
RAPORTTI

20411667-701

LAAJASALON RATIKKAKORTTELIN ENERGIANKIERRÄTYSPOTENTIALIN TARKASTELU JA ELINKAARIKUSTANNUSVERTAILU



VERSIO 1.0

2019-01-05

SWECO TALOTEKNIikka OY

HELSINGIN KAUPUNKI
HELSINGIN SEUDUN LIIKENNE

Sisältö

1	Johdanto	2
2	Laajasalon ratikkakorttelin energialaskenta	3
2.1	Varikon tavoite-energiälaskenta	3
2.1.1	Ilmanvaihtojärjestelmät	3
2.1.2	Rakenteet	4
2.1.3	Sisäiset kuormat	5
2.1.4	Lämmitys ja jäähdytys	5
2.1.5	Käyttöveden lämmitys	5
2.1.6	Lumen sulattamisen lämmitysenergiatarve	6
2.1.7	Oviverhokoneiden lämmitysenergiatarve	6
2.1.8	Varikon energiankulutus	6
2.2	Muuntamot	8
2.3	Pysäköintihalli	9
2.3.1	Ilmanvaihtojärjestelmät	9
2.3.2	Rakenteet	9
2.3.3	Sisäiset kuormat	10
2.3.4	Pysäköintihallin energiankulutus	10
2.4	Asuinrakennuksien tavoite-energiälaskenta	10
2.4.1	Ilmanvaihtojärjestelmät	10
2.4.2	Rakenteet	10
2.4.3	Sisäiset kuormat	11
2.4.4	Asuinrakennuksien energiankulutus	13
2.5	Alueellinen energiaprofiili	14
3	Elinkaarilaskelmat	15
3.1	Investointikustannukset	15
3.2	Käyttökustannukset	17
3.2.1	Lämpöpumpun hyötysuhteet	17
3.2.2	Energiankulutus	18
3.2.3	Energiakustannukset	19
3.2.4	Huoltokustannukset	20
3.3	Elinkaarilaskelmat	20
3.4	CO ₂ -päästöt	21
4	Johtopäätökset	22

1 Johdanto

Helsingin kaupunki suunnittelee Laajasaloon ratikkakorttelia, johon sijoitetaan uuden raitiovaunuvarikon lisäksi noin 40 000 kem² asuinkerrostaloja sekä näihin liittyvä pysäköintihalli.

Raitiovaunuvarikolla tarvitaan jäähdytysenergiaa ympäri vuoden johtuen varikolle sijoitettavista muuntamoista ja muista sähkölaitteista. Lisäksi varikon ilmamäärät ovat suuria, joten jäteilmasta olisi mahdollista ottaa lämpöenergiaa talteen lämpöpumpun avulla. Varikolla lämmitysenergiaa tarvitaan vain lämmityskaudella, joten perinteisessä suunnitteluratkaisussa jäteilman lämpöenergian keräämiselle ei ole tarvetta.

Varikon yhteyteen suunnitellut asuinrakennukset tarvitsevat vuodenajasta riippumatta lämmitysenergiaa käyttöveden lämmittämiseen sekä lämmityskaudella myös ilmanvaihdon ja tilalaitteiden lämmitystarpeen kattamiseen. Lisäksi alueelle rakennetaan pysäköintihalli, joka voi hyödyntää varikon ylimääräistä lämpöenergiaa ilmanvaihdon lämmitykseen.

Tämän selvityksen tavoitteena oli tutkia, kuinka paljon lämpöenergiaa varikon sähkökuormista ja jäteilmasta olisi mahdollista kerätä ja miten lämpöenergian kierrättäminen asuinkerrostalojen ja pysäköintihallin käyttöön vaikuttaisi ratikkakorttelin ostolämmitysenergiatarpeeseen.

Tässä raportissa on esitetty Laajasalon ratikkakorttelin elinkaarikustannuslaskelmat seuraaville järjestelmävaihtoehdoille:

1. **Perusratkaisu:** Alueen jäähdytystarve katetaan kaukokylmällä ja lämmitystarve kaukolämmöllä
2. **Energiankierrätys:** Varikon hukkalämpö kierrätetään asuinkerrostalojen ja pysäköintihallin lämmitystarpeen kattamiseen ja loput lämmitystarpeesta katetaan kaukolämmöllä ja jäähdytystarve vedenjäähdytyskoneilla

Elinkaarilaskelmat on tehty karkeana arviona perustuen konseptivaiheessa käytettävissä oleviin tietoihin. Elinkaarilaskelman lähtötiedot on esitetty luvussa 2 ja tulokset luvussa 3.

2 Laajasalon ratikkakorttelin energialaskenta

2.1 Varikon tavoite-energiälaskenta

2.1.1 Ilmanvaihtojärjestelmät

Varikon ilmanvaihto on jaettu neljään alueeseen:

- Hallin IV-kone
- Huippuimuri
- Käytävien IV-kone
- Toimistotilojen IV-kone

Palvelualueet on esitetty kuvassa 1 ja kuvassa 2. Alustilassa ja huoltomontuissa ei ole ilmanvaihtoa.



Kuva 1. Ilmanvaihdon palvelualueet varikon ensimmäisessä kerroksessa.



Kuva 2. Ilmanvaihdon palvelualueet varikon toisessa kerroksessa.

Ilmanvaihtokoneiden käyntiajat, lämpötilahyötysuhteet, ja ilmamäärät on esitetty taulukossa 1. Ilmanvaihtoa ohjataan poistoilman lämpötilan mukaan.

Taulukko 1. Ilmanvaihtokoneiden ominaisuudet.

	Käyntiaika	Lämmöntalteenoton lämpötila- hyötysuhde	Ilmavirta, tulo / poisto (m ³ /s)
Hallin IV-kone	00:00-24:00	68 %	28,6 / 28,6
Huippumuri	00:00-24:00	-	- / 0,04
Toimistotilojen IV-kone	00:00-24:00	75 %	3,3 / 3,3
Käytävien IV-kone	00:00-24:00	75 %	0,6 / 0,6

2.1.2 Rakenteet

Ilmanvuotoluku q_{50}

2,00 m³/(h, m²)

Ulkovaippa:

Rakentamismääräysten mukaisesti

Ikkunapaketti: 1,1 W/m²K
g-arvo: 0,55

Kaikissa ikkunoissa on auringon mukaan säätyvät sälekaihtimet.

2.1.3 Sisäiset kuormat

Valaistus: Varikko: 10 W/m²
Toimistotilat: 10 W/m²
Käytävät/porrashuone/wc: 4 W/m²

Käyttäjät: ma-su klo 00:00-24:00, 100% teholla

Henkilöt: Varikko: 40 hlö, 04:00-19:00 100%, 19:00-04:00 50%
Toimisto: 2 hlö/huone, 08:00-16:00 100%, 16:00-08:00 50%
Muut tilat: Ei käyttäjiä

Saatujen lähtötietojen mukaan kuljettajia on arviolta 60 henkilöä / päivä. Lisäksi varikolla työskentelee muuta henkilökuntaa, kuten hallimiehiä ja siivoojia ja toimistotyöntekijöitä. Yllä olevat henkilömäärät pyrkivät kuvaamaan keskimääräistä tilannetta varikolla.

Laitteiden lämpökuormat: Toimisto, 140 W, aina päällä, klo 00-24, 100 % teholla
Tekninen tila, 1000 W, aina päällä, klo 00-24, 100 % teholla
Kytinlaitos, 1000 W / 2000 W, klo 00-24, 100 % teholla
SPK, 1500 W, aina päällä, klo 00-24, 100 % teholla
Relehuone, 1500 W / 2000 W, klo 00-24, 100 % teholla
Siivous, 40 000 W, klo 7-15, 50 % teholla
Muut tilat: ei laitteita

Siivoustilan lämpökuormissa on huomioitu paineilma, pölynpoisto sekä keskusimurijärjestelmä.

2.1.4 Lämmitys ja jäähdytys

Varikon toimistotilojen tilalämmityslaitteiden asetusarvoksi oletettiin 21 C ja jäähdytyslaitteiden asetusarvoksi 25 C. Raitiovaunuhallin asetusarvoiksi oletettiin lämmityksen osalta 18 C. Porrashuoneiden, käytävien ja teknisten tilojen lämmityksen asetusarvo on 17 C. Jäähdytettävien teknisten tilojen jäähdytyksen asetusarvo on 25 astetta. Lämmitys on kesällä pois päältä toukokuusta elokuun loppuun.

2.1.5 Käyttöveden lämmitys

HSL:ltä saatujen tietojen perusteella varikon lämpimän käyttöveden tarve on vähäistä muuhun lämmitysenergiatarpeeseen verrattuna, joten käyttöveden lämmitystä ei huomioitu karkeassa konseptitason simulointimallissa.

2.1.6 Lumen sulattamisen lämmitysenergiantarve

Varikon lämmitysenergiantarpeessa huomioitiin lumen sulattamiseen vaadittava energia. Lämmitysenergian tarpeen arvioinnissa käytettiin vuoden 2017 säädataa, koska myös sähkönkulutukset saatiin vuodelta 2017. Säähavaintojen perusteella arvioitiin lumisadepäivien määrä perustuen sateen intensiteettiin ja lumen syvyyteen. Lumisateen intensiteetin ollessa yli 2mm, oletettiin raitiovaunujen tuovan varikolle 500 kg lunta yhtä raitiovaunua kohden. Raitiovaunujen saapumisaikatauluna käytettiin tilaajalta saatua aikataulua (liite 1). Lumen sulattamisen lämmitysenergiantarve lisättiin osaksi varikon kokonaislämmitysenergiantarvetta.

2.1.7 Oviverhokoneiden lämmitysenergiantarve

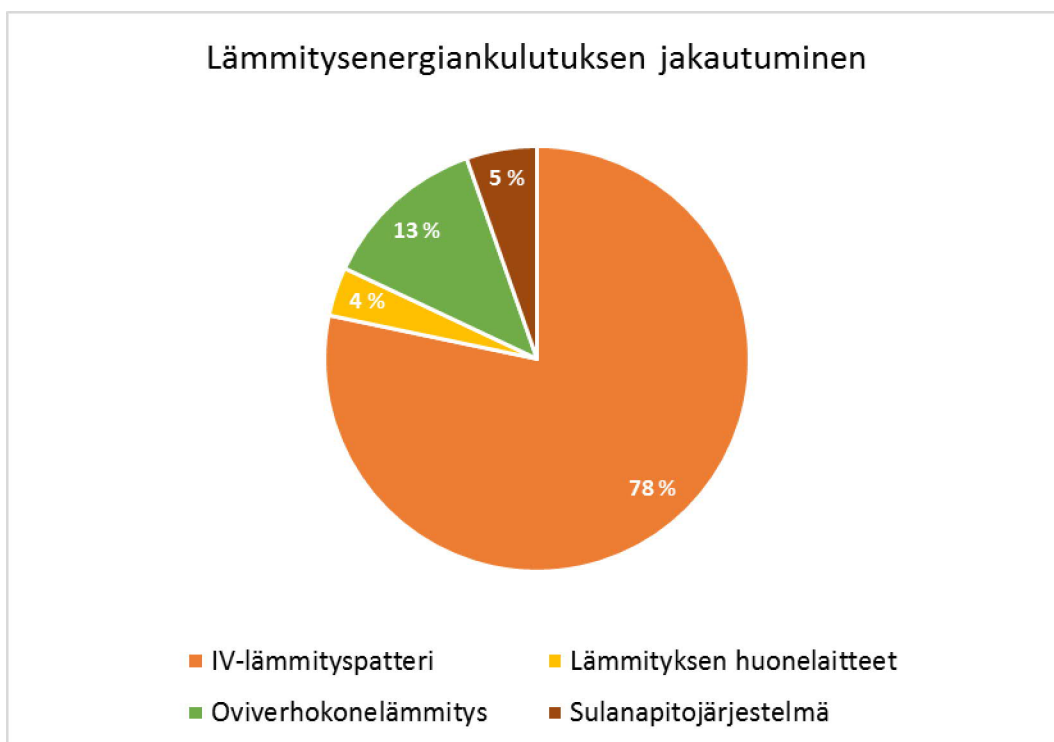
Raitiovaunujen ajaessa sisään ja ulos varikolta syntyy lämpöhäviötä, kun ovet avautuvat ja päästävät kylmää ilmaa halliin. Tästä syntyneet lämpöhäviöt huomioitiin oviverhokoneiden lämmitystehontarpeen laskennalla. Lähtötietoina käytettiin ovien kokoja sekä tilaajalta saatuja raitiovaunujen lähtö- ja saapumisaikoja varikolle (liite 1). Aikataulujen avulla voitiin arvioida ovien aukioloajat. Oviverhokoneiden lämmitysenergiantarve lisättiin osaksi varikon kokonaislämmitysenergiantarvetta.

2.1.8 Varikon energiankulutus

Taulukossa 2 on esitetty yhteenveto varikon energiankulutuksesta. Varikon pinta-ala on noin 19 300 m². Lämmitysenergiankulutuksen jakautuminen on esitetty kuvassa 3. Lämmityksessä on huomioitu IV-lämmityspatterit, lämmityksen huonelaitteet, oviverhokonelämmitys ja sulanapitojärjestelmät.

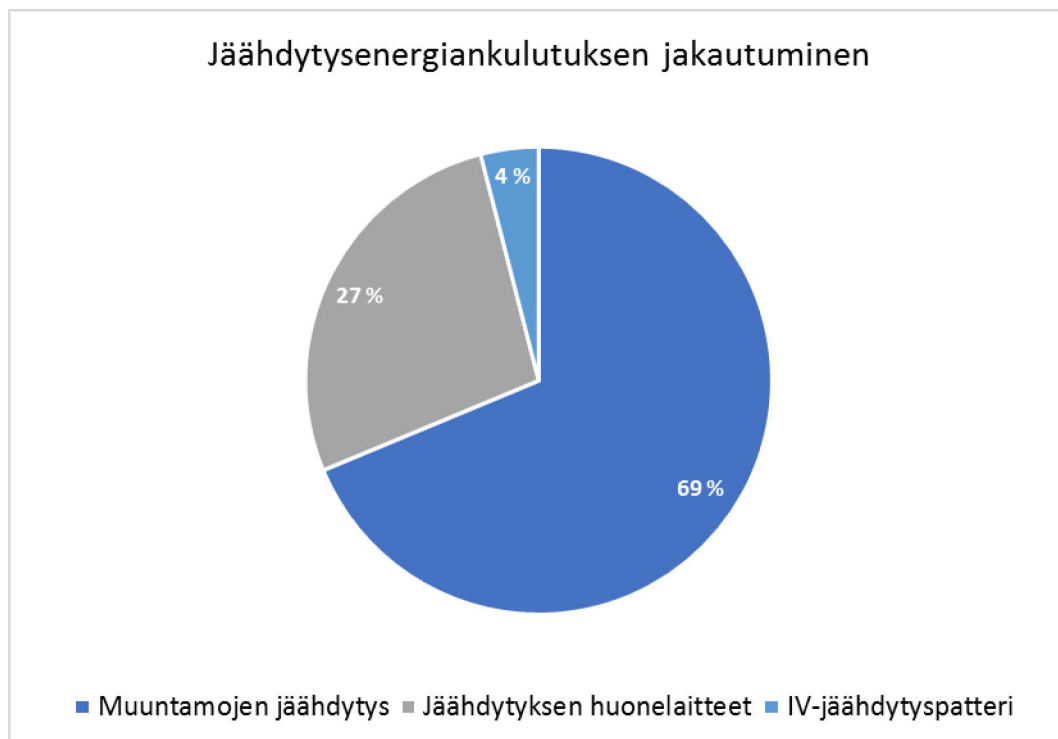
Taulukko 2. Karkeat arviot varikon jäähdytyksen ja lämmityksen tarpeille.

	Jäähdytys	Lämmitys
Energia, MWh	400	1 000
Teho, kW	700	1 900



Kuva 3. Varikon lämmitysenergian jakautuminen vuositasolla.

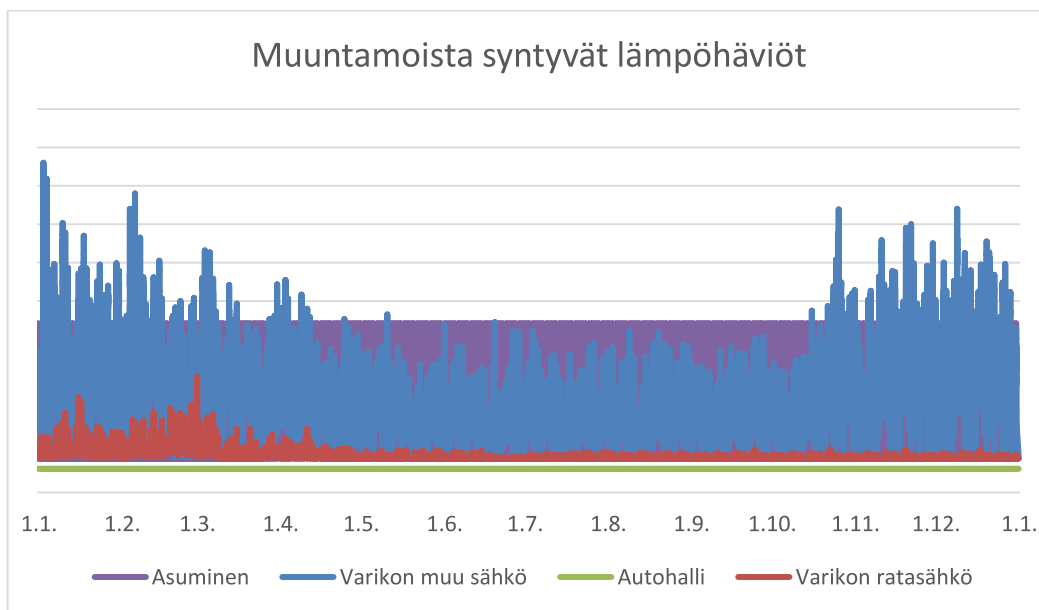
Jäähdytysenergiankulutuksen jakautuminen on esitetty kuvassa 4. Varikon jäähdytyksessä on huomioitu IV-jäähdytyspatterit, jäähdytyksen huonelaitteet sekä muuntamojen jäähdytystarve.



Kuva 4. Varikon jäähdytysenergian jakautuminen vuositasolla.

2.2 Muuntamot

Laskennassa huomioitiin muuntamojen jäähdytysenergian tarve. Varikolle on suunniteltu kaksi sähkömuuntamo (2 x 1600 kVa) ratasähkölle ja kolme sähkömuuntamo (3 x 1000 kVa) muulle sähkölle. Lisäksi alueelle oletettiin kaksi muuntamo (2 x 1000 kVa) asuinkerrostaloja ja yksi muuntamo (1 x 1000 kVa) pysäköintihallia varten. Varikon muuntamojen tuntitaso virran suuruuden vaihtelu arvioitiin vuoden 2017 sähkönkulutuksesta lasketun virran tuntiprofiiliin perusteella. Asumisen muuntamon virran vaihtelulle laadittiin kulutusprofiili asumisen sähkön käytön perusteella. Autohallin muuntamolle arvioitiin tasainen 30% kulutusprofiili. Muuntamoista syntyvät lämpöhäviöt eli muuntamotilojen jäähdytystarve on esitetty kuvassa 5.



Kuva 5. Muuntamoista syntyvät lämpöhäviöt (tyhjäkäyntihäviöt ja kuormitushäviöt) eli muuntamotilojen jäähdytystarve vuoden aikana.

2.3 Pysäköintihalli

2.3.1 Ilmanvaihtojärjestelmät

Autohallin ilmanvaihdon käyntiajat, lämpötilahyötysuhteet, ilmamäärät ja sisäänpuhalluslämpötilat on esitetty taulukossa 4. Ilmanvaihtoa ohjataan poistoilman lämpötilan mukaan.

Taulukko 4. Ilmanvaihtokoneiden ominaisuudet.

	Käyntiaika	Lämmöntalteenoton lämpötila-hyötysuhde	Ilmavirta, tulo / poisto (m ³ /s)
Pysäköintihallin IV-kone	00:00-24:00	75 %	11,6 / 11,6

2.3.2 Rakenteet

Ilmanvuotoluku q_{50}	2,00 m ³ /(h, m ²)
Ulkovaippa:	Rakentamismääräysten mukaisesti
Ikkunat:	Ei ikkunoita

2.3.3 Sisäiset kuormat

Valaistus:	5 W/m ²
Käyttöajat:	ma-su klo 00:00-24:00, 100% teholla
Henkilöt:	Ei käyttäjiä
Laitteiden lämpökuormat:	Ei laitteita

2.3.4 Pysäköintihallin energiankulutus

Taulukossa 5 on esitetty yhteenveto pysäköintihallin energiankulutuksesta ja huipputehon tarpeesta. Pysäköintihallin pinta-ala on noin 12 900 m².

Taulukko 5. Karkeat arviot pysäköintihallin lämmityksen tarpeelle.

IV lämmitys

Energia, MWh	100
Teho, kW	120

2.4 Asuinrakennuksien tavoite-energiälaskenta

Alueelle tulevien asuinrakennusten energiantarve arvioitiin tyyppitalon simulointimallin avulla. Tyyppitalon energiantarve skaalattiin alueellisessa laskennassa vastaamaan pinta-alaltaan alueelle suunniteltua 40 000 m² asuinrakentamista.

2.4.1 Ilmanvaihtojärjestelmät

Asuinrakennuksen ilmanvaihdon käyntiajat, lämpötilahyötysuhteet, ilmamäärät ja sisäänpuhalluslämpötilat on esitetty taulukossa 6.

Taulukko 6. Ilmanvaihtokoneiden ominaisuudet.

	Käyntiaika	Lämmöntalteenoton lämpötila- hyötysuhde	Ilmavirta, tulo / poisto (m³/s)
Asuinrakennuksen IV-kone	00:00-24:00	70 %	1,2 / 1,3

2.4.2 Rakenteet

Ilmanvuotoluku q ₅₀	0,60 m ³ /(h, m ²)
--------------------------------	---

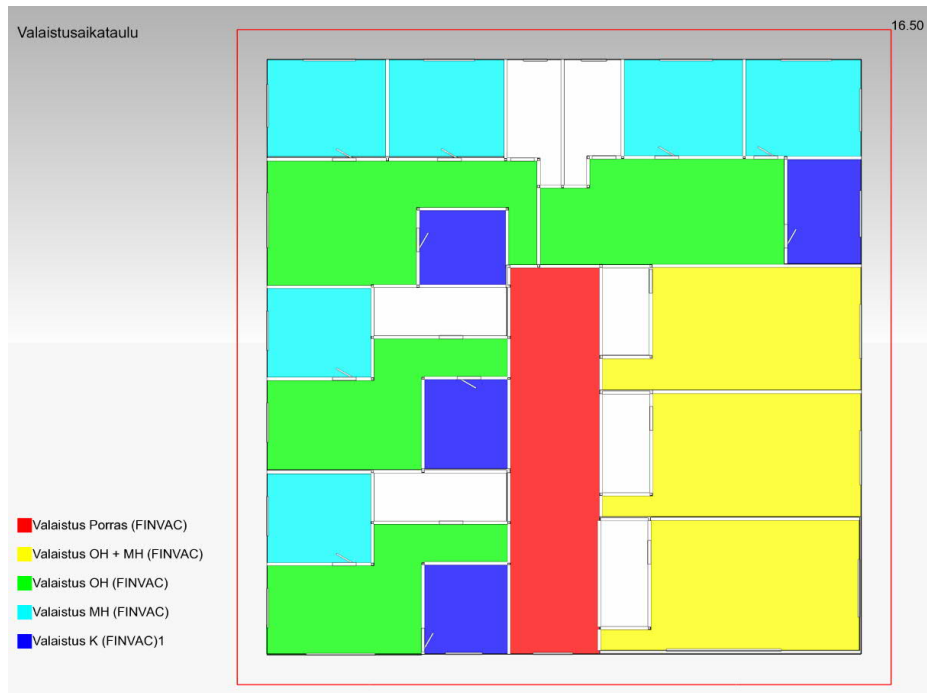
Ulkovaippa:	Rakentamismääräysten mukaisesti
Ikkunapaketti:	1,1 W/m ² K
	g-arvo: 0,40

Kaikissa ikkunoissa on auringon mukaan säätävät sälekaihtimet.

2.4.3 Sisäiset kuormat

Valaistus:	8 W/m ²
Käyttöajat:	Punaiset alueet: ma-pe klo 7 – 22, la-su klo 8-22: 100%,
	Keltaiset alueet: ma-pe 6-8 ja 18-23, la-su 7-9 ja 18-23: 100%
	Vihreät alueet: ma-pe 7-8 ja 18-22, la-su 8-9 ja 18-22: 100%
	Turkoosit alueet: ma-pe 6-7 ja 22-23, la-su 7-8 ja 22-23: 100%
	Siniset alueet: ma-pe 8-9 ja 18-22, la-su 9-10 ja 18-22: 100%

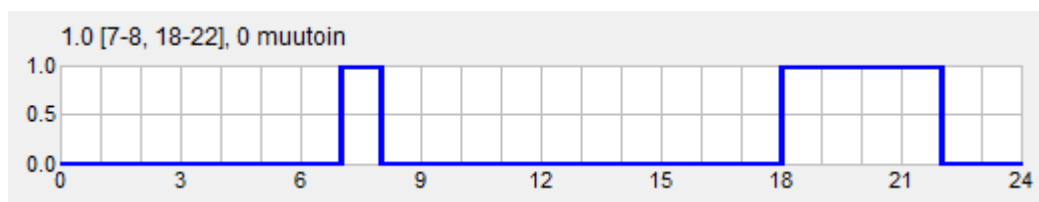
Valaistuksen käyttöajat vastaavat FINVAC-tutkimuksen mukaisia käyttöasteita ja niissä on huomioitu kuukausikohtainen käyttöasteen kuukausikerroin. Kuukausikerroin vaihtelee 66-100% välillä riippuen vuodenajasta. Kylpyhuoneisiin ei ole mallinnettu valaistusta, koska sen käyttöaika on oletettu hyvin pieneksi. Käyttöaikoja kuvaavat alueet on esitetty kuvassa 5.



Kuva 6. Asuinrakennuksen valaistuksen käyttöaikojen aluejako.

Henkilöt: Makuuhuone: 1-2 hlö, 22-8: 100%
 Olohuone: 2 hlö, ma-pe 7-8 ja 18-22, la-su 8-9 ja 18-22: 100%
 Keittiö: 2 hlö, ma-pe 8-9, la-su 9-10: 100%
 Muut tilat: Ei käyttäjiä

Henkilöille on oletettu 1.2 MET aktiiviteettitaso. Asuinrakennuksen olohuoneiden arkipäivien käyttöaikaprofiili on esitetty kuvassa 7.



Kuva 7. Asuinrakennuksen olohuoneiden käyttöaika arkipäivisin.

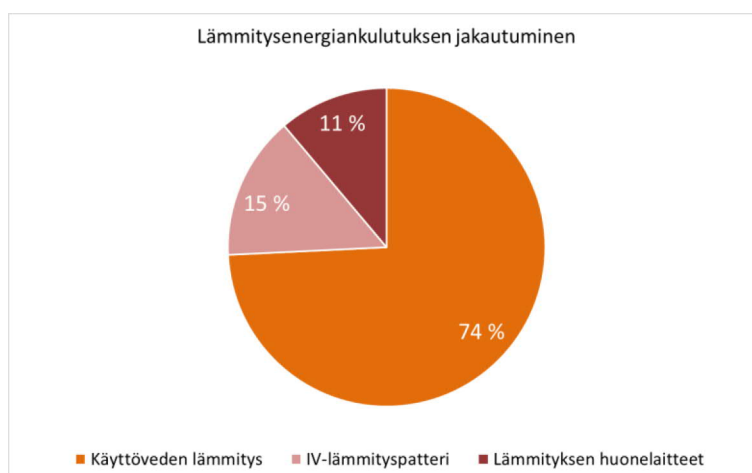
Laitteiden lämpökuormat: Keittiö: 9 W/m²
 Olohuone: 14 W/m²
 Yksiö: 14 W/m²
 Muut tilat: ei laitteita

2.4.4 Asuinrakennuksien energiankulutus

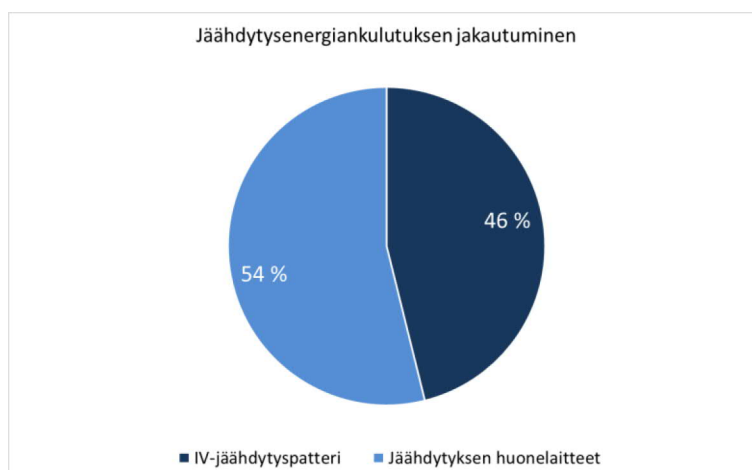
Taulukossa 7 on esitetty yhteenveto asuinrakennusten energiankulutuksesta. Asuinkerrostalojen yhteenlaskettu lämmitetty pinta-ala on 40 000 m². Lämmitys- ja jäähdytysenergiankulutuksen jakautuminen on esitetty kuvissa 8 ja 9.

Taulukko 7. Karkeat arviot asuinrakennusten jäähdytyksen ja lämmityksen tarpeille.

	Jäähdytys	Tilat + IV lämmitys	Käyttöveden lämmitys
Energia, MWh	60	610	1 750
Teho, kW	310	880	680



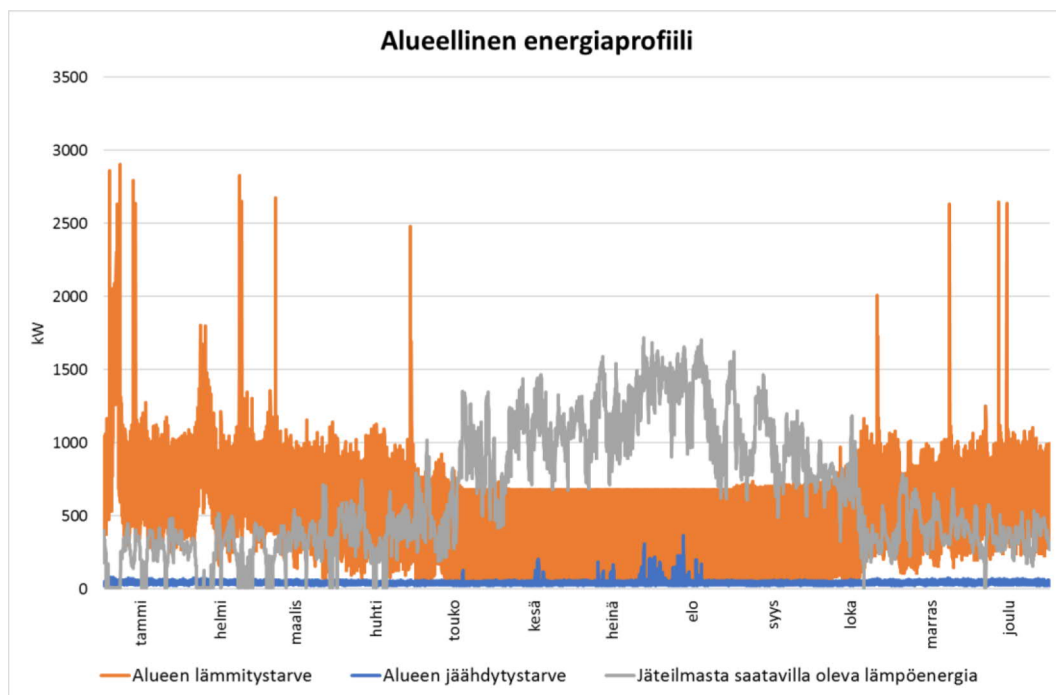
Kuva 8. Asuinrakennuksien lämmitysenergian jakautuminen vuositasolla.



Kuva 9. Asuinrakennuksien jäähdytysenergian jakautuminen vuositasolla.

2.5 Alueellinen energiaprofiili

Yhdistämällä varikon, pysäköinnin ja asuinrakentamisen energiantarpeet saadaan luotua tuntitason alueellinen energiantarve, joka on esitetty kuvassa 10. Kuvassa on esitetty myös varikon jäteilmasta lämpöpumpun avulla hyötykäyttöön saatavilla oleva lämmitysenergia.



Kuva 10. Alueellinen energiaprofiili.

Taulukossa 3 on esitetty alueellisen energiaprofiilin avulla saatu karkea arvio koko alueen jäähdytysenergiatarpeesta sekä kaukolämmön energian- ja tehontarpeesta jaoteltuna käyttöveden lämmitykseen ja tilojen ja ilmanvaihdon lämmitykseen. Jäähdytyksen mitoitusteho on arvioitu kuumimman kesäpäivän mukaan mitoitustalpioiden avulla.

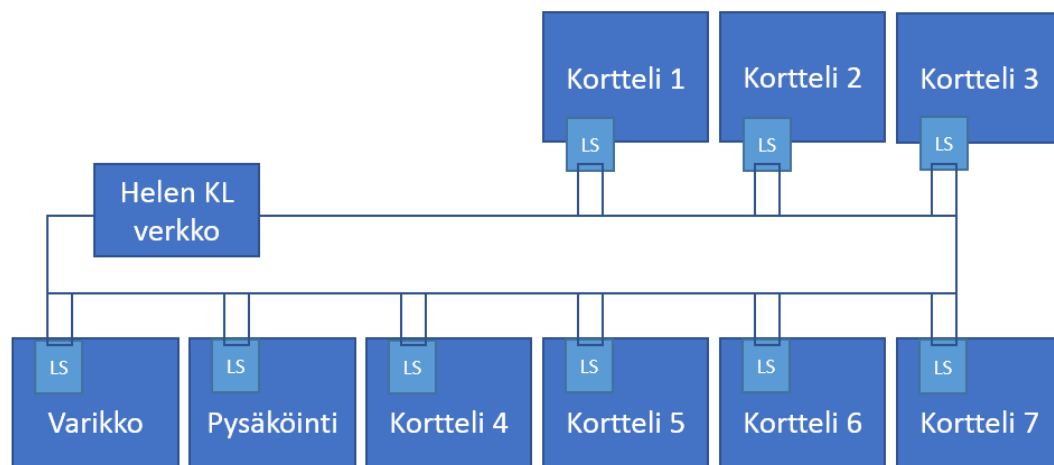
Taulukko 3. Karkeat arviot koko alueen jäähdytyksen ja lämmityksen tarpeille.

	Jäähdytys	Tilat + IV lämmitys	Käyttöveden lämmitys
Energia, MWh	460	1 700	1 750
Teho, kW	1 000	2 230	680

3 Elinkaarilaskelmat

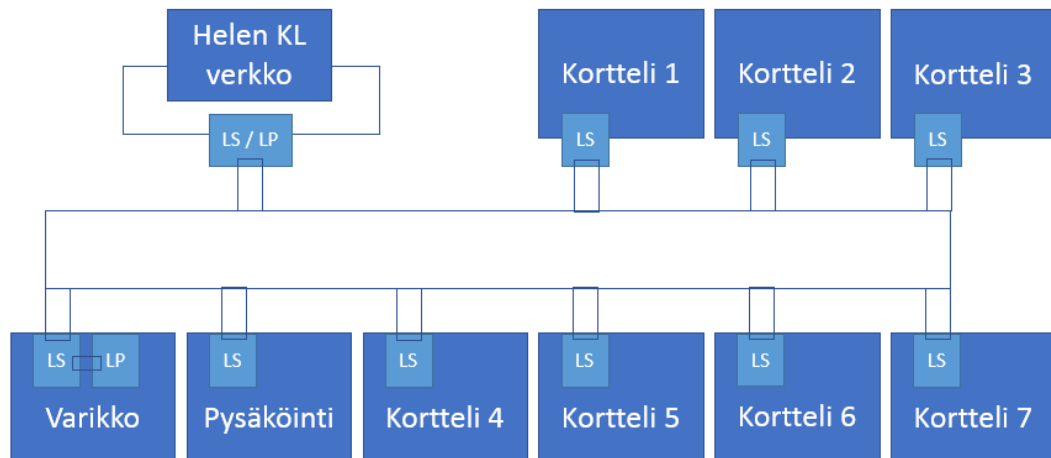
3.1 Investointikustannukset

Perustapauksessa varikolle, pysäköintihalliin ja jokaiseen asuinrakennukseen hankitaan erillinen kaukolämpöliittymä. Kaukolämpöliittymät mitoitetaan luvussa 2 esitettyjen lämmitystehontarpeiden perusteella (tilalämmityksen ja ilmanvaihdon tarvitsema kokonaislämmitysteho). Vastaavat liittymät hankitaan myös kaukokylmäjärjestelmille kohdekohtaisesti. Perustapauksen periaatekuva on esitetty kuvassa 11. Sama periaate pätee sekä kaukolämpö- että kaukokylmälle: jokainen rakennus toteuttaa oman kaukolämpö- tai kaukokylmäliittymänsä suoraan Helenin verkkoihin.



Kuva 11. Periaatekuva rakennusten liittämisestä Helenin verkkoon. LS = lämmönsiirrin

Energiankierrätys-vaihtoehdossa alueelle rakennetaan aluelämpö- ja aluekylmäverkot, jotka liitetään osaksi kaukolämpö- ja kaukokylmäverkkoja yhdellä liittymällä. Järjestelmätasolla energiankierrätys-ratkaisu poikkeaa perusratkaisusta erityisesti jäähditysenergian tuotannon osalta, sillä energiankierrätyksessä tarvittava jäähditysenergia tuotetaan pääasiassa CO₂-lämpöpumpulla kaukokylmän sijaan. Huipputehoja varten tarvitaan liittymä kaukokylmäverkostoon. Ratkaisun periaatekuva on esitetty kuvassa 12. Sama periaate pätee sekä kaukolämpö- että kaukokylmälle: jokainen rakennus liittyy aluelämpö- tai aluekylmäverkkoon ja korttelille rakennetaan yhteinen kaukolämpö- tai kaukokylmäliittymä Helenin verkkoihin. Ainoa ero kaukolämmön ja kaukokylmän välillä on Helenin verkkoon tehtävän liittymän tekninen toteutus: lämmityspuolella liittyminen voidaan toteuttaa lämmönsiirtimellä, mutta kylmäpuolella liityntään tarvitaan lämpöpumppu.



Kuva 12. Periaatekuva aluelämpö- tai aluekylmäverkosta ja sen liittamisestä Helenin verkkoon. LS = lämmönsiirrin, LP = lämpöpumppu

Alustavat arviot eri järjestelmäratkaisujen investointikustannuksista on esitetty taulukossa 1. Investointikustannuksissa on esitetty vain järjestelmäratkaisujen väliset erot. Molemmissa ratkaisuvaihtoehdoissa rakennukset tarvitsevat esimerkiksi lämmönsiirripaketit liittyäkseen kaukolämpö- tai aluelämpöverkkoon, joten kaukolämpöpakettien kustannuksia ei ole erikseen arvioitu. Toisaalta alueellisessa ratkaisussa ratikkakorttelin täytyy investoida aluesiirtimeen (kuva 12, Helenin ja alueverkon yhdistävä lämmönsiirrin "LS"), jolla aluelämpöverkko liitetään kaukolämpöverkkoon. Kaukokylmäpuolella aluekylmäverkon liittäminen kaukokylmäverkkoon toteutetaan lämpöpumppulaitoksella (kuva 12, Helenin ja alueverkon yhdistävä lämpöpumppu "LP"), jonka hinta on huomioitu kaukokylmäliittymän hinnoittelussa eli Helen tekee investoinnin.

Kustannusarvio perustuu karkeisiin arvioihin kohteen energian- ja tehontarpeista ja soveltuvat vain konseptitason elinkaarikustannusten vertailuun.

Taulukko 4. Karkeat arviot järjestelmäratkaisujen investointikustannusten eroista.

	Perusratkaisu	Energiankierrätys
Kaukolämpöliittymät	158 000	76 000
Aluesiirrin (lämpö)	-	42 000
Kaukokylmäliittymä	450 000	118 000
Alueellinen lämpö- ja kylmäverkko energiankierrätykseen	-	900 000
CO₂-lämpöpumppu	-	286 000
Yhteensä	608 000	1 422 000

Energiankierrätyksen jälkeen jäljelle jäävä ostolämmitysenergian tarve voidaan kattaa kaukolämmön sijaan myös maalämpökaivojen avulla. Tällöin alueelle ei tarvita kaukolämpöliittymää, vaan noin 50 kpl maalämpöporakaivoja. Niiden arvioitu investointikustannus on 600 000 euroa. Maalämpöporakaivojen avulla voi olla mahdollista luopua myös kaukokylmän liittymästä, mutta tämä vaatii tarkempaa laskelmaa maalämpökaivojen energiataseesta.

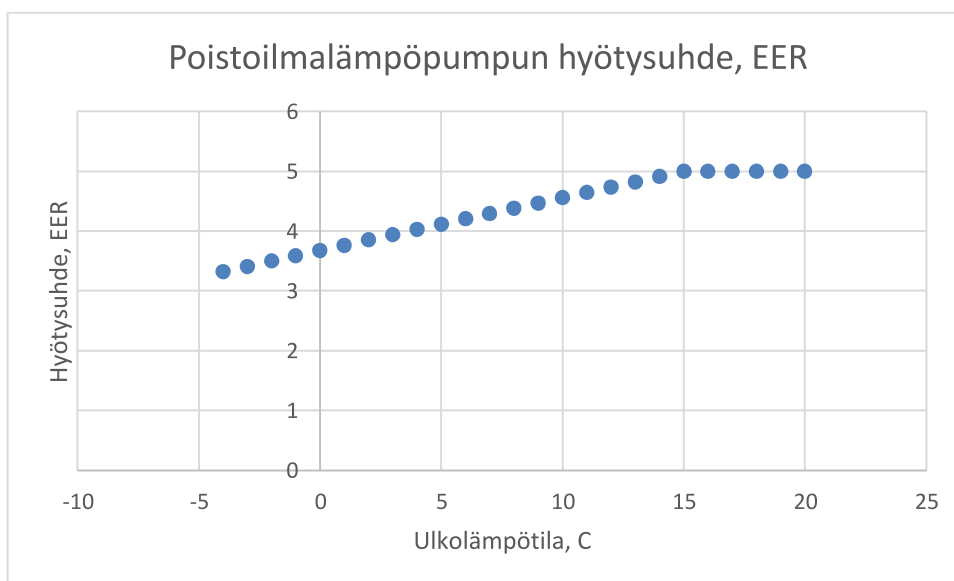
3.2 Käyttökustannukset

3.2.1 Lämpöpumpun hyötysuhteet

Energiankierrätysratkaisussa varikolle hankitaan CO₂-lämpöpumppu. Kylmäaineeksi valittiin hiilidioksidi, koska kylmäaineisiin liittyvät rajoitukset lisääntyvät jatkuvasti ja haluttiin käyttää ratkaisua, joka on ympäristöystävällinen ja jolle ei ole nähtävissä käyttörajoituksia tulevaisuudessa. Lisäksi CO₂-lämpöpumppu sopii parhaiten korkeaa lämpötilatasoa tarvitseville kohteille.

Lämpöpumpun hyötysuhteeseen vaikuttavat sekä energianlähteen että kulutuskohteen lämpötilatase. Konseptitason laskennassa oletettiin, että kierrätettävä energia nostetaan käyttöveden lämmitykseen tarvittavalle, noin 65 Celsiusasteen, tasolle.

Jäteilmasta saatavan lämpöenergian osalta lämpöpumpun hyötysuhteeseen vaikuttaa ulkoilman lämpötila, sillä ulkoilman lämpötilan ollessa alle -4 C jäteilmasta ei saada kerättyä lämpöä, mutta ulkoilman lämpötilan noustessa jäteilmasta saadaan enemmän lämpöä hyödynnettäväksi paremmalla hyötysuhteella. Lämpöpumpun hyötysuhteen muutos ulkolämpötilan funktiona on esitetty kuvassa 13.



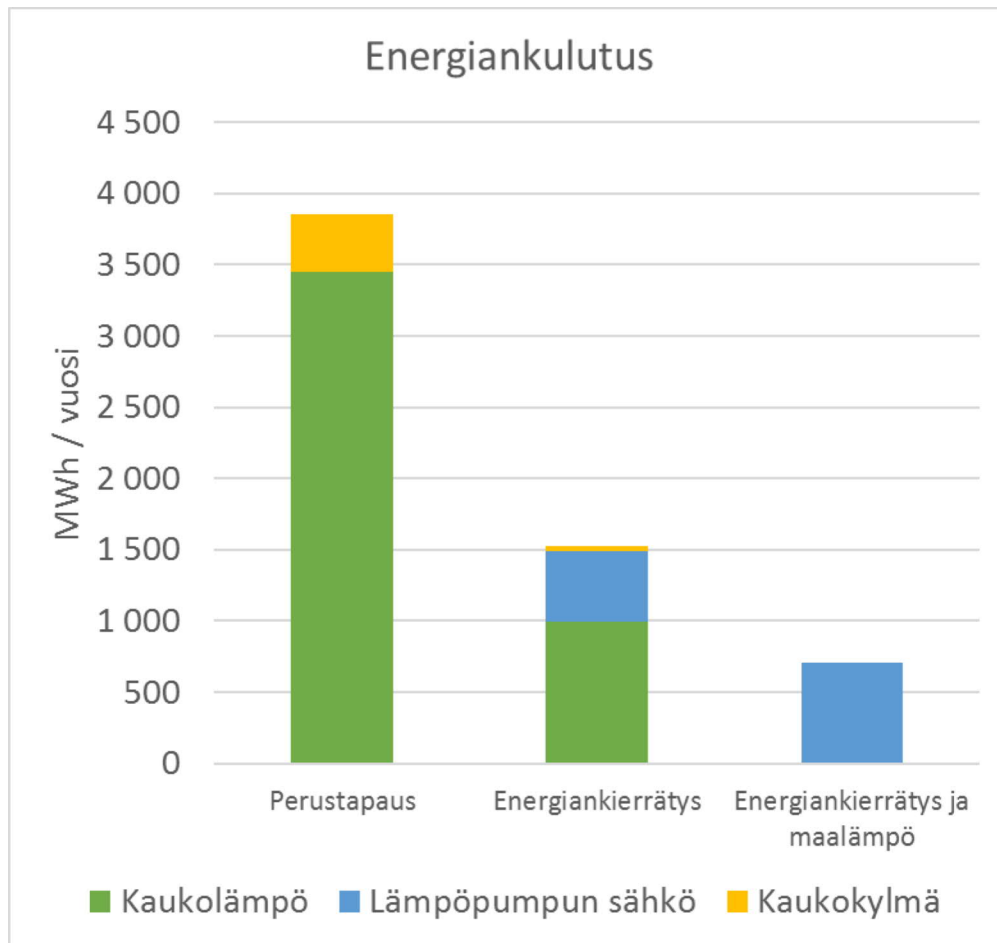
Kuva 13. Lämpöpumpun hyötysuhde, kun energianlähteenä on ilmanvaihdon jäteilma.

Jäteilman lisäksi kierrätettävää energiaa saadaan muuntamojen, ilmanvaihdon ja muiden tilajäähdytyslaitteiden tarvitsemasta jäähdytysenergiasta. Näiden osalta energianlähteen eli lämpöpumpulle tulevan jäähdytyspiirin lämpötilan oletettiin pysyvän samana vuodenajasta riippumatta. Myös lämmityspiirin lämpötila oletettiin vakioksi, jolloin voitiin pitää lämpöpumpun kylmätuoton hyötysuhdetta vakiona. Näiden energialähteiden osalta oletettiin lämpöpumpun kylmätuoton hyötysuhteeksi (EER) 4.

CO₂-lämpöpumpun korkea hyötysuhde perustuu alijäähdytykseen, jota tapahtuu tilanteissa, kun tuotetaan kuumaa nestettä. Tapauksessa, jossa tarvitaan ainoastaan jäähdytysenergiaa, ei CO₂-lämpöpumppu pysty alijäähdyttämään nestettä lämmitysverkostoon ja lämpöpumpun hyötysuhde laskee. Tällaisessa tilanteessa on laskennassa käytetty lämpöpumpun kylmätuoton hyötysuhteena (EER) arvoa 3.

3.2.2 Energiankulutus

Alueellisen energiaprofiilin avulla saatujen energiavirtojen sekä lämpöpumpun hyötysuhteen avulla lasketun sähköenergiankulutuksen avulla voidaan arvioida alueen energiankierrätyspotentiaalia. Ajanhetkinä, jolloin alueella esiintyy samanaikaista lämmitys- ja jäähdytystarvetta tai jäteilman lämmöstä voidaan kerätä lämpöenergiaa, voidaan lämmitysenergiantarve tai osa siitä kattaa lämpöpumpulla tuotettavan lauhdeenergian avulla. Energiankierrätysjärjestelmään on mahdollista liittää myös maalämpökenttä, jolloin voitaneen luopua täysin kaukolämpöliittymästä ja mahdollisesti myös kaukokylmäliittymästä. Eri ratkaisuvaihtoehtojen energiankulutukset vuoden ajalle on esitetty kuvassa 14.



Kuva 14. Eri järjestelmävaihtoehtojen vuotuiset energiankulutukset.

3.2.3 Energiakustannukset

Luvussa 2 esitettyjen energiasimulointitulosten sekä luvussa 3.2.2 esitettyjen hyötysuhteiden perusteella laskettiin perustapauksen sekä energiakierrätysratkaisun kaukolämmön ja verkkosähkön energiakustannukset. Kaukolämmön osalta käytettiin energianhintana Helenin vuoden 2018 kausihinnastoa (alv 0 %) ja verkkosähkön osalta Nordpoolin vuoden 2017 toteutunutta tuntitason sähköhintaa sekä Helenin sähkönsiirtohintoja sisältäen sähköveron (alv 0 %).

Perustapauksen kaukolämpöliittymä on teholtaan suurempi kuin energiakierrätysratkaisun kaukolämpöliittymä, joten kaukolämmön tehomaksut huomioitiin vuotuisen energiakustannusten vertailussa. Järjestelmävaihtoehtojen vuotuiset energiakustannukset on esitetty taulukossa 5.

Taulukko 5. Karkea arvio ratkaisujen vuotuisten energiakustannusten eroista, euroa / vuosi.

	Perusratkaisu, €	Energiankierrätys, €
Kaukolämpö	245 000	100 000
Kaukokylmä	62 000	18 000
Lämpöpumpun sähkö	-	48 000
Yhteensä	307 000	166 000

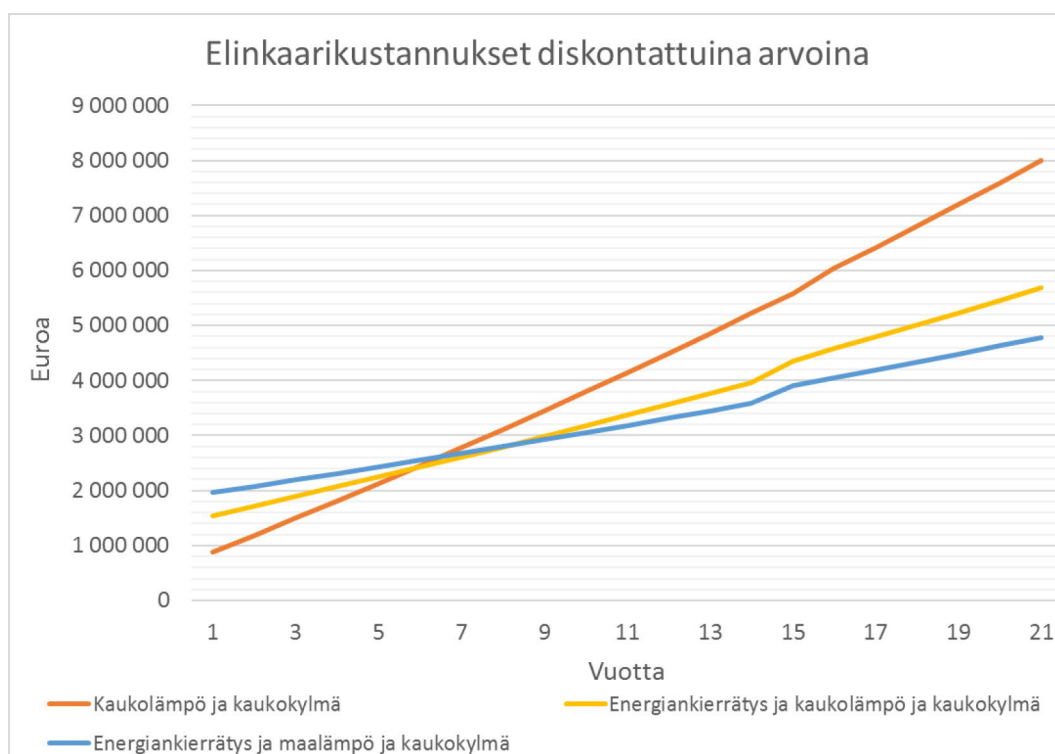
3.2.4 Huoltokustannukset

Energiankierrätykseen tarvittavan CO₂-lämpöpumpun vuotuisiksi huoltokustannuksiksi on arvioitu 6 500 euroa. Aluelämmönsiirtimen ylläpitokustannukseksi on arvioitu 1 000 euroa. Muut komponentit perusratkaisussa ja energiankierrätysratkaisussa ovat samat, joten niiden huoltokustannukset ovat samat.

3.3 Elinkaarilaskelmat

Elinkaarilaskelmissa diskonttaus korkona käytettiin arvoa 3.0 % ja energianhinnan nousuna arvoa 4.6 % Rakennusten elinkaarimittarit 2013 -ohjeistuksen mukaisesti.

Elinkaarikustannuslaskennan tulokset on esitetty kuvassa 15.



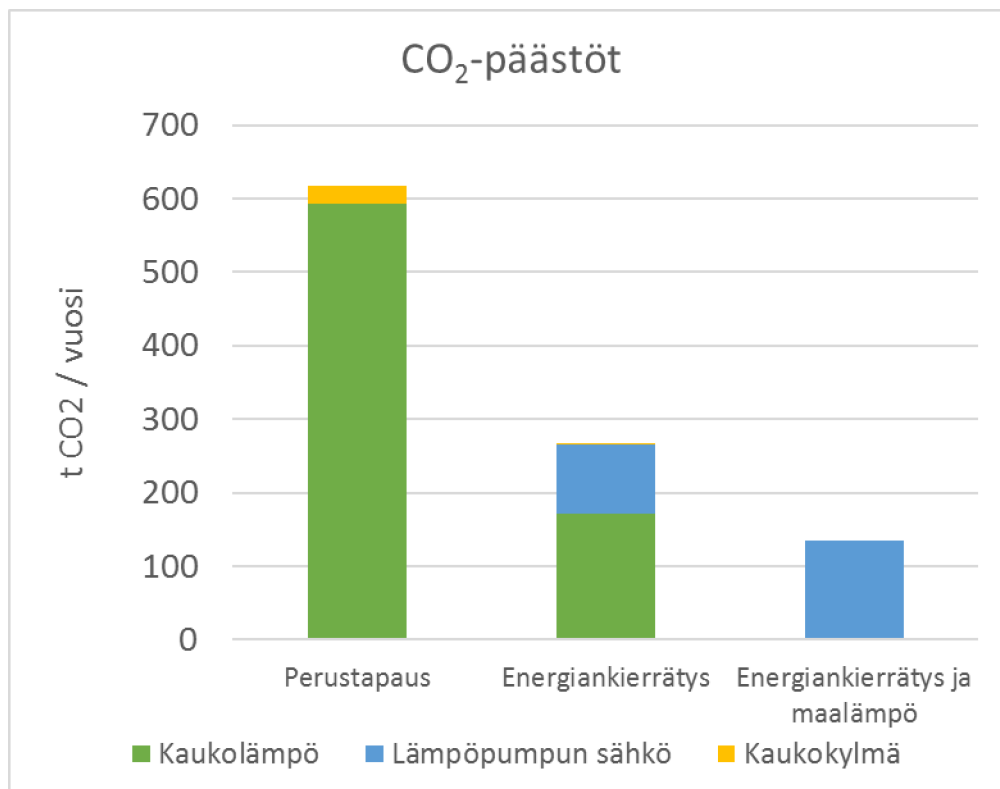
Kuva 15. Järjestelmävaihtoehtojen elinkaarikustannusvertailu.

Elinkaarikustannuslaskennan perusteella lämmöntalteenoton toteuttaminen maksaa itsensä takaisin perustapaukseen verrattuna noin 6 vuodessa.

Mikäli kaukolämpöliittymästä halutaan luopua kokonaan, voidaan tarvittava ostolämmitysenergiatarve tuottaa maalämpöjärjestelmän avulla. Maalämpöjärjestelmä voidaan kytkeä muiden hukkalämmönlähteiden kanssa samaan lämpöpumppuun, jolloin tarvittava lisäinvestointi muodostuu maalämpökaivoista ja sähkökattilasta. Tarvittava maalämpökaivojen määrä on karkeasti arvioiden noin 50 maalämpökaivoa ja niiden toteutuskustannus sisältäen sähkökattilan on noin 600 000 euroa. Maalämpöjärjestelmällä vuotuiset energiakustannukset olisivat noin 110 000 euroa, jos alueelle hankitaan kaukokylmäliittymä lisäenergianlähteeksi kuumien kesäpäivien varalta. Maalämpöjärjestelmän suora takaisinmaksuaika energiankierrätysratkaisuun olisi noin 8 – 9 vuotta ja perinteiseen ratkaisuun verrattuna noin 7 vuotta.

3.4 CO₂-päästöt

Ratkaisuvaihtoehtojen CO₂-päästöjä vertailtiin Helenin julkaisemien vuoden 2017 kaukolämmön ja sähkön ominaispäästöjen avulla, jotka ovat Helenin kaukolämmölle 172 kg/MWh, kaukokylmälle 61 kg/MWh ja sähkölle 191 kg/MWh. Vertailun tulokset on esitetty kuvassa 16.



Kuva 16. Vuotuiset CO₂-päästöt eri vaihtoehdoilla.

Hiilidioksidipäästölaskennan perusteella energiankierrätysratkaisu on ympäristöystävällisempi vaihtoehto kuin energiantarpeen kattaminen kaukolämmöllä ja kaukokylmällä. Tämä johtuu pääsääntöisesti siitä, että CO₂-lämpöpumpulla lämmitysenergiaa voidaan tuottaa hyvin tehokkaasti sähköenergialla hyödyntämällä alueen hukkalämmönlähteitä. Helenin kaukolämmön ja sähköenergian tuotannon CO₂-päästöjen ero on hyvin pieni, vain 19 kg/MWh. Kun huomioidaan lämpöpumpun hyvä hyötysuhde, on lämmön tuottaminen hukkaenergianlähteistä huomattavasti vähäpäästöisempää kuin Helenin kaukolämmön tuotanto nykyisellä energiantuotantopaleillaan.

Laskelmien perusteella energiankierrätys pienentää alueen CO₂-päästöjä lähes 60 % verrattuna perinteiseen ratkaisuun. Jos energiankierrätys yhdistetään maalämpöön, saadaan hiilidioksidipäästöjä pienennettyä entisestään noin 50 % verrattuna ratkaisuun, jossa energiaa kierrätetään ja loput lämmitystarpeesta katetaan kaukolämmöllä. Perinteiseen ratkaisuun verrattuna energiankierrätys ja maalämpö vähentää CO₂-päästöjä jopa 80 %.

4 Johtopäätökset

Elinkaarikustannuslaskennan perusteella energiankierrätys maksaa itsensä takaisin noin kuudessa vuodessa. Lisäksi energiankierrätys vähentää ratikkakorttelin CO₂-päästöjä lähes 60 % perinteiseen kaukolämpö- ja kaukokylmäratkaisuun verrattuna.

Energiankierrätysjärjestelmään on mahdollista lisätä myös maalämpöporakaivoja, joiden tarve olisi alustavan arvion mukaan noin 50 kappaletta ja vastaisi noin 600 000 euron investointia. Maalämpökaivojen avulla energiakustannukset pienenevät noin 70 000 – 90 000 euroa riippuen kylmätehotarpeesta, joten maalämpökaivojen integroiminen osaksi energiankierrätysjärjestelmää maksaisi itsensä takaisin noin 7 – 8 vuodessa. Vaikutus hiilidioksidipäästöihin olisi merkittävä, sillä energiankierrätysratkaisuun verrattuna ne puolittuisivat. Perinteiseen ratkaisuun verrattuna energiankierrätys yhdistettynä maalämpöön aiheuttaisi jopa 80 % pienemmät hiilidioksidipäästöt.

LIITE 1. Raitiovaunujen lähtö- ja saapumisaikataulut varikolle

LINJA	LÄHTÖAIKA	SAAPUMISAIKA
11	4:55	25:28:00
111	14:15	17:50
111	5:40	9:20
112	14:27	18:00
112	7:07	9:30
113	14:37	18:10
113	7:17	9:40
114	14:47	18:20
114	7:27	9:50
115	14:57	18:30
115	7:37	10:00
116	15:07	17:30
116	7:47	9:00
117	15:17	17:40
117	7:57	9:10
12	5:10	20:48
13	5:25	23:20
14	5:55	25:08:00
15	6:15	25:48:00
16	6:45	24:48:00
17	7:03	23:44
21	4:42	23:48
22	4:57	24:00:00
23	6:01	24:12:00
24	5:12	24:21:00
25	5:21	23:41