarvittavaa sähköä)
Lämpöteho: 430 kW

2.5.4 Geoenergian hyödyntäminen energijärjestelmissä

Optimointiin valittiin sekä energiakaivoihin että energiapaaluihin pohjautuvat geoenergiajärjestelmät. Taulukon 2 mukaisesti energiakaivoja hyödynnetään järjestelmävaihtoehdoissa 4 – 6 sekä 12 – 15. Energiapaaluja hyödynnetään puolestaan järjestelmävaihtoehdoissa 16 – 22.

Geoenergiakenttä toimii energijärjestelmien yhteydessä puskurina: Rakennuksessa hyödyntämätön kaupan kylmän lauhde siirretään tiettyinä hetkinä geoenergiakenttään ja vastaavasti lämpöä kerätään lämpöpumpun avulla rakennuksen lämmitysverkostoihin tiettyinä hetkinä. Vapaajäähdytystä geoenergiakentästä saadaan jäähdytysverkostoihin talvella ja osittain välikausien aikana. Kaupan kylmän lauhteen isosta määrästä johtuen geonergiakenttä regeneroituu tehokkaasti kesän aikana, mistä johtuen lämpötilataso kentässä pysyy korkeahkona myös lämmityskauden aikana.

Simulointeja varten energiakaivojen ja energiapaalujen määrät kalibroitiin rakennuksen lämmitys- ja jäähdytysverkostojen sekä lämpöpumppujen muodostamien energiataseiden perusteella. Kalibroinnit tehtiin IDA ICE energiasimulointien pohjalta, geoenergiakentästä kerättyjen tai geoenergiakenttään syötettyjen tuntipohjaisten tehojen avulla. Kaivo- ja paalukentän mitoitus tehtiin puolestaan edellä mainittujen tuntipohjaisten tehoja perusteella GLHEPro geoenergiakenttien mitoitusohjelmalla. Mitoituksessa käytetyt parametrit on listattu taulukossa 3.

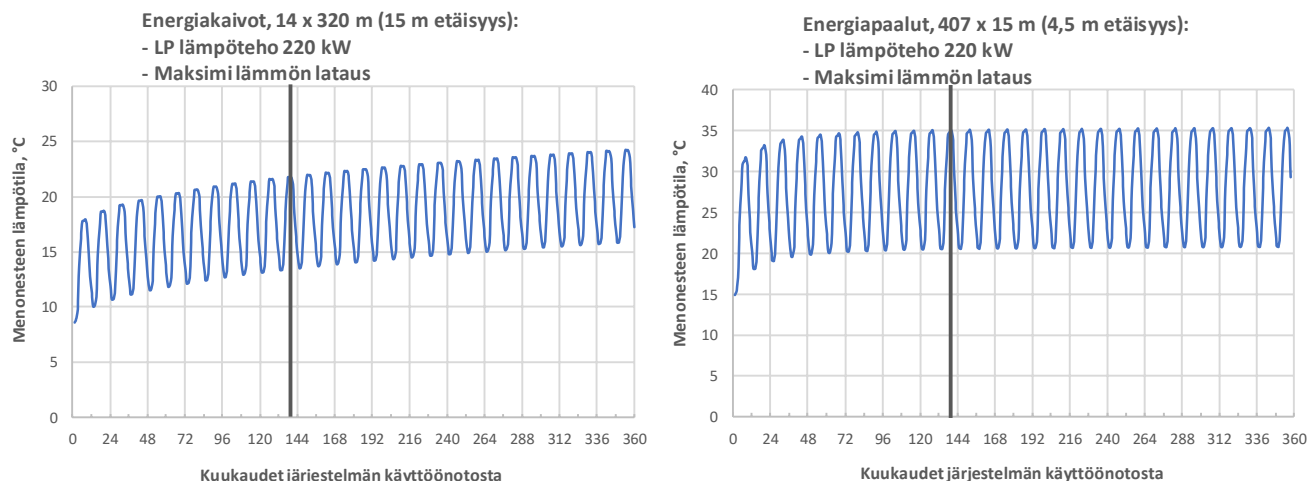
Taulukko 3. Taulukossa on esitetty energiakaivojen ja -paalujen mitoituksessa käytetyt laskentaparametrit GLHEPro ohjelmassa.

Muuttuja	Energiakaivot	Energiapaalut
Etäisyys porareikien välillä	15 m	4,5 m
Energiakaivojen / -paalujen syvyys	320 m	15 m
Ympäröivän maan lämmönjohtavuus	3,0 W/(mK)	1,3 W/(mK)
Ympäröivän maan volumetrinen ominaislämpökapasiteetti	2500 kJ/(K m ³)	1800 kJ/(K m ³)
Keskimääräinen maan lämpötila GLHEPro simuloinnissa	7 °C	13,5 °C
Mitoituksessa käytetty korkein menonesteen lämpötila geoenergiakenttään	25 °C	35 °C

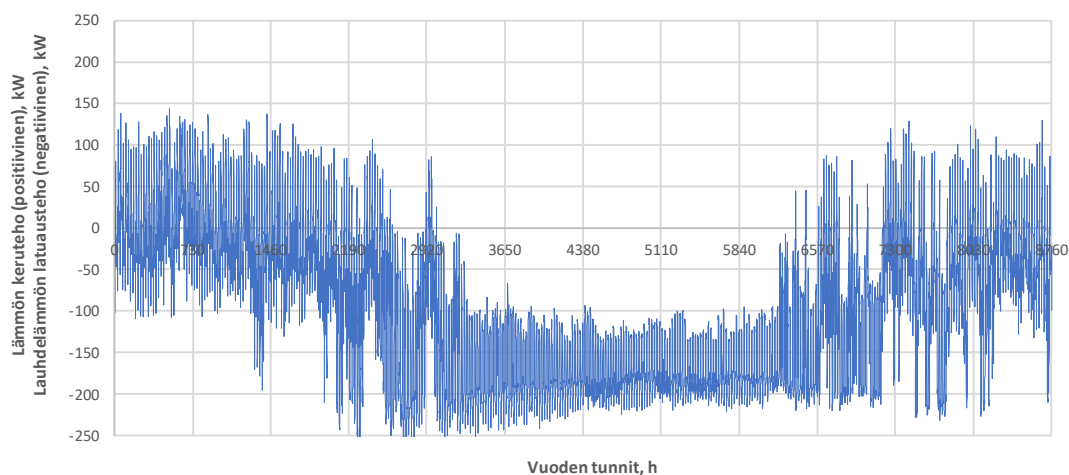
Energiakaivojen ja -paalujen mitoitus tehtiin kolmella lämpöpumppujärjestelmän teholla: Taulukon 2 mukaisesti järjestelmävaihtoehdot 4 – 6 ja 16 – 18. GLHEPro mitoitusohjelmien pohjalta geoenergiakenttää kuvaava malli IDA ICE energiasimulointiohjelmassa kalibroitiin siten, että lämmönkeruunesteen keskimääräinen lämpötilaprofiili geoenergiakentässä vastaa GLHEProssa simuloitua profiilia 10 – 15 kuluttua järjestelmän käyttöönotosta. Kalibroinnilla varmistettiin siten, että IDA ICE ohjelmassa simuloitu yksi vuosi vastaa keskimääräistä vuotta rakennuksen elinkaaren aikana.

GLHEPro simulointien tuloksia on havainnollistettu kuvassa 8 energiakaivokenttään sekä energiapaalukenttään syötettävän lämmönkeruunesteen menolämpötilan osalta. Tarkastelujakson pituus on 30 vuotta järjestelmän käyttöönotosta laskettuna ja lämpöpumpun lämpöteho on 220 kW. Kuvaajien merkintä ”Maksimi lämmön lataus” tarkoittaa, että rakennuksessa hyödyntämätön kaupan kylmän lauhteen energia lauhdutetaan kokonaisuudessaan geoenergiakenttään.

GLHEPro ohjelmassa hyödynnettäviä tuntipohjaisia lämmön keruu- ja lataustehoja on havainnollistettu kuvassa 9 esimerkiksi simuloinnin pohjalta.



Kuva 8. Kuvassa on esitetty GLHEPro ohjelmassa simuloitua lämmönkeruunesteiden menonesteiden lämpötilat energiakäivokentässä ja energiapaalukentässä. Tarkastelujakson pituus on 30 vuotta järjestelmän käyttöönotosta. Kuvaajiin on merkitty mustilla viivoilla energialaskentaan valittu keskimääräinen tarkasteluvuosi. Kuvaajista nähdään, että energiakäivokentän lämpötilaprofiili on nouseva vielä 30 vuoden kohdalla. Energiapaalukenttä saavuttaa toisaalta tasapainotilan jo noin 6 vuoden kuluttua järjestelmän käyttöönotosta.



Kuva 9. Kuvassa on esitetty GLHEPro ohjelmassa hyödynnettäviä tuntipohjaisia lämmön keruu- ja lataustehoja esimerkinomaisen energiakäivokentän mitoittamiseksi. Kuvasta nähdään, että energiakäivokentän energiatase on noin 5 kuukauden aikana negatiivinen (toukokuu – syyskuu). Eli tänä aikana energiakäivokenttään ladataan lähes koko ajan enemmän lämpöä kuin sieltä otetaan rakennuksen lämmitykseen.

2.5.5 Hukkalämmön myynti kaukolämpöverkkoon

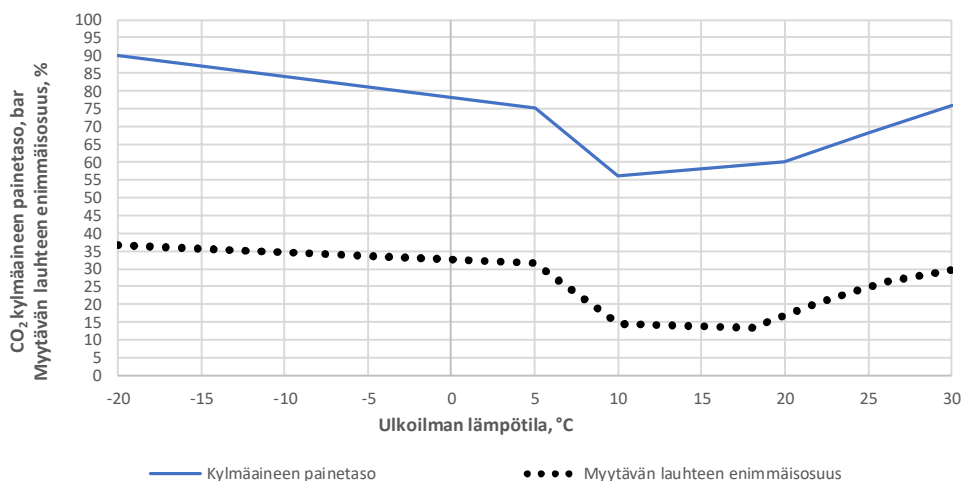
Hukkalämmön myymisen kannattavuutta kaukolämpöverkkoon selvitettiin optimointien lisäksi erillistarkasteluiden avulla. Erillistarkasteluilla selvitettiin missä laskentatapauksissa hukkalämmön myyminen on kannattavaa ja miten hukkalämmön myynti olisi järkevä toteuttaa, jotta erityisesti geoenergiakentällä varustettu kauppakeskuksen energiajärjestelmä toimii itsessään energiatehokkaasti.

Hukkalämmön myymistä kaukolämpöverkkoon tarkasteltiin kahdella vaihtoehtoisella tavalla:

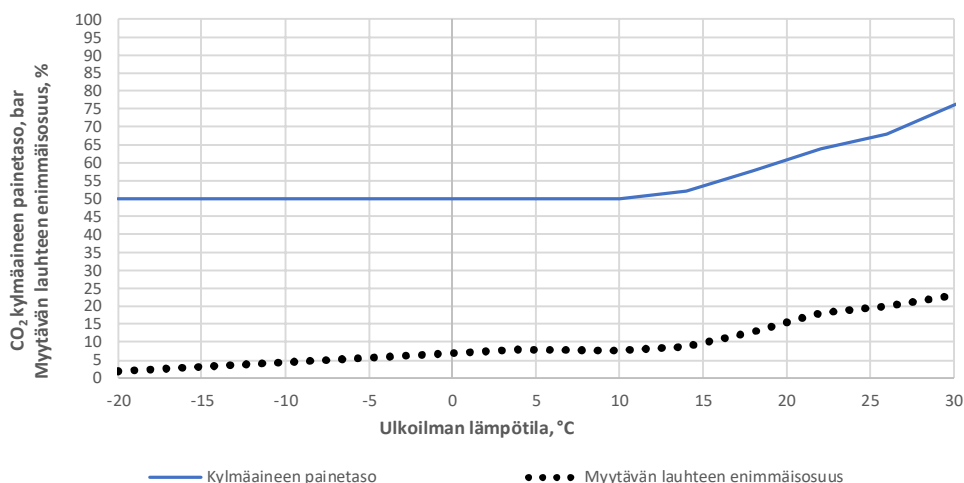
1. Kaupan kylmän lauhde-energian myynti CO₂ -kylmäkoneikon lämmönsiirtimestä
 - a. CO₂ -kylmäkoneikon painetason ohjaus on kuvien 3 ja 4 mukainen, jolloin käytettävä kylmäaineen painetaso määrittää myytävän lauhteen osuuden lauhteen kokonaismäärästä. Lauhdetta ei kuitenkaan myydä kaukolämpöverkkoon, jos lauhde voidaan hyödyntää rakennuksen lämmityksessä.
 - b. Energiakaivojen tai energiapaalujen yhteydessä vain osa kaupan kylmän lauhteesta voidaan myydä kaukolämpöverkkoon, jotta geoenergiakenttä ei jäähtyisi liikaa lämmityskauden aikana. Geoenergiakentän yhteydessä priorisoidaan oman rakennuksen energiatehokkuus.
2. Kaupan kylmän lauhde-energian myynti sekä CO₂ -kylmäkoneikon lämmönsiirtimestä, että korkean lämpötilan lämpöpumpun avulla. Simulointien avulla kartoitettiin kahden vaihtoehtoisen toimintatavan kannattavuutta.
 - a. Ensimmäisessä vaihtoehdossa kaupan kylmän lauhde-energiaa myydään sekä suoraan CO₂ -kylmäkoneikon lämmönsiirtimestä, että lämpöpumpun avulla IV-jäähdytystä tehtäessä. Simuloinneissa käytetty korkean lämpötilan lämpöpumppu, pystyy tuottamaan kaukolämpötoimittajan edellyttämää 75 °C lauhdetta kaukolämpöverkkoon. Ratkaisussa lämpöpumppujen vuotuinen toiminta-aika ei kasva, mutta toisaalta jäähdytystä IV-jäähdytysverkostoon tuotetaan heikommalla kylmäkertoimella kuin normaalissa tapauksessa.
 - b. Toisessa vaihtoehdossa käytettävissä oleva kaupan kylmän lauhde-energia myydään ensin suoraan CO₂ -kylmäkoneikon lämmönsiirtimen kautta ja loput hukkalämmöstä mahdollisuuksien mukaan korkean lämpötilan lämpöpumpun avulla. Lämpöpumppu tuottaa ensisijaisesti 75 °C lauhdetta IV-jäähdytyksestä, jotta vaadittu kylmä IV-jäähdytysverkostoon saadaan tuotettua. Jos lämpöpumpun kapasiteettia jää yli, tuotetaan 75 °C lauhdetta jäljelle jäävästä kaupan kylmän lauhteesta. Ratkaisu lisää merkittävästi lämpöpumppujen vuotuista käyttöaikaa ja siten sähköenergian kulutusta. Myytävää lauhde-energiaa saadaan kuitenkin tuotettua hyvällä hyötysuhteella kaupan kylmän lauhteesta.

Hukkalämmön myynnin simuloinneissa oletettiin, että kaukolämpöverkon paluuveden lämpötila vaihtelee ulkoilman lämpötilan mukaan 42 °C ja 55 °C välillä. Kaukolämmön paluuveden lämpötila on oletuksena alimmillaan (42 °C) ulkoilman lämpötilalla +7 °C ja korkeimmillaan (55 °C) ulkoilman lämpötiloilla -20 °C ja +30 °C. Sama kaukolämmön paluuvesi tulee oletuksena CO₂ -kylmäkoneikon myyntilämmönsiirtimelle sekä korkean lämpötilan lämpöpumpun lauhduttimelle.

Myytävän kaupan kylmän lauhde-energian enimmäisosuus CO₂ -kylmäkoneikon lauhde-energiasta on esitetty kuvassa 10 referenssijärjestelmälle ja kuvassa 11 lauhdelämpöpumppuja hyödyntäville energiajärjestelmille.



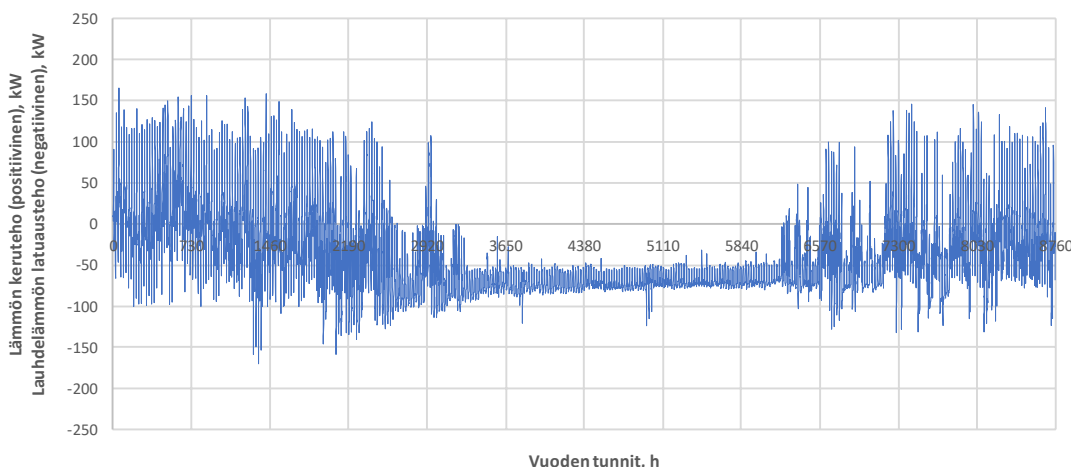
Kuva 10. Kuvassa on esitetty myytävän kaupan kylmän lauhteen enimmäisosuus CO₂-kylmäaineen painetasosta riippuen referenssijärjestelmän osalta.



Kuva 11. Kuvassa on esitetty myytävän kaupan kylmän lauhteen enimmäisosuus CO₂-kylmäaineen painetasosta riippuen lauhdelämpöpumppua hyödyntävien energiajärjestelmien osalta.

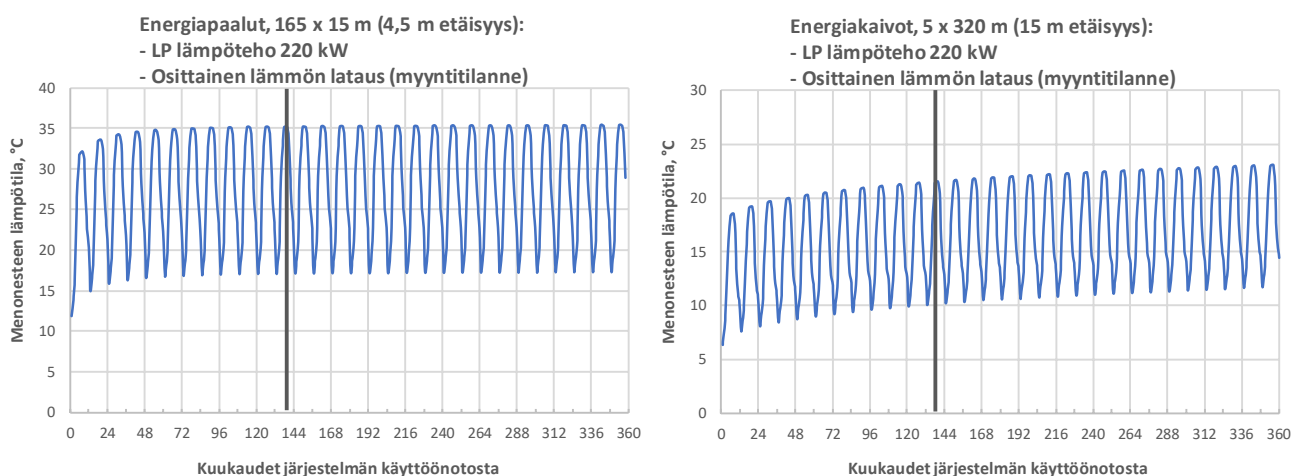
Geoenergiakenttää hyödyntävissä energiajärjestelmissä myytävän lauhteen määrää rajoittaa energiakaivojen tai -paalujen vaatima regenerointi kesäkuukausien aikana. Riittävällä regeneroinnilla varmistetaan simuloinnissa, että geoenergiakentän lämpötilataso ei ala laskemaan vuosien saatossa ja että rakennuksen energiatehokkuus pysyy hyvällä tasolla. Simuloinnissa priorisoitiin siten rakennuksen oma energiatehokkuus maksimaalisen myyntipotentiaalin sijaan.

GLHEPro ohjelmassa hyödynnettäviä tuntipohjaisia lämmön keruu- ja lataustehoja on havainnollistettu kuvassa 12 esimerkkisimuloinnin pohjalta, kun geoenergiakenttään ladattavan lämmön määrää on rajoitettu kesäkuukausien aikana.



Kuva 12. Kuvassa on esitetty GLHEPro ohjelmassa hyödynnettäviä tuntipohjaisia lämmön keruu- ja lataustehoja esimerkinomaisen energiakaivokentän mitoittamiseksi, kun hukkalämpöä myydään kaukolämpöverkkoon. Vertailemalla kuvaan 9 nähdään, että energiakaivokenttään ladattavan lämmön määrää on rajoitettu merkittävästi, jotta lämpöä voidaan myydä kaukolämpöverkkoon.

GLHEPro simulointien tuloksia lämmön myyntitilanteessa on havainnollistettu kuvassa 13 energiakaivokenttään sekä energiapaalukenttään syötettävän lämmönkeruunesteen menolämpötilan osalta. Tarkastelujakson pituus on 30 vuotta järjestelmän käyttöönotosta laskettuna ja lämpöpumpun lämpöteho on 220 kW.



Kuva 13. Kuvassa on esitetty GLHEPro ohjelmassa simuloidut lämmönkeruunesteen menonesteiden lämpötilat energiakaivokentässä ja energiapaalukentässä, kun hukkalämpöä myydään kaukolämpöverkkoon. Tarkastelujakson pituus on 30 vuotta järjestelmän käyttöönotosta. Kuvaajiin on merkitty mustilla viivoilla energialaskentaan valittu keskimääräinen tarkasteluvuosi. Kuvaajista nähdään, että energiakaivokentän lämpötilaprofiili on nouseva vielä 30 vuoden kohdalla. Energiapaalukenttä saavuttaa toisaalta tasapainotilan jo noin 4 vuoden kuluttua järjestelmän käyttöönotosta.

Hukkalämmön myynnin kannattavuutta arvioitiin kahdella eri hinnoittelumallilla koska Turku Energialle ei ollut toukuussa 2020 käytössä vielä omaa hinnoittelumallia. Turku Energialta saatujen tietojen perusteella vaatimus kaukolämmön menoputkeen syötettävälle lauhteelle tulee kuitenkin olemaan 75 °C lämpötila. Simuloinnissa käytetyt hinnoittelumallit pohjautuvat Helenin ja Fortumin kuukausipohjaisiin hukkalämmön ostohintoihin (€/MWh) Helsingin seudulla. Tarkastelluista hinnoittelumalleista Helenin malli edustaa maltillista ja Fortumin malli houkuttelevampaa korvausta. Lämmöntuottajalle maksettavat korvaukset kaukolämpöverkkoon tuotetusta lämmöstä on listattu taulukossa 4.

Taulukko 4. Taulukossa on esitetty simuloinnissa käytetyt hukkalämmön myynnin hinnoittelumallit (Helen ja Fortum Helsingin seudulla) kannattavuuden arvioimiseksi.

Kuukausi	Helenin hinnoittelu, €/MWh, alv. 0 %	Fortumin hinnoittelu, €/MWh, alv. 0 %
Tammikuu	37,21	45,00
Helmikuu	37,21	45,00
Maaliskuu	25,08	38,00
Huhtikuu	25,08	30,00
Toukokuu	11,25	20,00
Kesäkuu	11,25	20,00
Heinäkuu	11,25	16,00
Elokuu	11,25	20,00
Syyskuu	11,25	20,00
Lokakuu	28,22	24,00
Marraskuu	28,22	30,00
Joulukuu	28,22	40,00

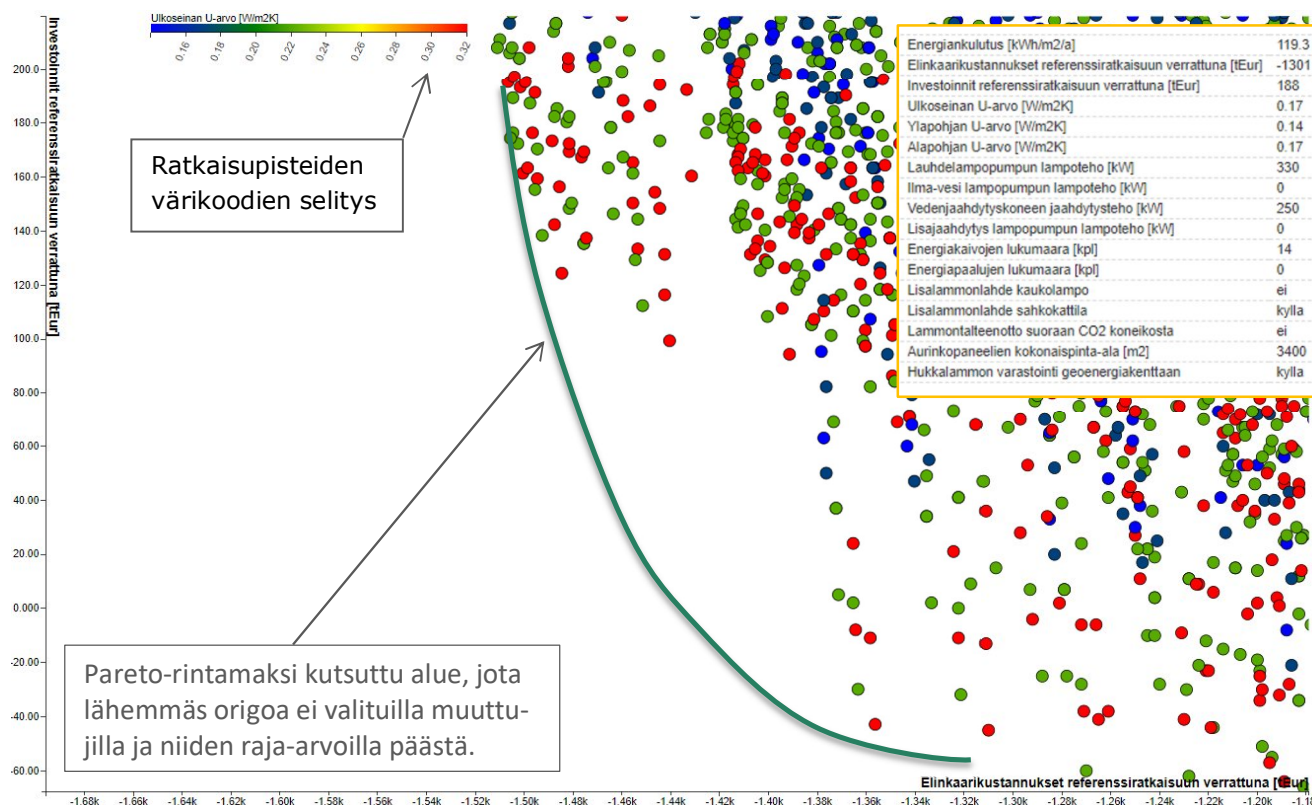
Hukkalämmön myynnistä saatavien korvausten lisäksi simuloinnissa oletettiin, että molemmissa hinnoittelumalleissa hukkalämmön myyjä maksaa kaukolämmön toimittajalle kiinteän kuukausimaksun 30,9 €/kk, alv. 0 % (pohjautuu Helenin hinnoitteluun) palvelun ylläpidosta.

2.6 Simuloinnin tulosten esitystapa

Laskentatulokset on esitetty kuvaajina ja taulukoituna. Kuvaajat on esitetty pistekuvaajina, joissa jokainen piste kuvastaa yhtä laskettua rakennusvaihtoehtoa. Nämä ratkaisupisteet on sijoitettu akselleille niiden elinkaarikustannusten nettonykyarvon, vuotuisen ominaisostoenergian kulutuksen tai investointikustannusten suhteen akselien nimien mukaisesti. Jokaisella ratkaisupisteellä on rakennuksen toimenpidevaihtoehtojen suhteen oma uniikki kokonaisuus. Rakennuksien tarkasteluajanjakson (20 vuoden) elinkaarikustannusten nettonykyarvot on määritetty simulointiohjelmalla kullekin pisteelle yhtenä kokonaissummana. Kuvaajista ei tämän takia pysty näkemään elinkaarikustannusten muodostumista vuosien mitaan.

Kuvan 14 selostuslaatikossa on havainnollistettu yhden satunnaisen ratkaisun ominaisuuksia, ja siitä on luettavissa mm. ratkaisun elinkaarikustannusten nettonykyarvo -1301 k€ referenssijärjestelmän kustannuksiin verrattuna, ulkoseinän U-arvo 0,17 W/m²K, aurinkopaneelien pinta-ala 3400 m² ja lisälämmönlähde sähkökattila. Kaikkien tulosten ominaisuudet voidaan esittää myös värikoodein, kuten kuvassa 14 on tehty ulkoseinien U-arvon suhteen.

Optimoinnissa pyrittiin minimoimaan elinkaarikustannuksia ja vuotuista ominaisenergiankulutusta, jolloin pyritään löytämään rakennuksien kokonaisratkaisu, jonka piste on mahdollisimman lähellä kuvan 14 origoa. Tällöin päädytään lopulta tilanteeseen, jossa energiankulutuksen pienentäminen johtaa välttämättä elinkaarikustannusten nousuun, koska kustannus- ja energiatehokkuus ovat keskenään ristiriitaisia tavoitteita. Tällöin muodostuu kuvassa 14 esitetty ns. Pareto-rintama, joka määrittää kuinka lähelle akselien leikkauskohdassa olevaa nollapistettä voidaan rakennukselle määritellyillä muuttujilla ja niiden raja-arvoilla päästä. Näitä Pareto-rintamalla olevia ratkaisupisteitä kutsutaan myös energiaoptimoinnin optimiratkaisuiksi.



Kuva 14. Kuvassa on esitetty osa energiaoptimoinnin ratkaisupisteistä. Vaaka-akselilla on rakennuksen elinkaarikustannusten nettonykyarvo 20 vuoden ajalle ja pystyakselilla investointikustannukset. Kustannukset on optimoinnissa suhteutettu referenssiratkaisun kustannuksiin (0 €). Kuvassa on esitetty satunnainen epäoptimaalinen ratkaisu ja sen ominaisuudet tulosten tulkintatavan havainnollistamiseksi.

3 Tulokset

3.1 Suositus valinnoiksi optimoinnin perusteella

Suosittelut talotekniikan ja rakenteiden suunnitteluratkaisut Virtanen Yhtiöt kauppakeskuksen uudisrakennukselle ovat:

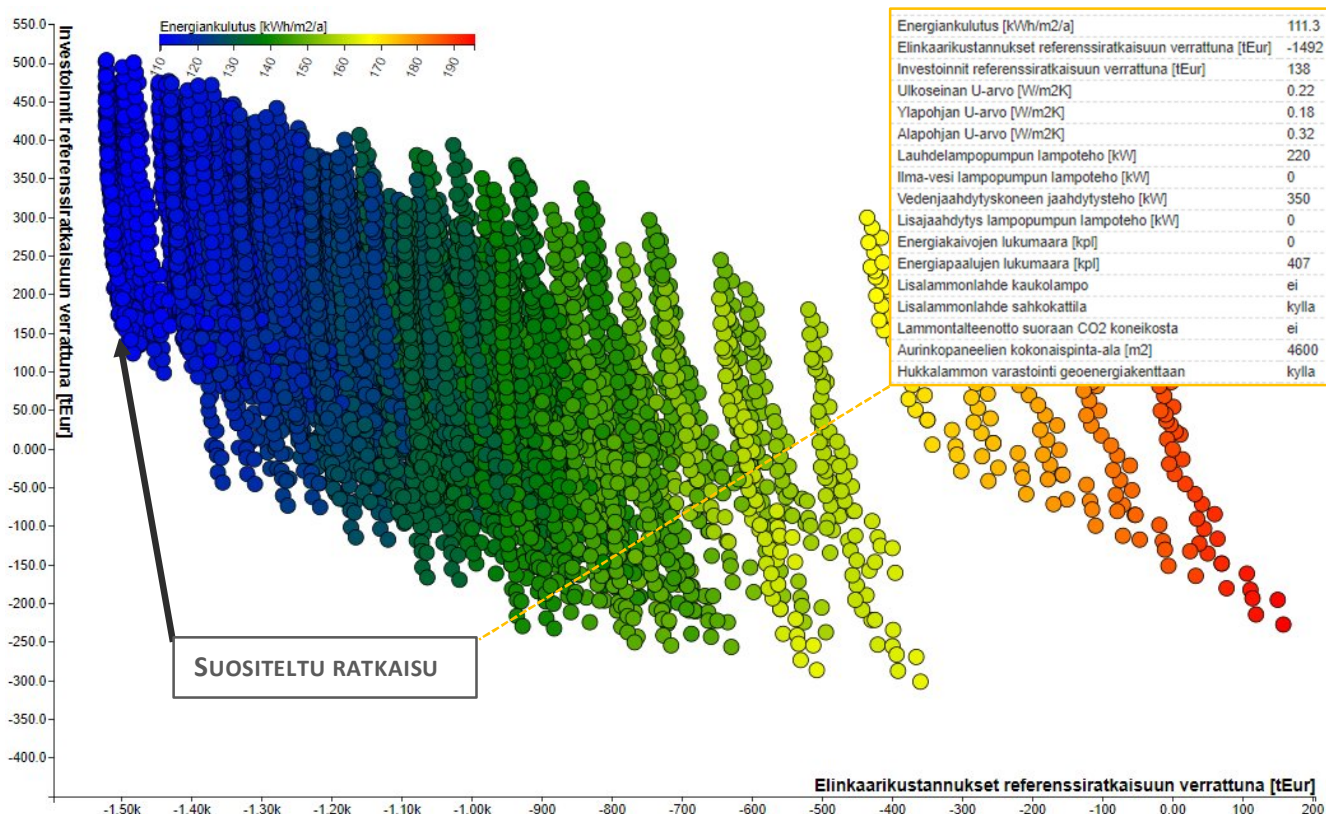
- ulkoseinän U-arvo on $\sim 0,22 \text{ W/m}^2\text{K}$
- yläpohjan U-arvo on $\sim 0,18 \text{ W/m}^2\text{K}$
- alapohja U-arvo on $\sim 0,32 \text{ W/m}^2\text{K}$
- aurinkosähköpaneelija asennetaan maksimimäärä $4\,600 \text{ m}^2$ ja rakennuksessa hyödyntämätön aurinkosähkö myydään sähköverkkoon
- kiinteistöön asennetaan lauhdelämpöpumppujärjestelmä, jonka nimellisteho on 200 kW
- kiinteistöjäähdytys tehdään sekä lauhdelämpöpumppujärjestelmällä että vedenjäähdytyskoneella, jonka teho on 350 kW
- hukkalämmön myynti kaukolämpöverkkoon on kannattavaa, jos hukkalämmön hinnoitteluperuste on lähellä Fortumin pääkaupunkiseudun hintatasoa
 - hukkalämpöä on suositeltava myydä kaukolämpöverkkoon lämpöpumpulla, joka pystyy tuottamaan korkeita lämpötiloja, noin $75 \text{ }^\circ\text{C}$. Suositeltavassa ratkaisussa korkean lämpötilan lämpöpumppu tuottaa kiinteistöjäähdytystä ja syntyvää lauhdetta myydään korkeassa lämpötilatasossa kaukolämpöverkkoon.
 - osa kaupan kylmän lauhteesta on suositeltavaa myydä CO_2 -kylmäkoneikon lämmönsiirtimen kautta
- kiinteistössä hyödynnetään energiapaaluihin pohjautuvaa geoenergiajärjestelmää, jos rakennus perustetaan joka tapauksessa paalujen varaan.
 - tarvittava energiapaalujen määrä on noin 400 kpl , jos hukkalämpöä ei päätetä myydä kaukolämpöverkkoon. Toteutusratkaisussa rakennuksessa hyödyntämätön kaupan kylmän lauhte siirretään kokonaisuudessaan geoenergiakenttään.
 - tarvittava energiapaalujen määrä on noin 160 kpl , jos hukkalämpöä myydään kaukolämpöverkkoon. Toteutusratkaisussa osa kaupan kylmän lauhteesta siirretään geoenergiakenttään, jotta varmistetaan geoenergiakentän riittävä lämpötilataso ja siten rakennuksen energiajärjestelmän energiatehokkuus.
- rakennuksen lisälämmönlähteeksi valitaan sähkökattila, jos hukkalämpöä ei päätetä myydä kaukolämpöverkkoon. Hukkalämmön myynnin yhteydessä liitetään paikalliseen kaukolämpöverkkoon.

Näiden muuttujien tarkempi analyysi on esitetty kappaleessa 3.4 ja hukkalämmön myynnin kannattavuutta on tarkasteltu kappaleessa 3.3.

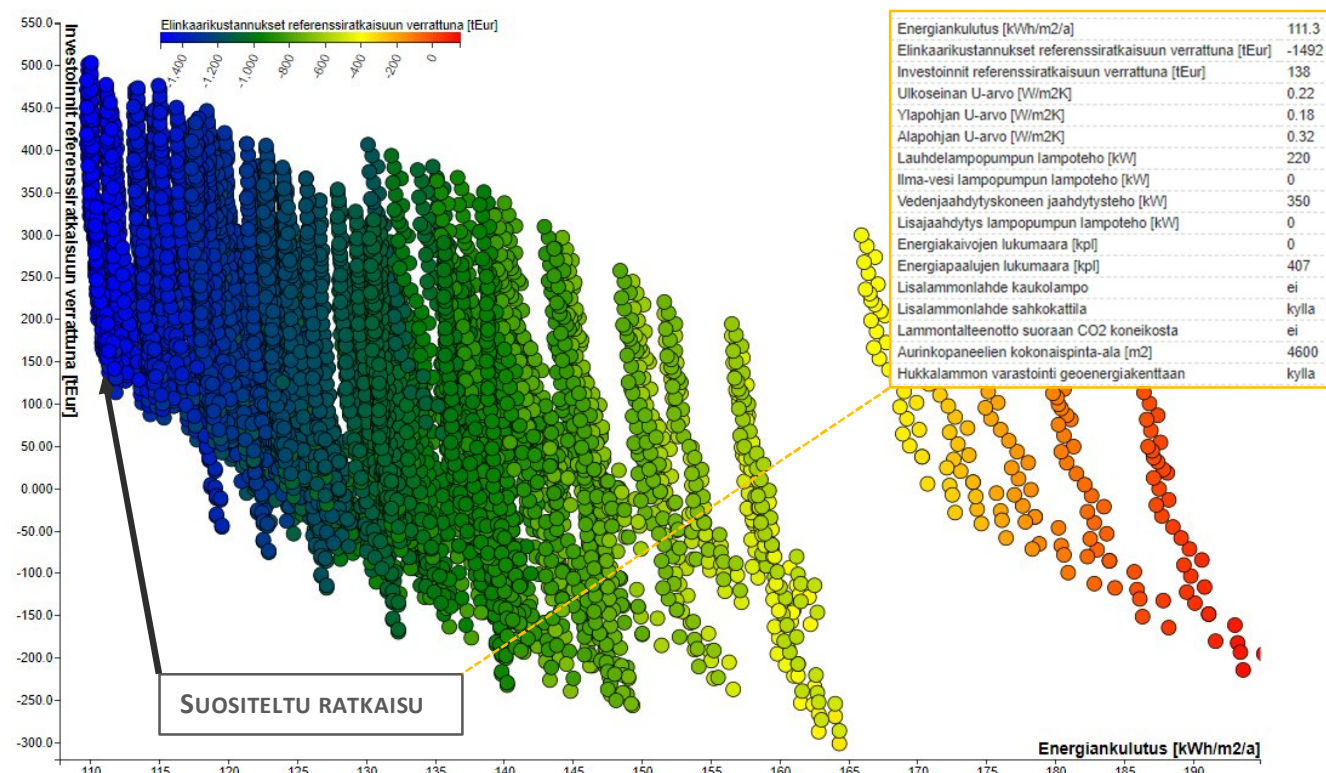
3.2 Yhdistetyt optimitulokset tavoite-energiankulutuksen laskennassa

Kuvissa 15 ja 16 on esitetty optimoidun järjestelmän elinkaari- ja investointikustannukset suhteutettuna referenssijärjestelmän kustannuksiin sekä energiankulutukset. Kuvien tuloksiin ei ole sisällytetty ratkaisuja, joissa hukkalämpöä myydään kaukolämpöverkkoon. Näitä ratkaisuja on käsitelty raportin kappaleessa 3.3.

Kuvassa 15 esitettyjen tulosten perusteella havaittiin, että referenssijärjestelmän kustannuksiin suhteutetut elinkaarikustannukset vaihtelevat $+0,16 - -1,52$ miljoonan euron välillä ja investointikustannukset $+0,50 - -0,30$ miljoonan euron välillä. Energiankulutus vaihtelee rakennuksessa $110 - 196 \text{ kWh/m}^2, \text{v}$ välillä ratkaisuvaihtoehdosta riippuen. Lauhdelämpöpumpulla varustettujen energiajärjestelmien osalta energiankulutuksen vaihteluväli supistuu $110 - 164 \text{ kWh/m}^2, \text{v}$. Ominaisenergiankulutusta laskettaessa on käytetty kauppakeskuksen laskennallista pinta-alaa 12658 m^2 .



Kuva 15. Optimoitiprosessin kaikki ratkaisut esitetty kuvaajana elinkaari- ja investointikustannusten suhteen. Ratkaisupisteet on väritetty energiankulutuksen mukaan. Kuvaan merkitty suositeltava ratkaisu edustaa energiajärjestelmää, jossa hukkalämpöä ei myydä kaukolämpöverkkoon.



Kuva 16. Optimoitiprosessin kaikki ratkaisut esitetty kuvaajana energiankulutuksen ja investointikustannusten suhteen. Ratkaisupisteet on väritetty elinkaarikustannusten perusteella. Kuvaan merkitty suositeltava ratkaisu edustaa energiajärjestelmää, jossa hukkalämpöä ei myydä kaukolämpöverkkoon.

Taulukossa 5 on esitetty referenssiratkaisun ja suositellun optimiratkaisun ominaisuudet ilman hukkalämmön myyntiä kaukolämpöverkkoon. Käytönaikaisiin kustannuksiin sisältyy energiakustannusten lisäksi energiajärjestelmien huolto- ja uusimistoimenpiteet. Kuvissa esitetyllä suositellulla ratkaisulla on referenssiratkaisuun nähden:

- 1,5 miljoonaa euroa pienempi elinkaarikustannusten nettoarvo
- 140 000 € suuremmat investointikustannukset
- 77 kWh/m² pienempi ostoenergian kulutus
- 54,1 kWh/m² pienempi kaukolämmön kulutus
- 22,2 kWh/m² pienempi sähköenergian kulutus
- alle kahden vuoden takaisinmaksuaika.

Taulukossa 5 on esitetty myös muutama muu vaihtoehtoinen ratkaisu:

- Pienempi investointi: pienempää alkuinvestointia painottava ratkaisu, johon ei sisälly hukkalämmön varastointia geoenergiakenttään. Ratkaisussa hyödynnetään ilma-vesilämpöpumppua lisälämmön ja lisäjäähdetyksen tuottamiseksi rakennukseen lauhdelämpöpumppujen rinnalla. Järjestelmä on investointikustannuksiltaan edullinen johtuen siitä, että erillistä vedenjäähdytyskonetta ei tarvita ja lisäksi säästetään merkittävästi eristyskustannuksissa referenssijärjestelmään verrattuna.
- Yksinkertainen toteutus: mahdollisimman yksinkertaista toteutustapaa painottava ratkaisu, joka hyödyntää suuri-tehoista ruuvikompressorin pohjautuvaa lämpöpumppua ja energiapaaluja. Ratkaisulla tuotetaan samalla laitteella rakennuksen tarvitsema lämmitys ja jäähdytys kokonaisuudessaan, osittain energiatehokkuuden kustannuksella.
- Hukkalämmön myynti Fortumin hinnoittelulla: ratkaisu on elinkaarikustannuksiltaan hyvin kannattava mutta investointikustannukset ovat vastaavasti korkeat. Hukkalämmön myyntiratkaisu on houkuttelevin vaihtoehto edellyttäen, että hukkalämmön myynnistä saatava korvaus on lähellä Fortumin pääkaupunkiseudun hinnoittelua. Ratkaisuvaihtoehdon suositteleminen vaatii kuitenkin lisäselvittelyä Turun alueella toteutuvan hukkalämmön hinnoittelun osalta.

Taulukko 5. Referenssiratkaisun ja esiin nostettujen suositeltujen ratkaisuvaihtoehtojen ominaisuudet taulukoituna. Suositelluista ratkaisuista on esitetty matalia elinkaarikustannuksia, matalampaa alkuinvestointia sekä yksinkertaista toteutusta painottavat ratkaisukonseptit. Näiden ratkaisujen vieressä on esitetty hukkalämmön myyntiratkaisu. Elinkaari- ja investointikustannukset on korostettu taulukossa sinisellä värillä.

Muuttuja	Referenssi	Elinkaari-kustannusten minimi	Pienempi investointi	Yksinkertainen toteutus	Hukkalämmön myynti Fortumin hinnoittelulla
Elinkaarikustannukset [k€] * ¹	0	-1492	-1356	-1342	-1567
Investointikustannukset [k€] * ¹	0	138	-43	71	173
Lisälämmönlähteen kulutus [kWh/m ² a]	56,2	2,1	0,1	0	0
Sähköenergian kulutus [kWh/m ² a]	131,4	109,2	119,4	120,2	113,1
Energiankulutus yhteensä [kWh/m ² a]	187,6	111,3	119,5	120,2	113,1
Takaisinmaksuaika [vuotta]	0	alle 2 vuotta	< 0	noin 1 vuosi	noin 2 vuotta
Ulkoseinän U -arvo [W/m ² K]	0,17	0,22	0,32	0,32	0,32
Yläpohjan U -arvo [W/m ² K]	0,09	0,18	0,18	0,18	0,18
Alapohjan U -arvo [W/m ² K]	0,17	0,32	0,32	0,32	0,32
Lauhdellämpöpumpun (LLP) nimellisteho [kW]	-	200	200	600	200 kW + 450 kW (myynti)
Ilma-vesi lämpöpumpun IVLP nimellisteho [kW]	-	-	330	-	-
Kiinteistöjäähdytyksen toteutustapa	VJK 550 kW	VJK 350 kW	lämpöpumppu	lämpöpumppu	lämpöpumppu
Hukkalämmön varastointi	ei	kyllä	ei	kyllä	kyllä
Hukkalämmön varastointitapa	-	energiapaalut 407 kpl	-	energiapaalut 407 kpl	energiapaalut 165 kpl
Rakennuksen lisälämmönlähte	kaukolämpö	sähkökattila	sähkökattila	-	-
Aurinkosähköjärjestelmän koko [m ²]	2200	4600	4600	4600	4600

*¹) Sisältää lämpöpumppu- ja aurinkosähköjärjestelmän huoltokustannukset ja elinkaaren aikaiset korjaustoimenpiteet

3.3 Hukkalämmön myynti kaukolämpöverkkoon

Kuvissa 18 – 25 on esitetty hukkalämmön myynnin kustannusvaikutuksia 20 vuoden tarkastelujakson aikana sekä miten hukkalämmön myynti vaikuttaa rakennuksen ostoenergiankulutukseen.

Eri toteutusratkaisujen kokonaiskustannukset 20 vuoden ajalta on esitetty kuvassa 17, kun eristysratkaisut on vakioitu (ulkoseinä 0,32 W/m²K, yläpohja 0,18 W/m²K ja alapohja 0,32 W/m²K) ja aurinkopaneelien pinta-ala on 4600 m². Kaikissa vertailun lämpöpumppuratkaisuissa on 330 kW lauhdelämpöpumppu ja 250 kW vedenjäähdytyskone sekä energiakaivot, 14 kpl tai 5 kpl (maksimaalinen hukkalämmön lataus tai osittainen hukkalämmön lataus energiakaivoihin). Vertailukohtana on referenssiratkaistu (ulkoseinä 0,17 W/m²K, yläpohja 0,09 W/m²K ja alapohja 0,17 W/m²K), jossa käytetään vertailun vuoksi samaa aurinkopaneelien pinta-alaa 4600 m² (normaalissa referenssiratkaisussa 2200 m²). Laskentatulokset on suhteutettu referenssiratkaisun kustannuksiin, jolloin pienin kokonaiskustannus edustaa kustannusoptimaalia ratkaisua.

Vastaava vertailu ilman energiakaivoja on esitetty kuvassa 18 (pelkkä energiankierrätysjärjestelmä).

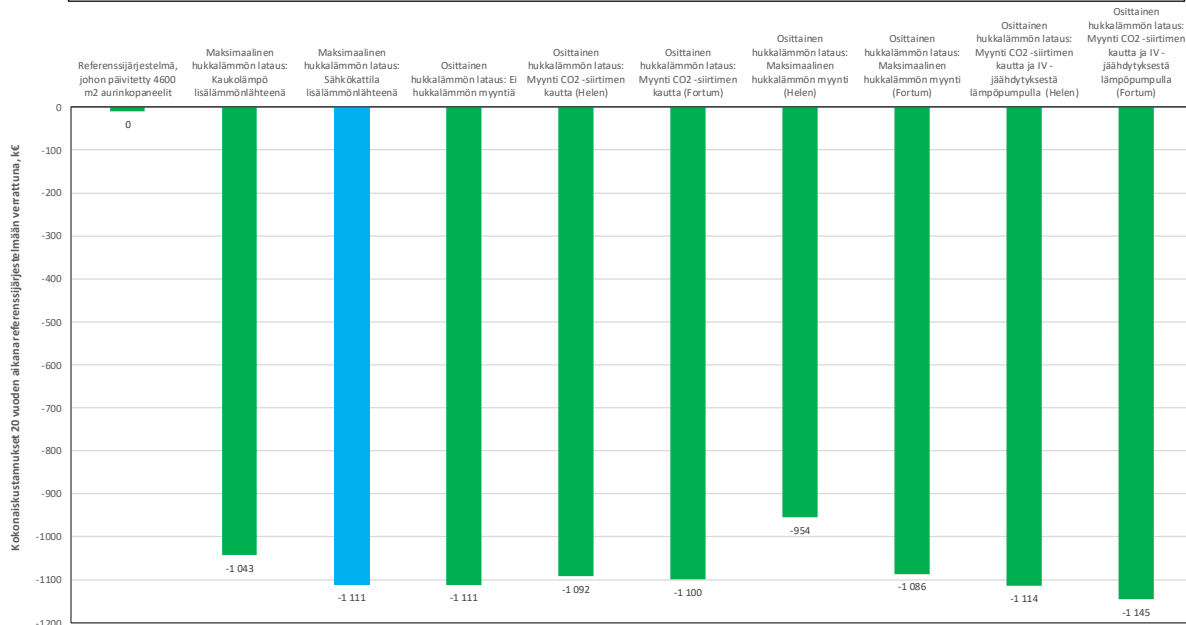
Kuvassa 19 on esitetty valikoituja ratkaisuja lasketuista ratkaisuvaihtoehtoista, tarkoituksena havainnollistaa hukkalämmön myynnin ja energijärjestelmän mitoituksen kustannusvaikutuksia. Kuvasta nähdään mitkä toteutusratkaisut ovat rakennuksen elinkaaren aikana optimaalisia ratkaisuja. Valittujen ratkaisujen tekniset tiedot sekä laskentatulokset on lisätty kehystetyissä laatikoissa kuvan reunalla. Kuvissa 19 – 25 on vertailtu yksittäisten osatekijöiden vaikutusta elinkaarikustannuksiin ja ostoenergiankulutukseen. Kuvissa on nostettu esiin erityisesti elinkaarikustannuksiltaan houkuttelevia ratkaisuja. Investointi- ja elinkaarikustannukset on ilmoitettu yksikössä k€ ja kustannukset on suhteutettu referenssijärjestelmän kustannuksiin (investointi- ja elinkaarikustannukset 0 €).

Hukkalämmön myynnin erillistarkasteluista nähdään, että rakennuksen elinkaaren aikana kustannusoptimaaliseksi ratkaisuksi muodostuu hukkalämmön myynti sekä CO₂ -kylmäkoneikon lämmönsiirtimen kautta että IV -jäähdytyksen lauhteesta lämpöpumpun avulla. Ratkaistu on optimaalinen molemmilla tarkastelluilla hukkalämmön hinnoittelumalleilla (Helen ja Fortum), mutta erityisen houkuttelevampi Fortumin hinnoittelulla. Hukkalämmön maksimaalinen myynti kaukolämpöverkkoon on Fortumin hinnoittelumallilla myös kustannustehokkaampi vaihtoehto kuin hukkalämmön maksimaalinen lataus geoenergiakenttään edellyttäen, että lisälämmönlähde on kaukolämpö. Hukkalämmön maksimaalinen lataus geoenergiakenttään on toisaalta hyvin kustannustehokas vaihtoehto, jos rakennuksen lisälämmönlähteeksi valitaan sähkökattila.

Hukkalämmön myynti kaukolämpöverkkoon pelkän energiankierrätysjärjestelmän yhteydessä ei ole käytetyillä kaukolämmön ja sähkön hinnoilla kannattavaa, jos vertailukohtana on energiankierrätysjärjestelmä ja lisälämmönlähteenä on sähkökattila. Myynti kaupan kylmän CO₂ -siirtimen kautta on toisaalta kannattavaa, jos kaukolämpöliittymä valitaan joka tapauksessa rakennukseen. Myynti CO₂ -siirtimen kautta parantaa myös kaupan kylmäjärjestelmän energiatehokkuutta ke-sällä ja ilman hukkalämmön varastointia hukkalämpöä voidaan myydä suhteessa enemmän.

Kaikissa ratkaisuissa vertailun vuoksi:

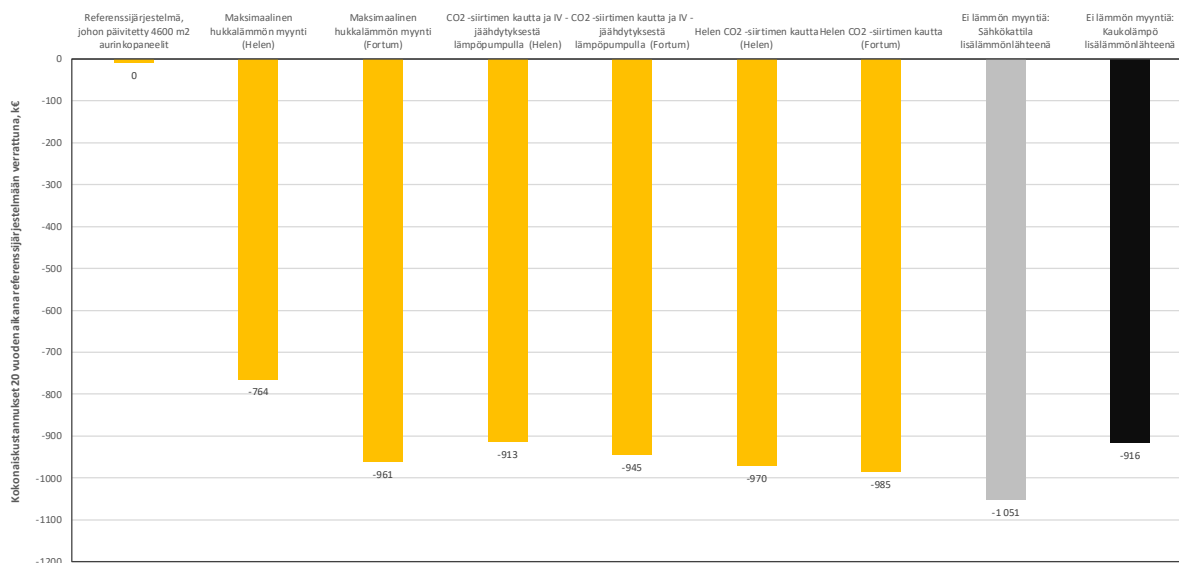
- energiakaivot
- sama eristystaso
- aurinkopaneelien pinta-ala 4600 m²



Kuva 17. Hukkalämmön varastoinnin ja myynnin erilaiset ratkaisumallit ja näiden vaikutukset kokonaiskustannuksiin 20 vuoden aikana. Kokonaiskustannukset sisältävät rakennuksen elinkaarikustannukset 20 vuoden ajalta sekä investointikustannukset. Vertailukohtana on referenssijärjestelmä, johon on lisäksi päivitetty 4600 m² aurinkopaneelit. Vihreän värisissä ratkaisuissa on kaukolämpö lisälämmönlähteenä ja sinisessä ratkaisussa sähkökattila.

Kaikissa ratkaisuissa vertailun vuoksi:

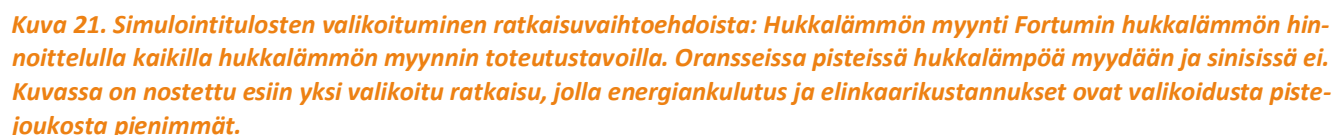
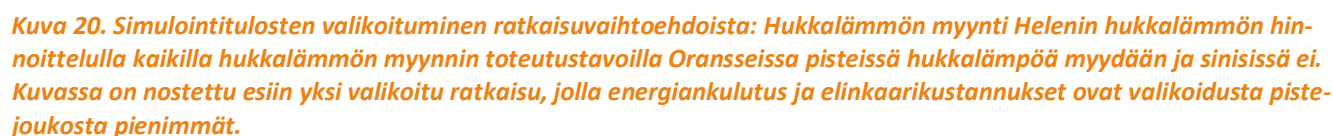
- ei hukkalämmön varastointia geoenergiakenttään
- sama eristystaso
- aurinkopaneelien pinta-ala 4600 m²

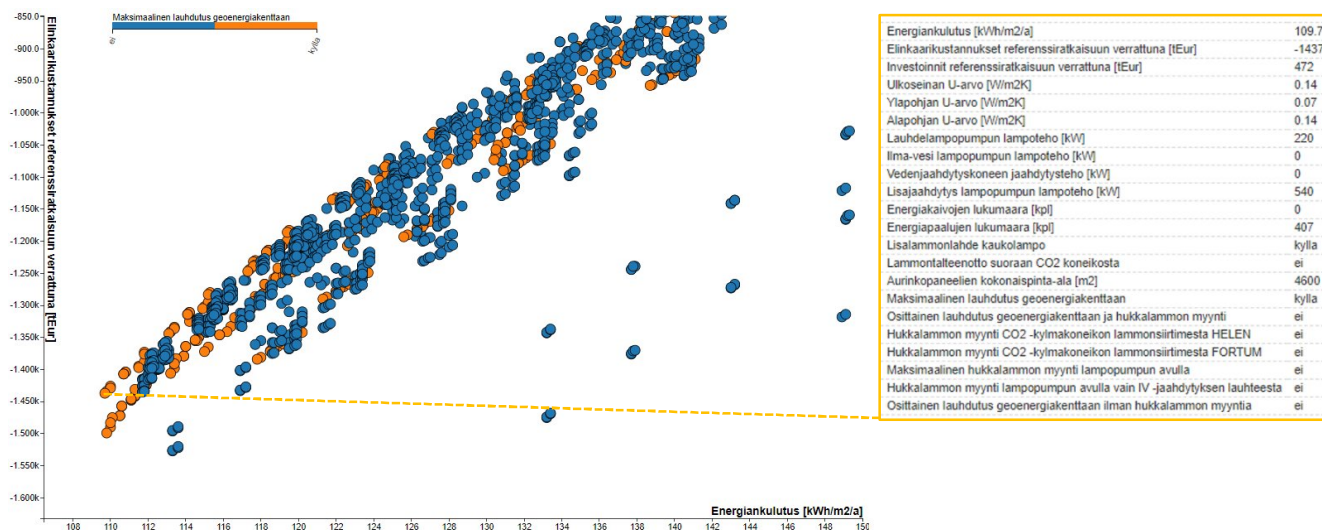


Kuva 18. Hukkalämmön myynnin erilaiset ratkaisumallit pelkän energiankierrätysjärjestelmän yhteydessä ja vaikutukset kokonaiskustannuksiin 20 vuoden aikana. Kokonaiskustannukset sisältävät rakennuksen elinkaarikustannukset 20 vuoden ajalta sekä investointikustannukset. Vertailukohtana on referenssijärjestelmä, johon on lisäksi päivitetty 4600 m² aurinkopaneelit. Oranssin värisissä hukkalämmön myyntiratkaisuissa on kaukolämpö lisälämmönlähteenä. Harmaan värisessä vertailuratkaisussa ilman hukkalämmön myyntiä on sähkökattila ja mustassa vastaavasti kaukolämpö.

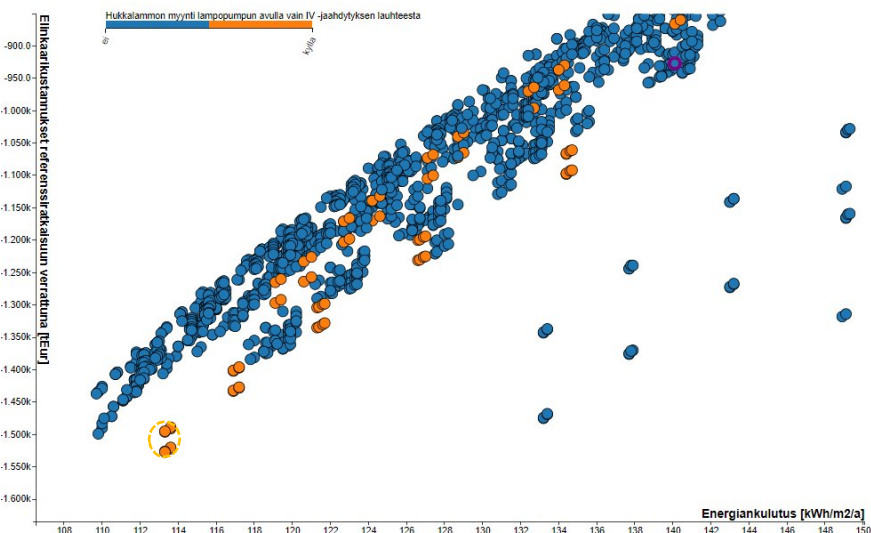


Kuva 19. Kuvassa on esitetty referenssiratkaisuun suhteutetut investointikustannukset elinkaarikustannusten funktiona, kun hukkalämmön myynnin kannattavuutta vertaillaan. Pienin energiankulutus on esitetty sinisellä värillä ja suurin punaisella värillä. Esiin nostettujen ratkaisuiden 1 ja 2 välillä nähdään hukkalämmön myynnin kustannusvaikutukset, jos hukkalämpöä myydään suoraan CO₂-kylmäkoneikon lämmönsiirtimen kautta kahdella eri hinnoittelumallilla (Helen ja Fortum). Ratkaisu 3 on muuten sama kuin ratkaisut 1 ja 2, mutta hukkalämpöä ei myydä kaukolämpöverkkoon. Ratkaisussa 4 hukkalämpöä myydään maksimaalisesti kaukolämpöverkkoon lämpöpumpun avulla. Ratkaisussa 5 hukkalämpöä myydään sekä suoraan CO₂-kylmäkoneikon lämmönsiirtimen kautta, että lämpöpumpun avulla IV-jäähdytyksen lauhdesta. Esiin nostetuista toteutusvaihtoehdoista elinkaarioptimaaliseksi ratkaisuksi muodostuu ratkaisu 5.

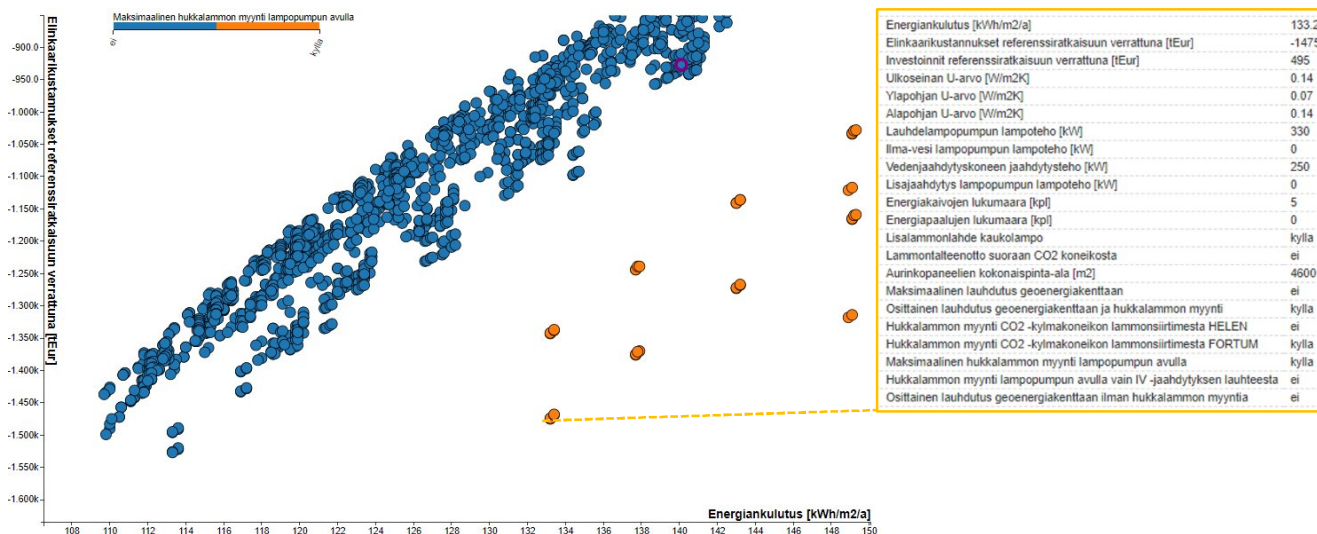




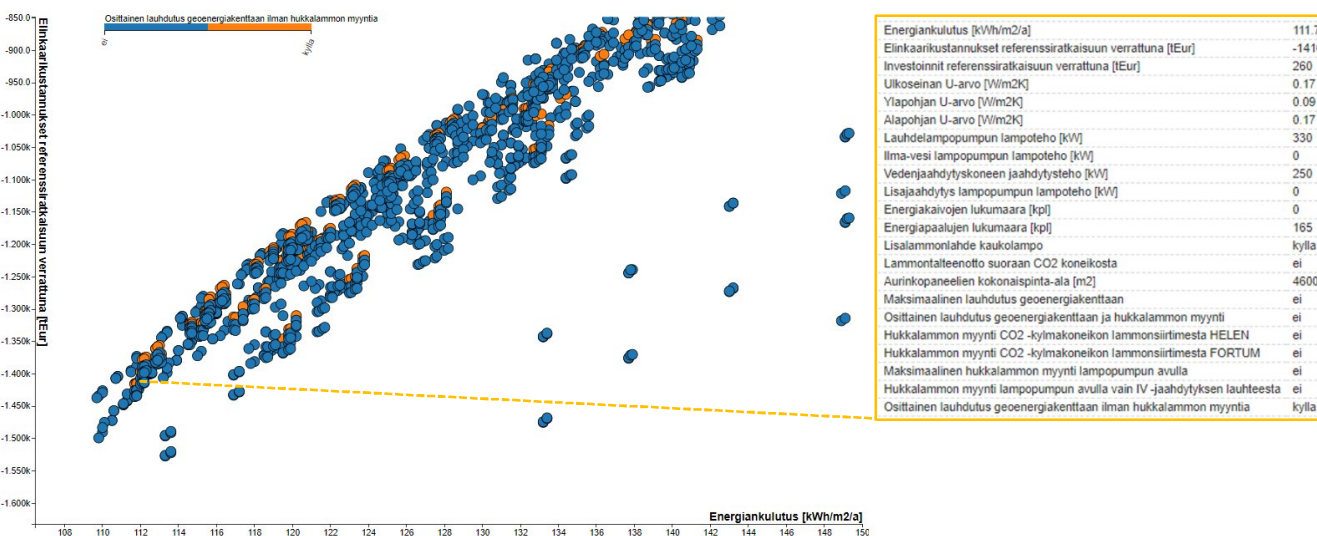
Kuva 22. Simulointitulosten valikoituminen ratkaisuvaihtoehdoista: Maksimaalinen hukkalämmön lauhdutus geoeenergiakenttään ilman hukkalämmön myyntiä kaukolämpöverkkoon. Oransseissa pisteissä hukkalämpö lauhdutetaan maksimaalisesti geoeenergiakenttään ja sinisissä ei. Kuvassa on nostettu esiin yksi valikoitu ratkaisu, jolla energiankulutus on pienin.



**Kuva 23. Simulointitulosten valikoituminen ratkaisuvaihtoehdoista: Hukkalämmön myynti CO₂ -kylmäkoneikon lämmönsiirtimestä ja IV -jäähdytyksen lauhteesta lämpöpumpun avulla. Oransseissa pisteissä hukkalämpöä myydään lämpöpumpun avulla ja sinisissä ei. Kuvaan ympyröidyissä ratkaisuissa elinkaari-kustannukset ovat pienimmät kaikista laske-
tuista ratkaisuvaihtoehdoista.**



Kuva 24. Simulointitulosten valikoituminen ratkaisuvaihtoehtoista: Hukkalämmön myynti CO₂ -kylmäkoneikon lämmönsiirtimestä sekä IV -jaahdytyksen lauhdeesta että jäljelle jäävästä kaupan kylmän lauhdeesta lämpöpumpun avulla. Oransseissa pisteissä hukkalämpöä myydään maksimaalisesti lämpöpumpun avulla ja sinisissä ei. Kuvassa on nostettu esiin yksi valikoitu ratkaisu, jolla energiankulutus ja elinkaarikustannukset ovat valikoidusta pistejoukosta pienimmät.



Kuva 25. Simulointitulosten valikoituminen ratkaisuvaihtoehtoista: Osoittainen lämmön lataus geoenergiakenttään ilman yli jäävän hukkalämmön myyntiä kaukolämpöverkkoon. Oranssit pisteet edustavat valittua toteutustapaa ja siniset eivät. Kuvassa on nostettu esiin yksi valikoitu ratkaisu, jolla energiankulutus ja elinkaarikustannukset ovat valikoidusta pistejoukosta pienimmät.

3.4 Optimointitulosten muuttujakohtainen analysointi

Optimoinnin yksittäisiä muuttujia on analysoitu kappaleissa 3.4.1 – 3.4.7. Jokaisen muuttujan kohdalla on esitetty suosituksia kustannustehokkaasta mitoituksista.

3.4.1 Lämpöpumpputyypin tyyppi ja mitoitus

Optimoinnissa tutkittiin lämpöpumpputyypin kannattavuutta erilaisten energiarakenteiden yhteydessä. Osa järjestelmistä pohjautuu vain energian kierrätykseen rakennuksen hukkalämpöä hyödyntämällä, osa energian kierrätykseen ja ilma-vesilämpöpumpputyypin ja osa sekä energian kierrätykseen että hukkalämmön varastointiin. Energiarakenteissa muutujana on myös tila- ja IV-lämmityksen tuottaminen joko lämpöpumpuilla ja vedenjäähdytyskoneella tai ainoastaan lämpöpumpuilla. Kuviin 26 – 30 on esitetty, miten yksittäiset muuttujat vaikuttavat energiankulutukseen ja kustannuksiin.

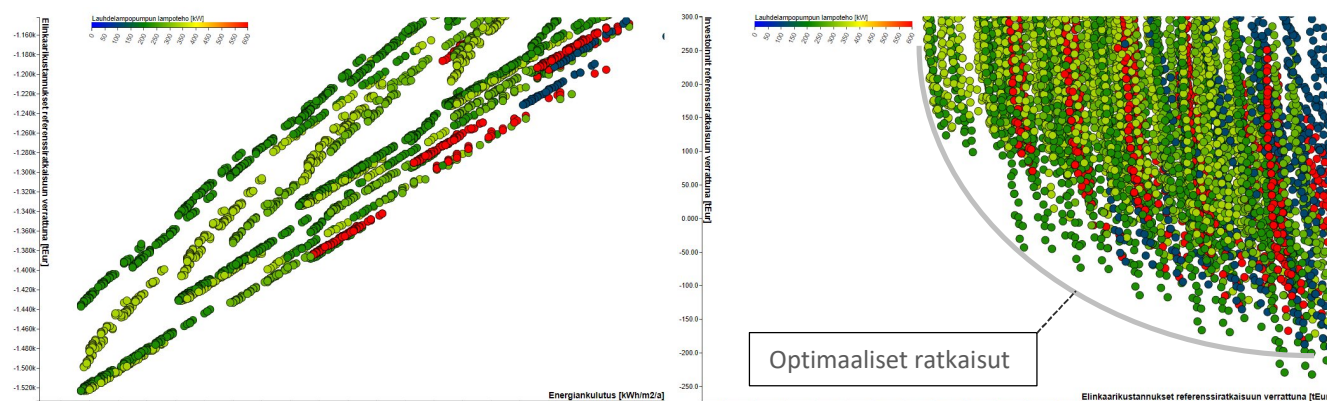
Kuvista nähdään, että optimaalinen lämpöteho lauhdelämpöpumpulle on tutkituista vaihtoehdoista 200 – 300 kW. Rakennuksen elinkaaren aikana optimaalinen lämpöteho on 200 kW mutta ero tehokkaampaan vaihtoehtoon on hyvin pieni. Lisäjäähdytystä tuottavan lämpöpumpun yhteydessä saavutetaan pienin mahdollinen energiankulutus noin 110 kWh/m²/a, kuitenkin suhteellisen korkeilla investointikustannuksilla. Edellä mainitussa kombinaatiossa lauhdelämpöpumpun nimellisteho on 300 kW ja lisäjäähdytystä tuottavan lämpöpumpun lämpöteho 400 kW. Suurehko ruuvikompressoripohjainen lämpöpumppu (lämpöteho 600 kW), joka tuottaa rakennukseen sekä lämmitystä että jäähdytystä ei valikoidu kustannusoptimaaliseksi ratkaisuksi. Pelkässä energiankierrätysjärjestelmässä ratkaisu on kuitenkin kaikissa yksinkertaisuudessaan hyvä kompromissi energiatehokkuuden ja kustannusten välillä. Pelkässä energiankierrätyskäytössä alin saavutettava energiankulutus järjestelmällä on 120 kWh/m²/a.

Vedenjäähdytyskoneetta hyödyntävissä ratkaisuissa optimaaliseksi jäähdytystehoksi valikoitui 350 kW, kun lauhdelämpöpumpun nimellinen lämpöteho on 200 kW.

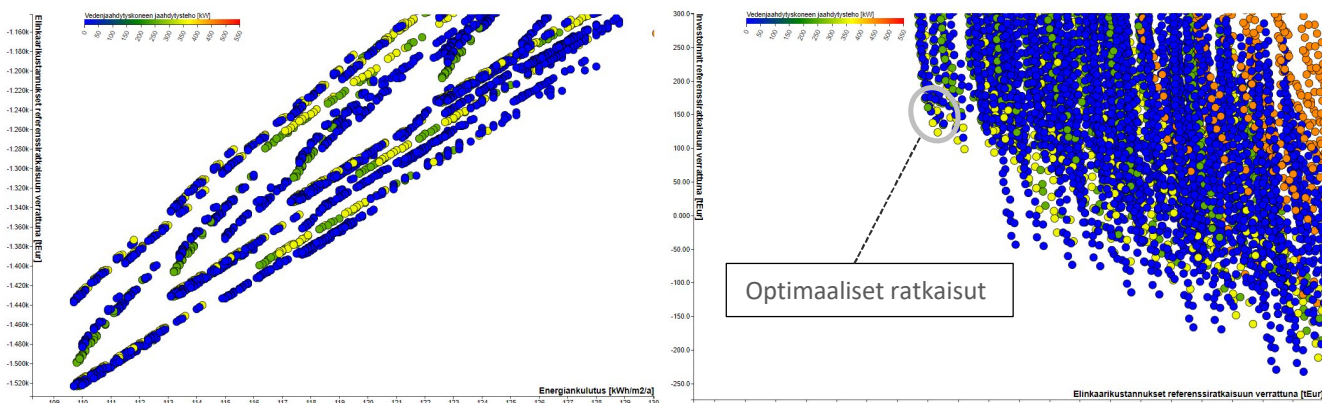
Ilma-vesilämpöpumpputyypin pohjautuvissa ratkaisuissa optimaalinen IVLP-lämpöteho on 330 kW lauhdelämpöpumpun nimellisen lämpötehon ollessa 200 kW. Ilma-vesilämpöpumpulla alin saavutettava energiankulutus on 118 kWh/m²/a, mutta vastapainona ratkaisun investointikustannukset pysyvät hyvin maltillisina saavutettuun energiankulutuksen tasoon nähden.

Hukkalämmön varastointia geoenergiakenttään tarvitaan tulosten perusteella, jos energiankulutuksen halutaan olevan alle 116 kWh/m²/a. Hukkaenergian varastointi geoenergiakenttään pienentää elinkaarikustannuksia energiakaivoilla noin 170 k€ ja energiapaaluilla noin 220 k€ pelkkään energiankierrätysratkaisuun verrattuna. Energiakaivoilla investointikustannukset kasvavat vastaavasti noin 140 k€ korkeammiksi ja energiapaaluilla arviolta 170 k€ korkeammiksi. Energiapaalujen osalta investointikustannukset ovat lisäkustannuksia, jos rakennus perustetaan joka tapauksessa paalujen varaan. Rakennuksen elinkaaren aikana hukkalämmön varastointi geoenergiakenttään on suositeltava ratkaisu.

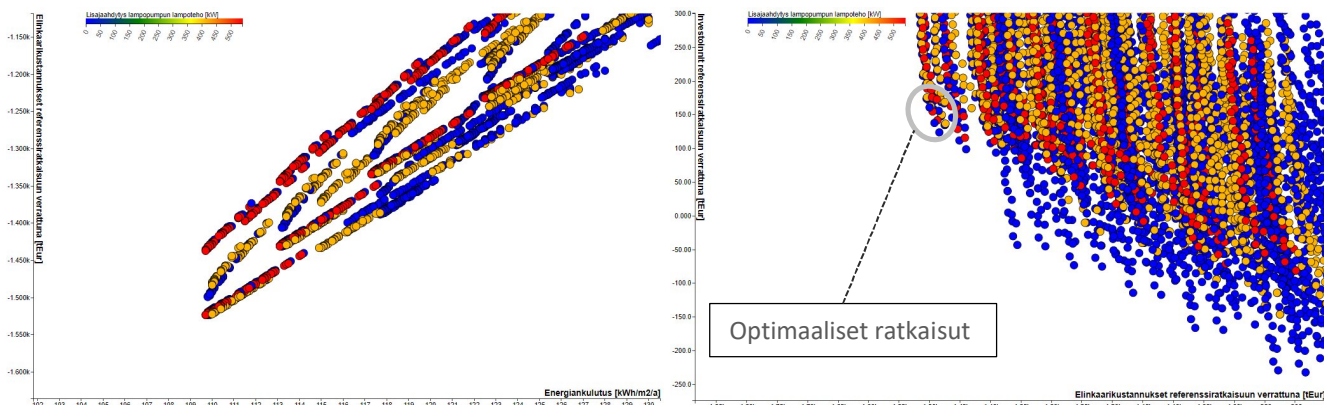
Lopulliset johtopäätökset energiakaivoista tai -paaluista kannattaa tehdä maaperäanalyysin perusteella. Toisin sanoen, onko maaperä teknisesti soveltuva energiapaaluille ja mikä on kallioperän todellinen lämmönjohtavuus alueella energiakaivokentän osalta.



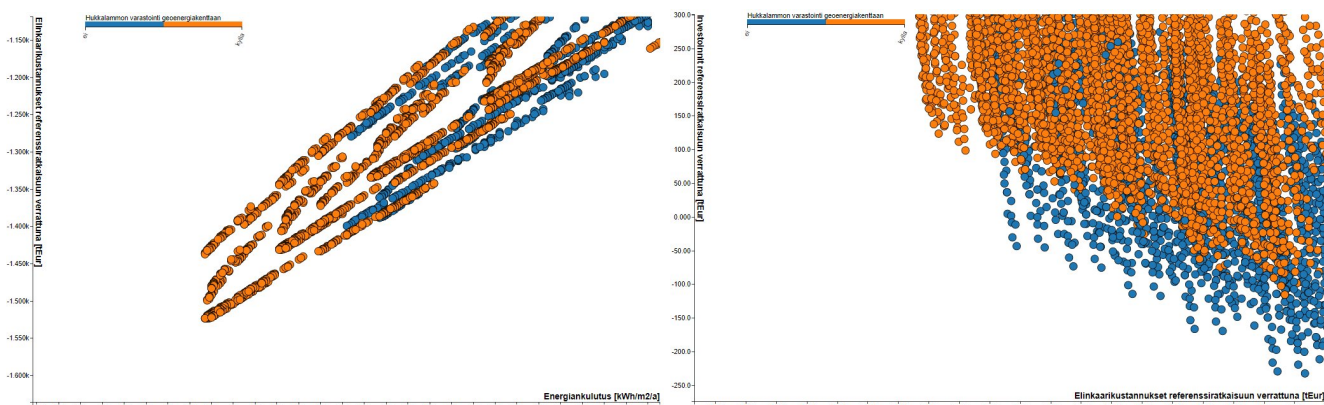
Kuva 26. Lauhdelämpöpumpun mitoitusasteen jakautuminen optimoinnissa. Tulosten perusteella optimaalinen mitoitus lauhdelämpöpumpun nimellisteholle on lasketuista vaihtoehdoista 200 kW, joissain järjestelmämitoituksissa 300 kW.



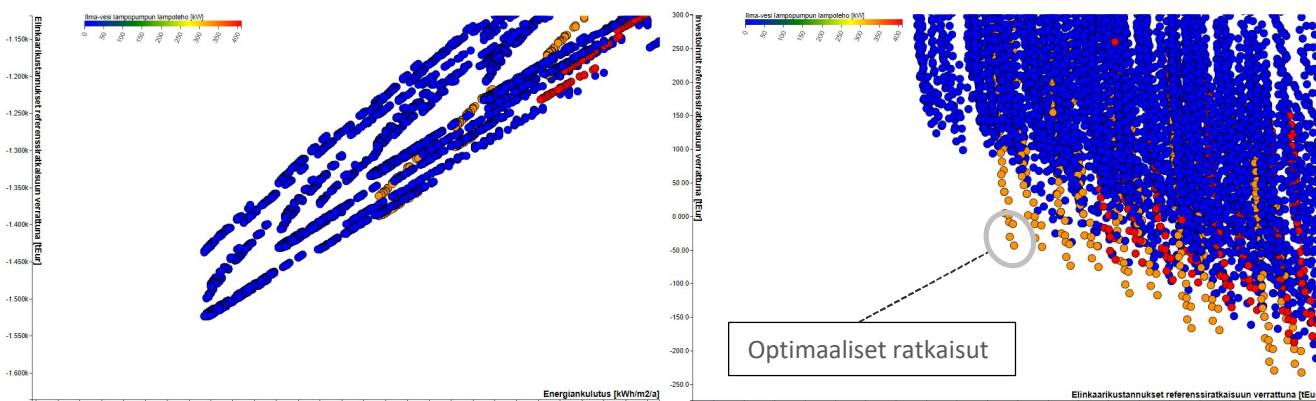
Kuva 27. Vedenjäähdytyskoneen mitoitusvoiman jakautuminen optimoinnissa. Vedenjäähdytyskoneen optimaaliseksi tehoksi valikoituu 350 kW niiden energijärjestelmien osalta, joissa vedenjäähdytyskonetta käytetään.



Kuva 28. Lisäjäähdytykseen tarkoitetun lämpöpumpun mitoitusvoiman jakautuminen optimoinnissa. Järjestelmällä saavutetaan pienin energiankulutus kaikista tutkituista vaihtoehdoista, kuitenkin suhteellisen korkeilla investointikustannuksilla.



Kuva 29. Hukkalämmön varastoinnin jakautuminen optimoinnissa. Alhaisin saavutettavissa oleva energiankulutus ilman hukkalämmön varastointia geoenergiakenttään (energiakaivot tai energiapaalut) on 116 kWh/m²/a. Hukkalämmön varastointi geoenergiakenttään on suositeltava ratkaisu.

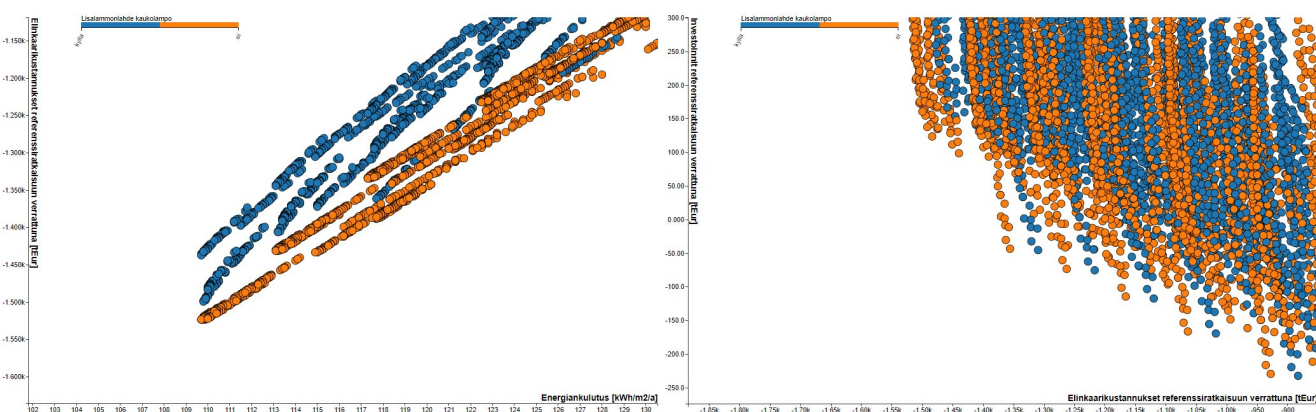


Kuva 30. Ilma-vesilämpöpumpun mitoitusasteen jakautuminen optimoinnissa. Ilma-vesilämpöpumpun pohjautuvalla energiajärjestelmällä alhaisin saavutettava energiankulutus on 118 kWh/m²/a. Tutkituista vaihtoehtoista optimaalinen mitoitus ilma-vesilämpöpumpun lämpöteholle on 330 kW.

3.4.2 Lisälämpö kaukolämmöstä tai sähkökattilasta

Rakennuksen lisälämmönlähteen valintaa vertailtiin kaukolämpöliittymän ja sähkökattilan osalta. Raision alueella rakennus liitetään Turku Energian kaukolämpöverkkoon. Kuvassa 31 on esitetty kaukolämmön valikoituminen lisälämmönlähteeksi optimoinneissa. Tuloksiin ei sisälly laskentatapauksia, joissa rakennuksen hukkalämpöä myydään kaukolämpöverkkoon.

Laskentatulosten perusteella energiatehokkaimmissa ratkaisuissa lisälämmönlähteeksi on syytä valita sähkökattila, jos hukkalämmön myyntiä kaukolämpöverkkoon ei suunnitella. Kaukolämmön kilpailukykyä heikentää korkeahko kaukolämmön energiamaksu Turun alueella. Asetelma saattaa kuitenkin muuttua, jos kaukolämpö muuttuu alueella halvemmaksi tulevaisuudessa.

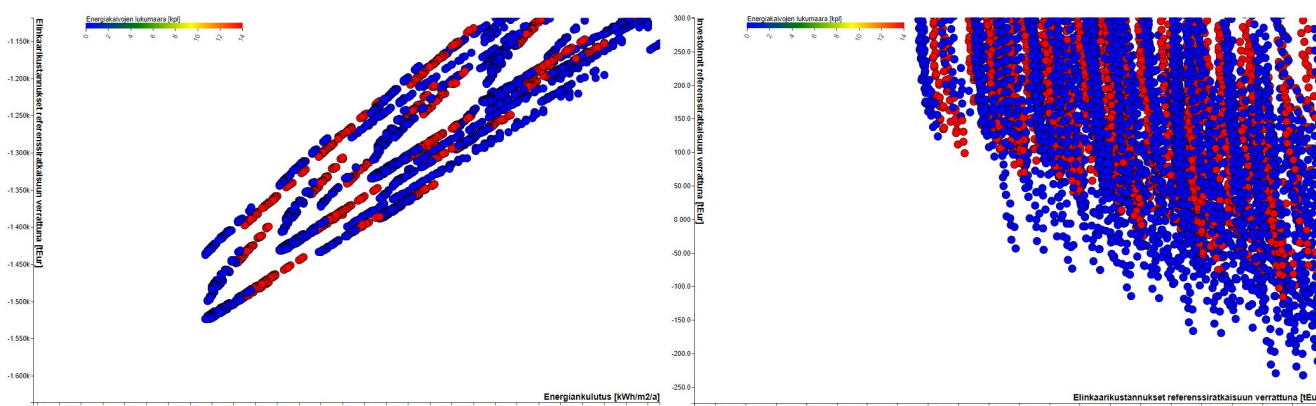


Kuva 31. Kaukolämmön valikoituminen lisälämmönlähteeksi optimoinneissa. Punaisissa pisteissä lisälämmönlähde on kaukolämpö ja sinisissä sähkökattila.

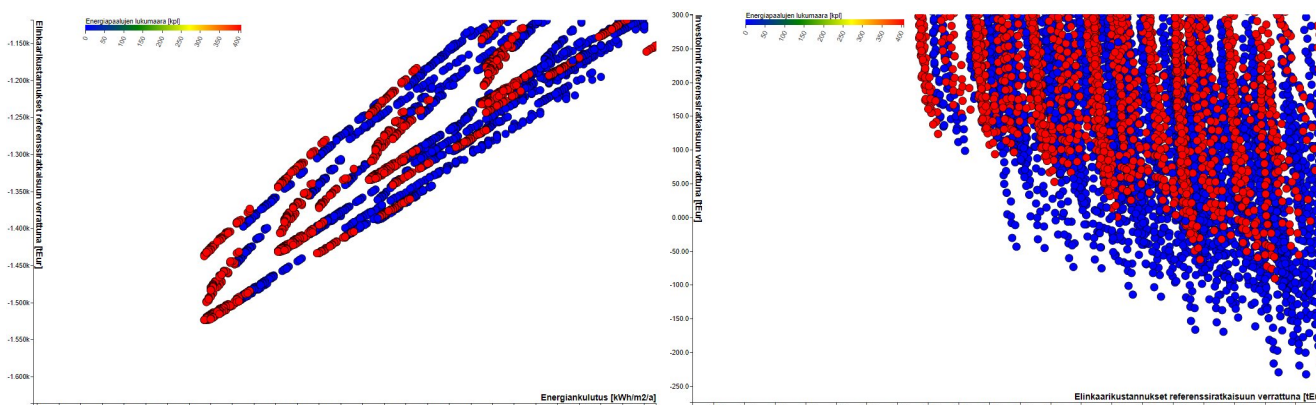
3.4.3 Energiakaivot tai energiapaalut

Hukkalämmön varastointia geonergiakenttään vertailtiin optimoinnissa energiakaivojen ja -paalujen osalta. Kuvassa 32 on esitetty energiakaivojen valikoituminen hukkalämmön varastointimuodoksi optimoinneissa. Tuloksissa energiakaivolliset ratkaisut näkyvät punaisina pisteinä (14 energiakaivoa). Energiapaalujen valikoituminen on vastaavasti esitetty kuvassa 33 punaisina pisteinä (407 energiapaalua).

Kuvia vertailemalla nähdään, että hukkalämmön varastointi geoenergiakenttään on suositeltavaa tehdä energiapaaluihin pohjautuvalla järjestelmällä. Energiapaalujen kannattavuuden edellytys on, että rakennus perustetaan joka tapauksessa paalujen varaan. Rakennuksen elinkaaren aikana kustannusero energiakaivojen ja energiapaalujen välillä jää valitusta ratkaisusta riippuen kuitenkin pienehköksi, energiapaalujen hyväksi säästöä syntyy 10000 – 20000 €. Alhaisin ostoenergiankulutus saavutetaan energiapaaluilla, energiakaivoihin verrattuna paalukentän korkeammasta lämpötilatasosta johtuen.



Kuva 32. Energiakaivojen valikoituminen hukkalämmön varastointiratkaisuksi optimoinneissa. Punaisissa pisteissä energiakaivot ovat käytössä ja sinisissä ei.



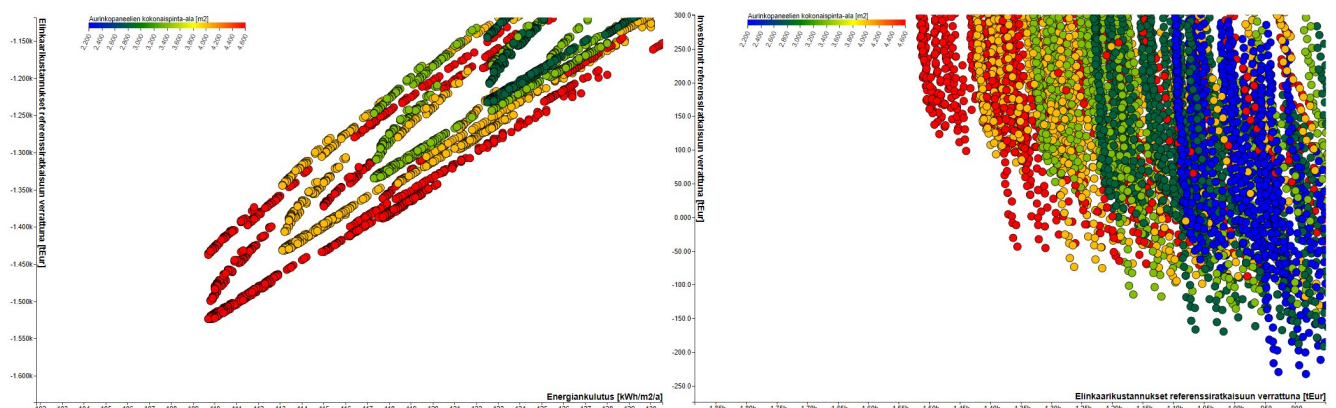
Kuva 33. Energiapaalujen valikoituminen hukkalämmön varastointiratkaisuksi optimoinneissa. Punaisissa pisteissä energiapaalut ovat käytössä ja sinisissä ei.

3.4.4 Aurinkosähköjärjestelmän mitoitus

Aurinkosähköjärjestelmän mitoitusta tutkittiin optimoinnissa aurinkopaneelien pinta-alan vaihteluvälillä 2200 m² - 4600 m². Rakennuksessa hyödyntämätön aurinkosähkö myydään simuloinneissa Turku Energialle pörssisähkön Spot -hinnan mukaan 3 €/MWh vähennettynä. Simuloinnissa käytettiin vuoden 2019 Spot -hintoja, jolloin vuoden keskimääräinen korvaustaso ilman energiayhtiön välityspalkkioita oli noin 55 €/MWh. On hyvä huomata, että viimeisen viiden vuoden aikana vuoden keskimääräinen korvaustaso on vaihdellut 40 ja 58 €/MWh välillä.

Aurinkopaneelien pinta-alalla 2200 m² aurinkopaneelien tuottama sähköenergia saadaan kokonaisuudessaan hyödynnettyä rakennuksessa. Aurinkopaneelien pinta-ala 4600 m² vastaa suurinta paneelimäärää, joka voidaan asentaa kauppakeskuksen katolle. Tässä tapauksessa aurinkopaneelit peittävät noin 40 % katon pinta-alasta. Aurinkopaneelien laskennassa aurinkopaneelit suunnattiin kohti lounasta ja paneelien asennus on kelluva rakennuksen katolla. Paneelin kallistuskulma vaakatasoon nähden on 20° ja järjestelmän keskimääräinen sähkön tuoton hyötysuhde 17,5 %. Aurinkopaneelien pinta-alan vaikutusta energiankulutukseen sekä investointi- ja elinkaarikustannuksiin on esitetty kuvassa 34.

Tulosten perusteella havaitaan, että pienin energiankulutus ja pienimmät elinkaarikustannukset saavutetaan suurimmalla mahdollisella paneelimäärällä 4600 m². Suurimman mahdollisen paneelimäärän kilpailukykyä parantaa kohteessa rakennuksessa hyödyntämättömän aurinkosähkön myynti sähköverkkoon. Sähkön Spot -hinnan laskeminen edellä mainitulle viiden vuoden aikaiselle alimmalle tasolle (55 -> 40 €/MWh) lisäisi elinkaarikustannuksia arviolta 25000 €, kun kyseessä on suurin paneelimäärä 4600 m².

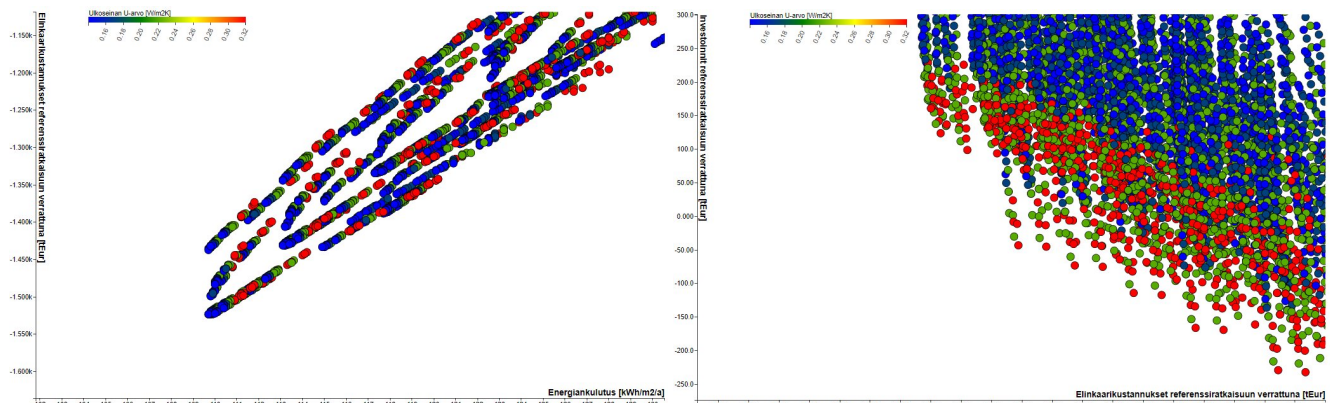


Kuva 34. Aurinkopaneelien pinta-alan jakautuminen optimoinnissa. Punaiset pisteet kuvaavat suurinta mahdollista aurinkopaneelien pinta-alaa 4600 m² ja siniset pisteet pienintä pinta-alaa 2200 m².

3.4.5 Ulkoseinän eristystaso

Ulkoseinän energiatehokkuuden vaikutusta rakennuksessa tutkittiin optimoinnissa ulkoseinän U-arvojen vaihdellessa välillä 0,14 – 0,32 W/m²K, eristyspaksuus 250 – 100 mm. Ulkoseinän eristystason valikoituminen optimoinnissa on esitetty kuvassa 35.

Kuvan perusteella lämpöpumppujärjestelmien kanssa kannattavimmat eristepaksuudet ovat 0,22 ja 0,32 W/m²K valitusta ratkaisusta riippuen. Elinkaarioptimaaliseksi ratkaisuksi valikoituu 0,22 W/m²K. Lämpöpumput pienentävät keskimääräistä ostoenergian hintaa, mistä johtuen niiden kanssa ulkoseiniä ei ole kannattava eristää niin hyvin. Vertailutasoa (0,17 W/m²K) paremmin eristetyt ratkaisut eivät ole kannattavia missään kustannustehokkaassa laskentavaihtoehdossa.

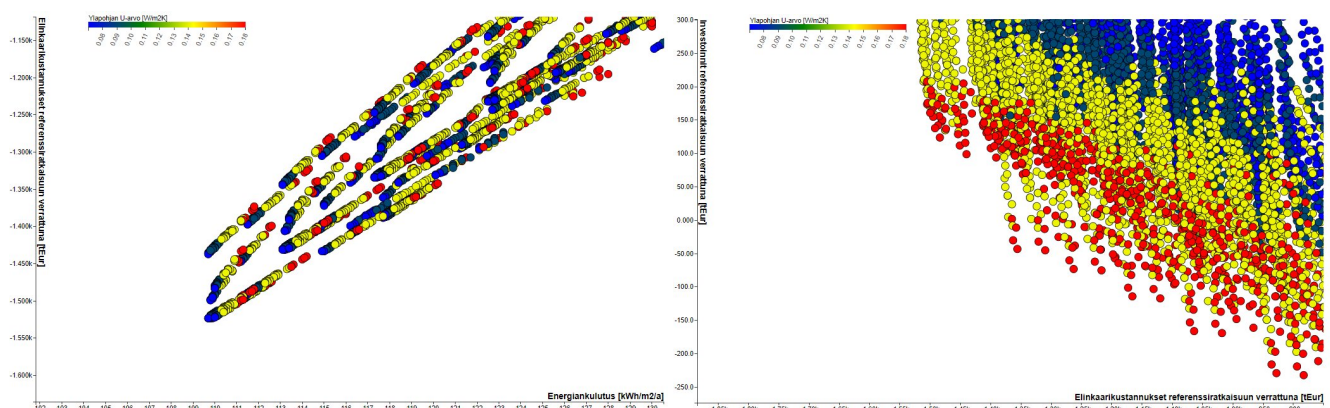


Kuva 35. Ulkoseinän U-arvojen jakautuminen optimoinnissa. Punaisten pisteiden avulla voidaan tunnistaa heikosti eristetyt ratkaisut, kun taas siniset pisteet osoittavat hyvin eristetyt ratkaisut.

3.4.6 Yläpohjan eristystaso

Yläpohjan energiatehokkuuden vaikutusta rakennuksessa tutkittiin optimoinnissa alapohjan U-arvojen vaihdellessa välillä 0,07 – 0,18 W/m²K, eristyspaksuus 500 – 200 mm. Yläpohjan eristystason valikoituminen optimoinnissa on esitetty kuvassa 36.

Kuvan perusteella lämpöpumppujärjestelmien kanssa kannattavimmat eristepaksuudet ovat 0,14 ja 0,18 W/m²K valitusta ratkaisusta riippuen. Elinkaarioptimaaliseksi ratkaisuksi valikoituu heikoimmin eristetyt ratkaisut 0,18 W/m²K. Kauppakeskuksen geometria vaikuttaa lopputulokseen, sillä yläpohjan ja alapohjan pinta-alat ovat huomattavan suuret. Lämpöpumput pienentävät keskimääräistä ostoenergian hintaa, mistä johtuen niiden kanssa yläpohjaa ei ole kannattava eristää niin hyvin. Eristystasoa 0,14 W/m²K paremmin eristetyt ratkaisut eivät ole kannattavia missään kustannustehokkaassa laskentavaihtoehdossa.

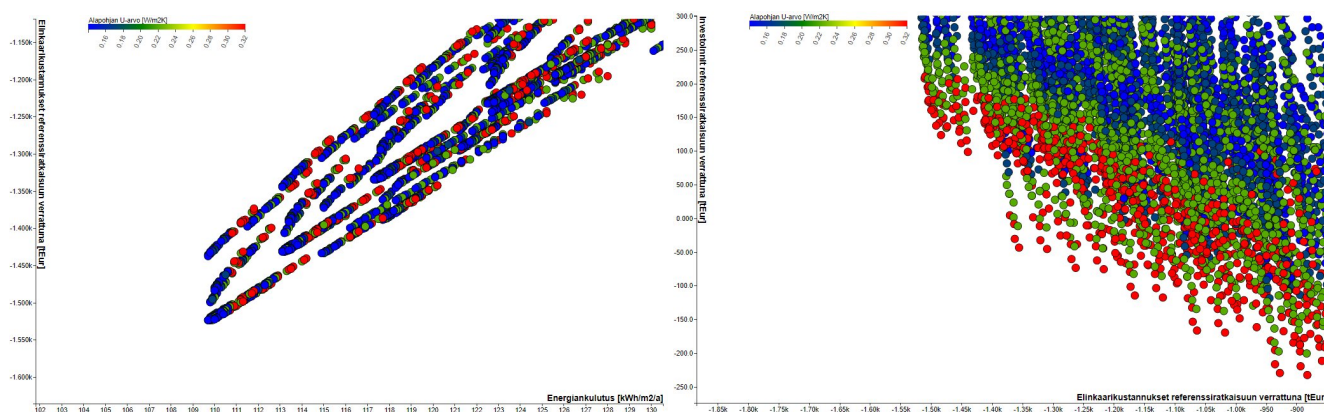


Kuva 36. Yläpohjan U-arvojen jakautuminen optimoinnissa. Punaisten pisteiden avulla voidaan tunnistaa heikosti eristetyt ratkaisut, kun taas siniset pisteet osoittavat hyvin eristetyt ratkaisut.

3.4.7 Alapohjan eristystaso

Alapohjan energiatehokkuuden vaikutusta rakennuksessa tutkittiin optimoinnissa alapohjan U-arvojen vaihdellessa välillä 0,14 – 0,32 W/m²K, eristyspaksuus 250 – 100 mm. Alapohjan eristystason valikoituminen optimoinnissa on esitetty kuvassa 37.

Kuvan perusteella lämpöpumppujärjestelmien kanssa kannattavimmat eristepaksuudet ovat 0,22 ja 0,32 W/m²K valitusta ratkaisusta riippuen. Elinkaarioptimaaliseksi ratkaisuksi valikoituu heikoimmin eristetyt ratkaisut 0,32 W/m²K. Kauppakeskuksen geometria vaikuttaa lopputulokseen, sillä yläpohjan ja alapohjan pinta-alat ovat huomattavan suuret. Lämpöpumput pienentävät keskimääräistä ostoenergian hintaa, mistä johtuen niiden kanssa yläpohjaa ei ole kannattava eristää niin hyvin. Vertailutasoa (0,17 W/m²K) paremmin eristetyt ratkaisut eivät ole kannattavia missään kustannustehokkaassa laskentavaihtoehdossa.



Kuva 37. Alapohjan U-arvojen jakautuminen optimoinnissa. Punaiset pisteet kuvaavat heikosti eristettyjä ratkaisuja ja siniset pisteet hyvin eristettyjä ratkaisuja.