

Tutkimusraportti

HIILINEUTRAALIT ENERGIARATKAISUT JA LÄMPÖPUMPPUTEKNOLOGIA (HYBE)

Hybridienergiajärjestelmien ratkaisupaketit ei-
asuinrakennusten energiaremontoinnissa

Hankkeen päätutkija

Janne Hirvonen

Muut tutkijat

Natalia Lastovets

Tutkimusryhmän johtaja

Piia Sormunen

SISÄLLYSLUETTELO

1.	Johdanto	1
2.	Taustatietoja.....	2
2.1.	Tutkittavat rakennukset	2
2.1.1.	Sairaalarakennukset	2
2.1.2.	Toimistorakennukset.....	6
3.	Energialaskentamalli.....	9
3.1.	Järjestelmien mallinnusperiaatteet.....	10
3.1.1.	Lämmönjako ja lämpötilat.....	10
3.1.2.	Aurinkolämpö	10
3.1.3.	Aurinkosähkö.....	11
3.1.4.	Lämpöpumppu	11
3.1.5.	Sähköakku.....	12
3.2.	CO ₂ -päästöprofiilit	12
3.3.	Sähkön hintaskenaariot	14
3.4.	Kaukolämmön hinta	16
3.5.	Energiajärjestelmien hintatiedot.....	16
3.6.	Parametriaajo	17
4.	Laskentamallin vertailu IDA-ICE-laskentaan.....	19
4.1.	Aurinkosähkö	19
4.2.	Aurinkolämpö	20
4.3.	Lämpöpumppu	21
5.	Tulokset	23
5.1.	Yleiskatsaus.....	23
5.2.	Hybridiratkaisut eri päästötasoille	27
5.3.	Teknologioiden vaikutukset.....	29
5.4.	Kaksivaiheinen parametriaajo	32
5.5.	Energiantuotantoprofiili	33
6.	Johtopäätökset	35

1. JOHDANTO

Tämä raportti on tehty ”Hiilineutraalit energiaratkaisut ja lämpöpumpputeknologiat”-tutkimusohjelman (HybE) osana. Tutkimussprintissä haluttiin selvittää millaiset hybridienergiaratkaisut sopivat erilaisiin ei-asuinrakennuksiin. Alkuperäiset tutkimuskysymykset olivat:

TK1: *Mitkä hybridienergiaratkaisut ovat tehokkaimpia parantamaan energia- ja kustannustehokkuutta suomalaisissa ei-asuinrakennuksissa, ottaen huomioon erilaiset energiatehokkuuden lähtö- ja tavoitetasot?*

TK2: *Kuinka tarkasteltavat rakennukset toimivat verrattuna energiatodistuksiin ja tavoite-energiankulutuksiin?*

Rakennusten energiajärjestelmien tarkka suunnittelu on aikaa ja asiantuntemusta vaativaa työtä, mikä rajoittaa sen käyttöä korjaushankkeiden hankesuunnittelussa. Erilaisten järjestelmien vaikutuksia voi arvioida myös yksinkertaisemmilla vuosi- tai kuukausitason menetelmillä, mutta näissä on vaikea huomioida modernien hybridijärjestelmien dynamiikkaa ja eri järjestelmien keskinäisiä vuorovaikutuksia sekä energian hintojen päivänsisäistä vaihtelua.

Tutkimuksessa päätettiin kehittää avoimen koodin laskentatyökalu, jolla erilaisia hybridiratkaisukokonaisuuksia voitaisiin tarkastella nopeasti tuntitasolla ilman monimutkaista mallinnustyötä. Yksittäisiin tapauksiin soveltuvien energiaratkaisupakettien sijaan laskentatyökalusta tulikin lopulta tutkimushankkeen pääasiallinen tulos.

2. TAUSTATIETOJA

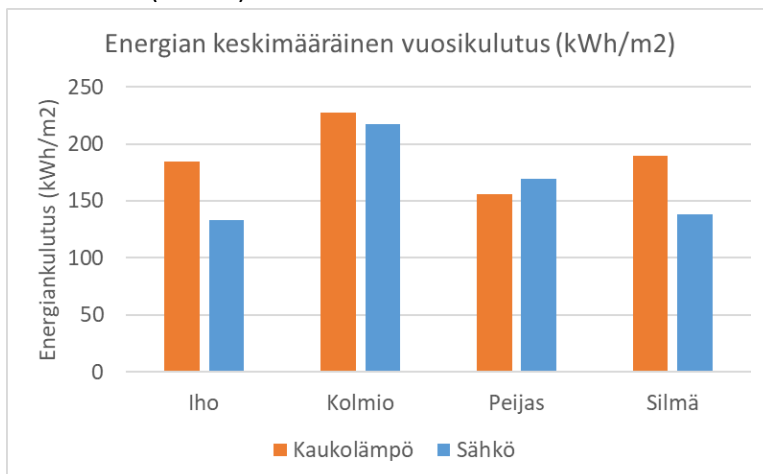
Tutkimusta varten kerättiin taustatietoja kumppaniyrityksiltä. Näitä olivat eri rakennusten energiankulutustiedot ja hybridijärjestelmien kustannustiedot. Alkuperäisenä tavoitteena oli hyödyntää järjestelmämallinnuksessa kokeellista mittausdataa todellisista järjestelmistä, mutta tällaista tietoa ei lopulta ollut saatavilla. Järjestelmämallinnus on kuitenkin toteutettu dynaamisesti tuntitasolla hyödyntäen mm. järjestelmävalmistajien ilmoittamia teknisiä tietoja.

2.1. Tutkittavat rakennukset

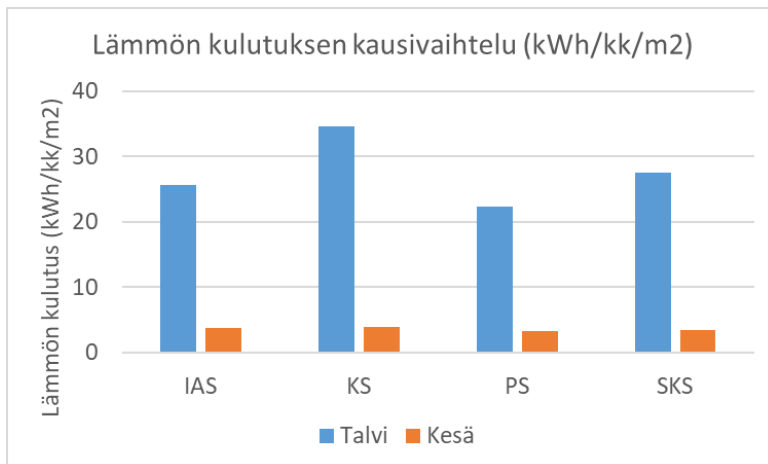
Tarkasteltavana oli kymmenen toimistorakennusta ja neljä sairaalaa. Rakennuksista oli käytössä kuukausi- ja tuntikohtaiset sähkön ja kaukolämmön kulutustiedot.

2.1.1. Sairaalarakennukset

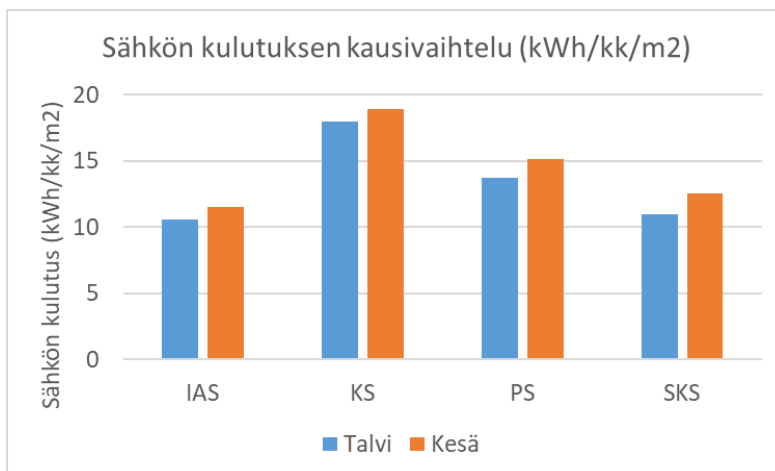
Sairaalarakennuksista tiedetään kulutustietojen lisäksi niiden lämmitetyt pinta-alat ja energiatodistuksen E-luku. Sairaalarakennusten lämmön- ja sähkönkulutuksien suhde vaihteli. Esim. Iho- ja allergiasairaalassa lämpöä kuluu vuositasolla selvästi enemmän kuin sähköä, kun taas Peijaksen sairaalassa sähköntarve oli vuositasolla lämmöntarvetta suurempi (Kuva 1). Tästä voi seurata erilaisia tarpeita sähkön- ja lämmöntuotannolle. Myös kausivaihtelu lämmönkulutuksessa kesän ja talven välillä oli erilaista eri sairaaloissa (Kuva 2). Kaikissa sairaaloissa sähköä kului enemmän kesällä kuin talvella (Kuva 3).



Kuva 1. Sairaalarakennusten energiankulutus vuositasolla.

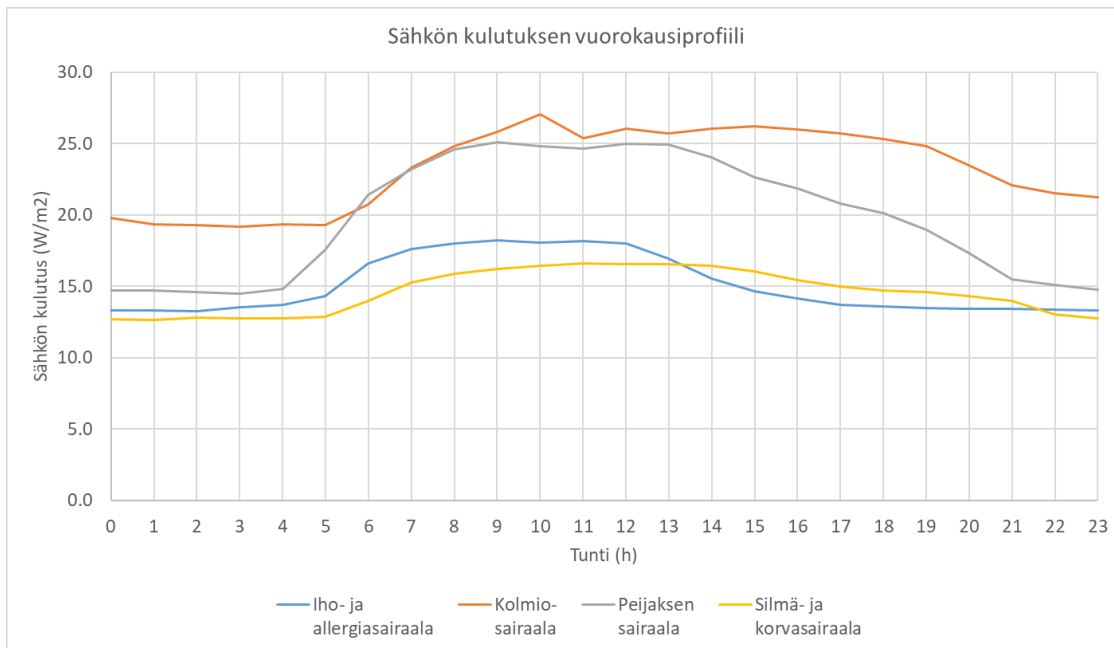


Kuva 2. Sairaalarakennusten lämmönkulutus kesällä ja talvella.



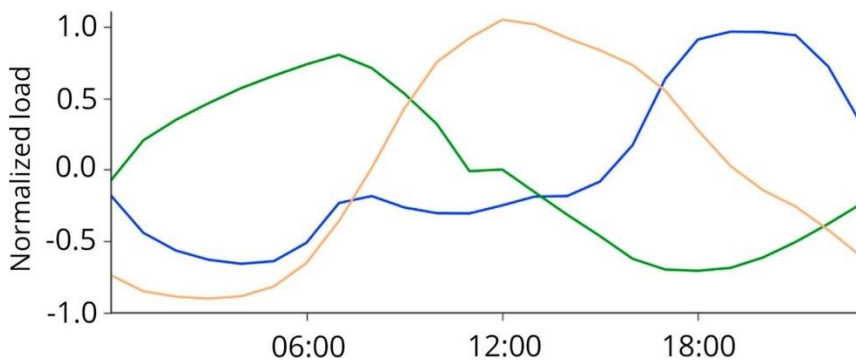
Kuva 3. Sairaalarakennusten sähkön kulutus kesällä ja talvella.

Kuva 4 näyttää sairaalarakennusten sähkönkulutuksen vuorokausiprofiilit. Kaikissa rakennuksissa yöajan kulutus on suurta. Huippukulutuksen ajoitus vaihtelee hieman. Iho- ja allergiasairaalassa huippukulutus painottuu aamuun, kun taas Kolmiosairaalassa aktiivinen toimintaa jatkuu iltaseitsemään asti. Kolmiosairaalassa myös yöajan kulutus on erityisen suurta.



Kuva 4. Sairaalarakennusten sähkönkulutuksen keskimääräiset vuorokausiprofiilit.

Yksi tapa luokitella rakennuksia on niiden kulutusprofiilien mukaan ts. rakennuksen kulutushuipun ajankohdan mukaan (Kuva 5). Kaikissa tarkastelluissa rakennuksissa kulutushuippu osui kuitenkin päiväaikaan.



Kuva 5. Energiankulutuksen perusprofiilit: aamu-, päivä- ja iltapainotteiset kulutukset. Park et al. 2019

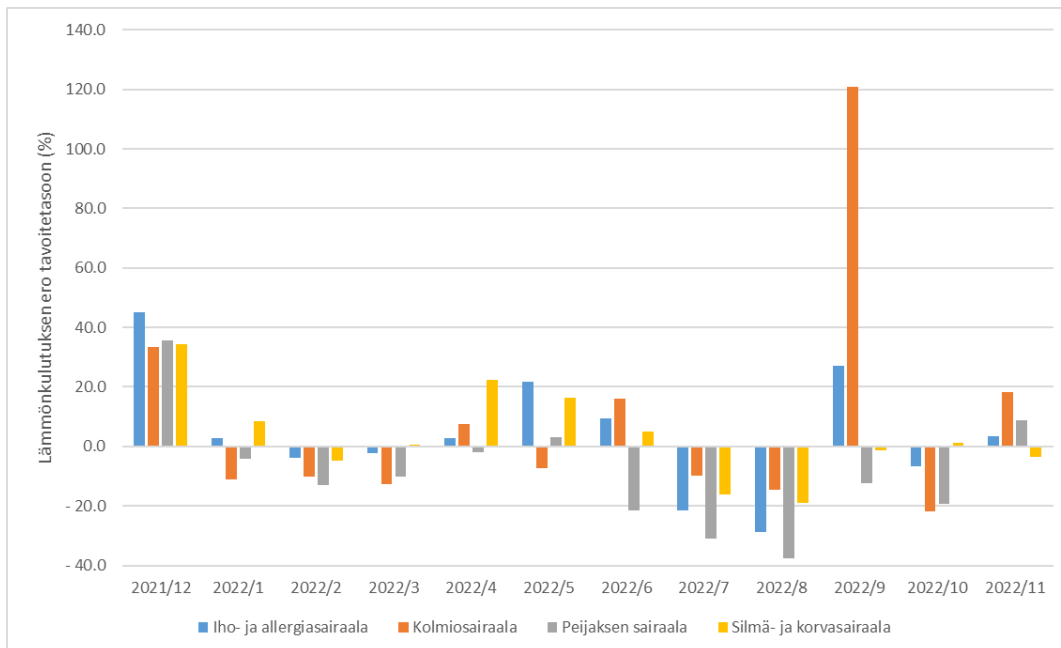
Perusprofiilien sijaan rakennuksia pyrittiin luokittelemaan muiden energiankulutusindikaattoreiden avulla (Taulukko 1). Näitä olivat sähkön ja lämmön kulutus vuositasolla ja kesällä/talvella sekä kulutuksien suhteet ja huippu- ja keskitehon suhde. Sairaalarakennuksien tapauksessa myös E-luku oli saatavilla.

Taulukko 1. Sairaalarakennusten luokittelu kulutusominaisuuksien mukaan.

Energian tunnusluku		Iho- ja allergiasairaala	Kolmiosairaala	Peijaksen sairaala	Silmä- ja korvasairaala
Lämmön ominaiskulutus (kWh/m ²)		197.8	230.3	160.8	189.4
Sähkön ominaiskulutus (kWh/m ²)		132.2	205.0	172.3	128.4
Lämmön ja sähkön kulutuksien suhde		1.5	1.1	0.9	1.5
Talven ominaislämmönkulutus (kWh/m ² /kk)		26.9	35.1	23.1	26.1
Kesän ominaislämmönkulutus (kWh/m ² /kk)		3.6	3.3	3.1	3.4
Talven ja kesän lämmöntarpeen suhde		7.5	10.5	7.4	7.6
Lämmön huippu- ja keskikulutuksien suhde		2.9	3.1	3.3	3.1
Talven ominaissähkönkulutus (kWh/m ² /kk)		10.2	17.6	13.9	10.2
Kesän ominaissähkönkulutus (kWh/m ² /kk)		11.8	17.5	15.6	11.5
Talven ja kesän sähköntarpeen suhde		0.9	1.0	0.9	0.9
Sähkön huippu- ja keskikulutuksien suhde		1.77	1.51	1.80	1.69
E-luku, energiatodistus (kWh/m ²)		428	398	436	492
Primäärienergia, mitattu (kWh/m ²)		256	361	287	249

E-luku oli tutkituissa sairaalarakennuksissa keskimäärin 57% korkeampi kuin mitatun kulutuksen pohjalta laskettu primäärienergiankulutus. Pienimmillään ero oli Kolmiosairaalassa, vain 10%, mutta Silmä- ja korvasairaalassa virallinen E-luku oli lähes kaksinkertainen mitattuun kulutukseen verrattuna.

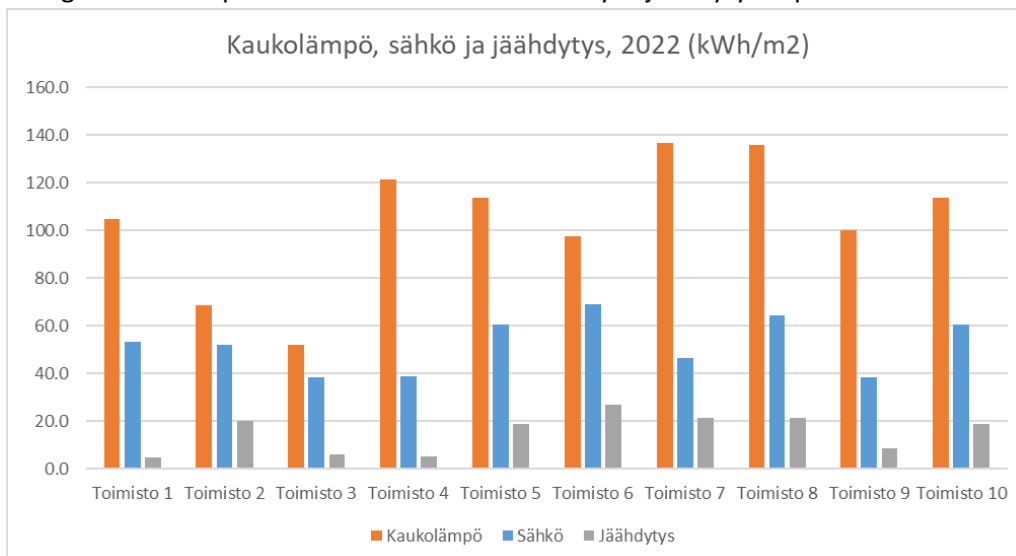
Sairaalarakennuksille oli esitetty myös vuosi- ja kuukausikohtaiset tavoite-energiankulutukset. Vuositasolla tarkastelujakson toteutunut kulutus oli lähellä tavoitetta, vaihdellen 3% alituksesta 7% ylitykseen. Kuukausitason erot näkyvät KuvassaKuva 6. Joulukuussa kaikki rakennukset ylittivät tavoitekulutuksen roimasti, mutta muuten suurimmat erot keskittyvät lämpimille jaksoille. Kun kulutus on pientä, pienetkin absoluuttiset muutokset aiheuttavat suuria suhteellisia eroja. Syyskuussa Kolmiosairaalan kulutus oli kuitenkin yli kaksinkertainen tavoitetasoon nähden, mikä todennäköisesti aiheutui jonkinlaisesti poikkeustilasta.



Kuva 6. Sairaalarakennusten mitatun lämmönkulutuksen ero tavoitetasoon.

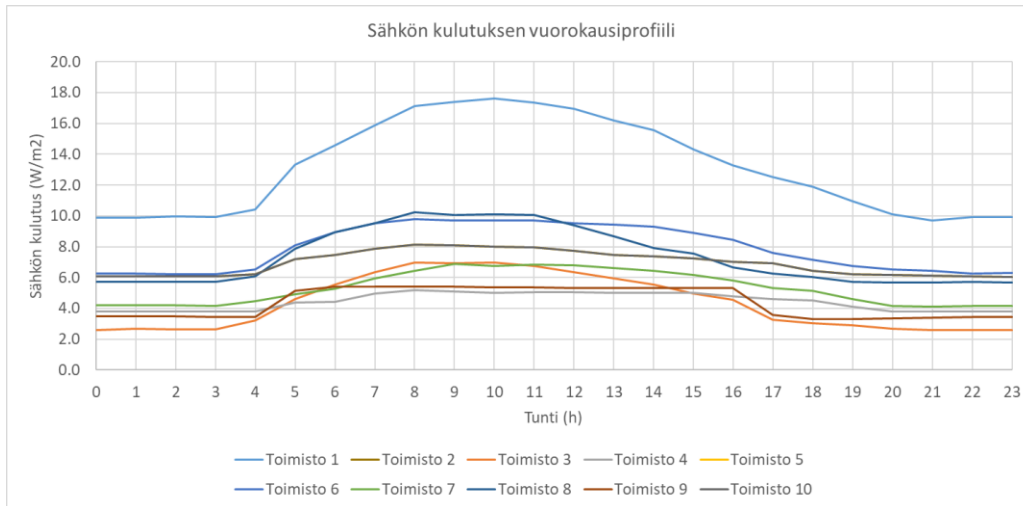
2.1.2. Toimistorakennukset

Senaatin toimistorakennukset pidettiin anonyymeinä. Rakennuksista tiedetään kulutustietojen lisäksi niiden rakennusvuosi ja pinta-ala. Toimistorakennusten ominaiskulutukset vaihtelivat merkittävästi (Kuva 7). Vuotuinen ominaislämmönkulutus oli joissain rakennuksissa lähes kolminkertainen uusimpaan ja energiatehokkaimpaan kohteeseen verrattuna. Myös jäähdytystarpeissa oli moninkertaisia eroja.



Kuva 7. Toimistorakennusten energiankulutus kulutuslajeittain.

Kuva 8 näyttää toimistorakennusten sähkönkulutuksen vuorokausijakauman. Muoto on pääpiirteissään sama kaikissa rakennuksissa ja huippukulutus kohdistuu selvästi päiväaikaan. Verrattuna sairaalarakennuksiin, sähkön pohjakulutus on pienempää.



Kuva 8. Toimistorakennusten keskimääräiset vuorokauden sähkönkulutusprofiilit.

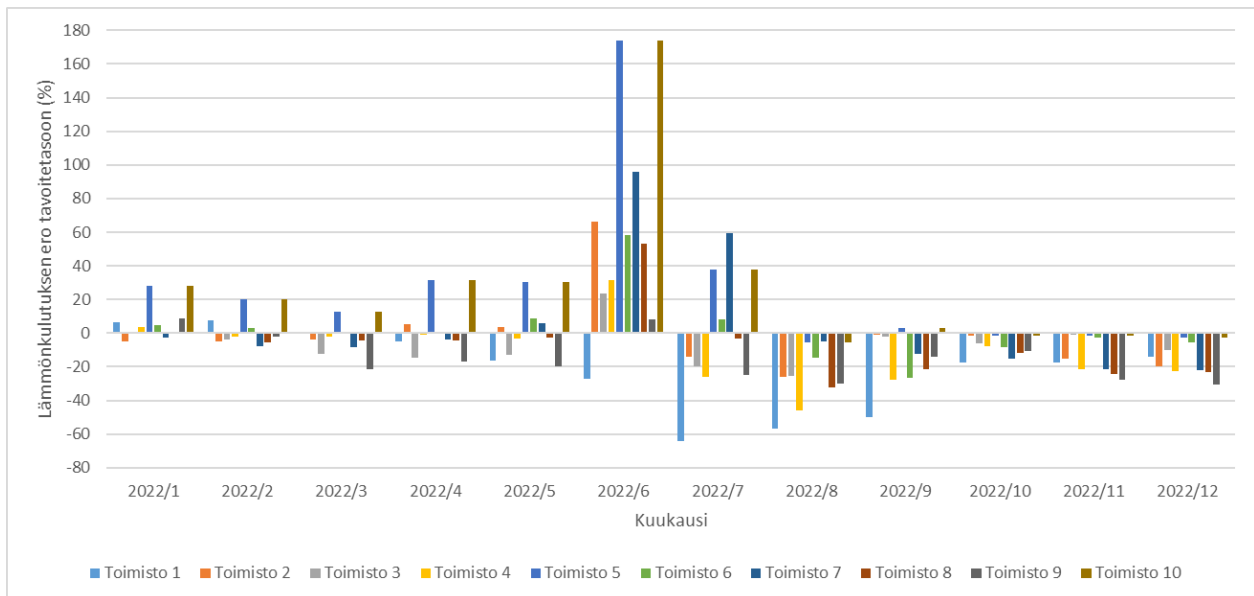
Taulukko 2 sisältää toimistorakennusten tunnusluvut vuoden 2022 kulutuksen mukaan. Verrattuna sairaalarakennuksiin, ominaiskulutukset ovat pienempiä, kun taas sähkön huippu- ja keskipulutusien suhteet ovat suurempia.

Taulukko 2. Toimistorakennusten luokittelu kulutusominaisuuksien mukaan.

Energian tunnusluku		Toimisto 1	Toimisto 2	Toimisto 3	Toimisto 4	Toimisto 5	Toimisto 6	Toimisto 7	Toimisto 8	Toimisto 9	Toimisto 10
Lämmön ominaiskulutus (kWh/m ²)		104.7	68.5	51.9	121.3	113.9	97.4	136.7	135.8	100.1	113.9
Sähkön ominaiskulutus (kWh/m ²)		53.3	52.0	38.3	38.8	60.6	69.2	46.6	64.5	38.4	60.6
Jäähdytyksen ominaiskulutus (kWh/m ²)		4.9	20.2	6.2	5.2	19.0	26.9	21.4	21.5	8.8	19.0
Lämmön ja sähkön kulutuksien suhde		2.0	1.3	1.4	3.1	1.9	1.4	2.9	2.1	2.6	1.9
Talven ominaislämmönkulutus (kWh/m ² /kk)		16.3	10.7	8.3	17.7	17.7	14.6	19.1	20.0	17.0	17.7
Kesän ominaislämmönkulutus (kWh/m ² /kk)		1.1	0.6	0.5	1.4	1.2	1.5	3.0	1.9	0.7	1.2
Talven ja kesän lämmöntarpeen suhde		15.3	18.8	16.3	12.7	14.2	9.6	6.3	10.4	22.8	14.2
Lämmön huippu- ja keskipulutusien suhde		3.6	4.7	4.1	2.7	3.2	3.6	2.8	3.3	3.8	3.2
Talven ominaissäähkönkulutus (kWh/m ² /kk)		5.1	4.6	3.2	4.0	5.0	5.5	3.9	4.9	4.4	5.0
Kesän ominaissäähkönkulutus (kWh/m ² /kk)		3.9	4.1	3.0	2.8	5.1	5.9	3.9	5.5	2.6	5.1
Talven ja kesän sähköntarpeen suhde		1.3	1.1	1.1	1.4	1.0	0.9	1.0	0.9	1.7	1.0
Sähkön huippu- ja keskipulutusien suhde		2.28	2.37	2.47	2.26	1.55	1.57	1.84	2.05	2.19	1.55
Primäärienergia, mitattu (kWh/m ²)		117.7	102.3	73.6	108.7	135.0	139.3	130.3	151.3	98.6	135.0

Rakennuksille oli esitetty tavoite-energiankulutukset. Vuositason lämmönkulutuksen osalta mitattu kulutus vaihteli 10% alituksesta 14% ylitykseen tavoitetasoon verrattuna. Kuva 9 näyttää miten eri rakennusten

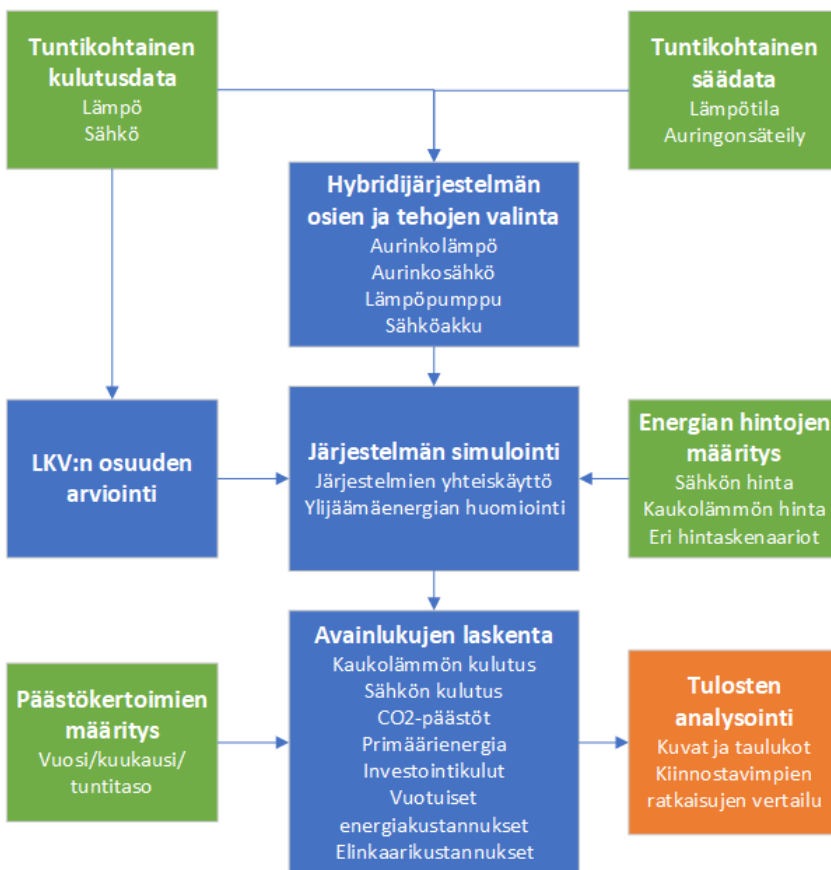
ennusteet pätivät kuukausitasolla. Kesäkuukausilla mitatut kulutukset erosivat tavoitetasoista huomattavasti. Tähän on kuitenkin syynä kesäajan pieni kulutus, jolloin pienikin absoluuttinen erotus näkyy suurena suhteellisena virheenä. Talvikuukausina ero alku- ja loppuvuoden välillä on selkeä. Alkuvuodesta mitattu kulutus oli useimmissa tapauksissa muutaman prosentin päässä tavoitteesta. Toimisto 5 ja Toimisto 10 kuitenkin ylittivät tavoitteen yli 20% verran useana kuukautena. Loppuvuodesta kaikissa kohteissa kuitenkin alitettiin tavoitetasot. Tämä indikoi onnistuneesti toteutettuja energiansäästötoimenpiteitä Venäjän sotatoimia seuranneen energiakriisin myötä.



Kuva 9. Toimistorakennusten mitatun lämmönkulutuksen ero tavoitetasoon.

3. ENERGIALASKENTAMALLI

Rakennusten hybridienergiajärjestelmien tutkimiseksi kehitettiin Python-pohjainen laskentamalli, jolla voidaan tehdä elinkaarilaskelmia huomioiden energiankulutuksen tuntikohtainen dynamiikka (Kuva 10). Laskentamalli ottaa syötteenä tuntikohtaisen säätiedoston, tuntikohtaiset sähkön ja kaukolämmön kulutusprofiilit sekä tuntikohtaiset sähkön hinnat. Lisäksi ohjelmassa voidaan määrittää kaukolämmön ja energiajärjestelmien hinnat sekä laskentajakson pituus ja korkotasot elinkaarikustannuslaskentaa varten.



Kuva 10. Periaatekuva laskentamallin toiminnasta.

Laskentamalli voi huomioida seuraavat järjestelmät: kaukolämpö, aurinkolämpö, aurinkosähkö, lämpöpumppu, sähköakkuvarasto. Laskentamalli laskee eri järjestelmien vaikutukset peräkkäin, kattaen annetun energiankulutusprofiilin tarpeet. Kaikissa tutkittavissa rakennuksissa oli kaukolämpöliittymä, jonka oletettiin pysyvän käytössä kaikissa hybridienergiajärjestelmäkokoonten osissa, vaikkakin mahdollisesti alkuperäistä pienemmällä kapasiteetilla.

Malli kattaa annetun energiankulutusprofiilin tarpeet hyödyntäen eri järjestelmiä peräkkäin seuraavassa järjestyksessä:

1. **Aurinkolämpö** kattaa mitattua lämmöntarvetta niin paljon kuin mahdollista. Ylijäämätuotantoa varastoidaan häviöttä muutaman tunnin huipputuotantoa vastaava määrä ja hyödynnetään heti, kun kulutus ylittää suoran aurinkolämpötuotannon.
2. **Lämpöpumppu** kattaa jäljellä olevan lämmöntarpeen kapasiteetin puitteissa. Mikäli sähkön hinta on kallis, kaukolämpöä hyödynnetään lämpöpumpun sijaan, kuitenkin kaukolämmön huipputehoa rajoittaen.
3. Loput lämmöntarpeesta katetaan **kaukolämmöllä**.
4. **Aurinkosähkötuotanto** kattaa laitesähkön ja lämpöpumpun kulutusta. Ylijäämä varastoidaan akkuun tai myydään verkkoon.
5. **Sähköakku** varastoi ylimääräisen aurinkosähkön. Akkua ladataan myös ostoenergialla, jos hinta on nousussa ja akkua puretaan, jos hinta on laskussa tai aurinkosähkölle ennustetaan ylijäämää. Akun varausta käytetään kuitenkin vain omien kuormien kattamiseen eikä akkusähköä myydä takaisin verkkoon.

Laskentamalli on toteutettu avoimella lähdekoodilla Google Colaboratory -pilviympäristössä. Koodia saa vapaasti muokata ja siihen on mahdollista ohjelmoida uusia järjestelmiä tai muuttaa nykyisten järjestelmien toimintaa.

3.1. Järjestelmien mallinnusperiaatteet

3.1.1. Lämmönjako ja lämpötilat

Rakennuksen lämmitysverkon tuntikohtainen lämpötila määräytyy lämmityskäyrältä ulkolämpötilan mukaan. Oletusarvona mitoitustilanteessa vaaditaan 70 °C lämpötila, mutta tämä on muutettavissa.

Lämpimän käyttöveden (LKV) osuus arvioidaan syötetyn profiilin kesäajan lämmönkulutuksesta. Viikonpäiväkohtaiset LKV-tuntiprofiilit luodaan kesäkuukausien tuntikohtaisista keskiarvoista. Lämpimän käyttöveden lämpötilatasoksi on oletettu 55 °C.

Lämpöpumpun ja aurinkolämmön toiminnan yksinkertaistamiseksi, lämmitysjärjestelmän oletetaan tuottavan vain yhtä lämpötilaa. Koko lämmönkulutuksen lämpötilataso arvioidaan lämmitysverkon ja lämpimän käyttöveden lämpötilatasojen painotetusta keskiarvosta, tilojen lämmityksen ja lämpimän käyttöveden energiantarpeiden suhteiden mukaan.

3.1.2. Aurinkolämpö

Aurinkolämpöjärjestelmälle määritetään asennuskulma pystysuunnassa ja itä-länsi-suunnassa. Auringon suorasäteilyn ja hajasäteilyn lukuarvot muunnetaan aurinkolämpökeräimelle osuvaksi säteilyksi huomioiden keräimen asennuskulmat ja auringon tuntikohtainen sijainti taivaalla [1]. Aurinkolämpöjärjestelmän energiantuotanto lasketaan keräimeen osuvasta säteilystä hyötysuhde- ja häviökertoimien avulla, käyttäen yhtälöä

$$Q = A_{ST}(\eta_0 G - c_1 \Delta T - c_2 \Delta T^2),$$

missä A_{ST} on keräinten pinta-ala, G on keräinpinnalle osuva auringonsäteily, η_0 on keräimen optinen

hyötysuhde ja c_1 sekä c_2 keräimen ensimmäisen ja toiseen asteen lämpöhäviökertoimet. ΔT on aurinkolämpökeräimen keskilämpötilan ja ulkolämpötilan erotus

$$\Delta T = T_m - T_{amb} = \frac{T_{out} + T_{in}}{2} - T_{amb}$$

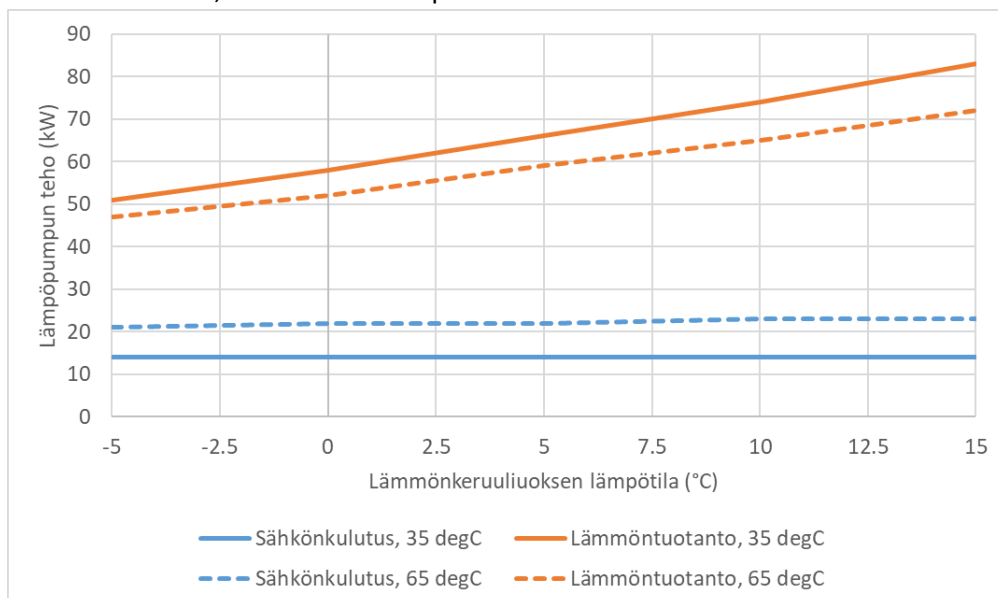
Keräimen tuotantolämpötila vastaa lämmitysverkon ja lämpimän käyttöveden vaatimaa lämpötilaa. Keräimeen oletetaan aina syötettävän 20 °C lämpöistä nestettä. Aurinkolämpökeräimen hyötysuhdekertoimina on oletuksena käytetty Savo-Solar Ruukki Classic -keräimen arvoja (PSK-042/2013). Lämpövarasto mallinnettiin yksinkertaisesti energiapohjaisesti. Varastoon voidaan varastoida (oletuksena) 5 huipputuotantotunnin verran lämpöä ilman häviöitä. Tuntikohtaisen kulutuksen ylittävä tuotanto varastoidaan, jos kapasiteettia riittää. Varaston täytyessä loppu ylijäämäenergia menee hukkaan.

3.1.3. Aurinkosähkö

Aurinkosähkön tuotannon arvioinnissa käytetään samaa säteilymallia kuin aurinkolämmöllä. Hyötysuhteeksi on oletettu 20%, mistä määräytyy keräimen pinta-alan ja nimellistehon suhde 200 W/m².

3.1.4. Lämpöpumppu

Lämpöpumpun lämmöntuotanto arvioidaan COP- ja tehokäyrien avulla. Lämpöpumpulle on määritetty kaksi COP-käyrää, yksi matalalle 35 asteen tuotantolämpötilalle ja toinen korkealle 65 asteen tuotantolämpötilalle. COP ja lämpöpumpun lämpöteho vaihtelevat siis lämmitysverkon lämpötilan ja lämmönlähteen lämpötilan mukaan (Kuva 11). Oletusarvoisesti valitut tehokkuusarvot pohjautuvat NIBE F1345-60 lämpöpumpun teknisiin tietoihin, mutta ne ovat vapaasti muutettavissa.



Kuva 11. Lämpöpumpun lämpö- ja sähkötehot eri lämpötilatasoilla.

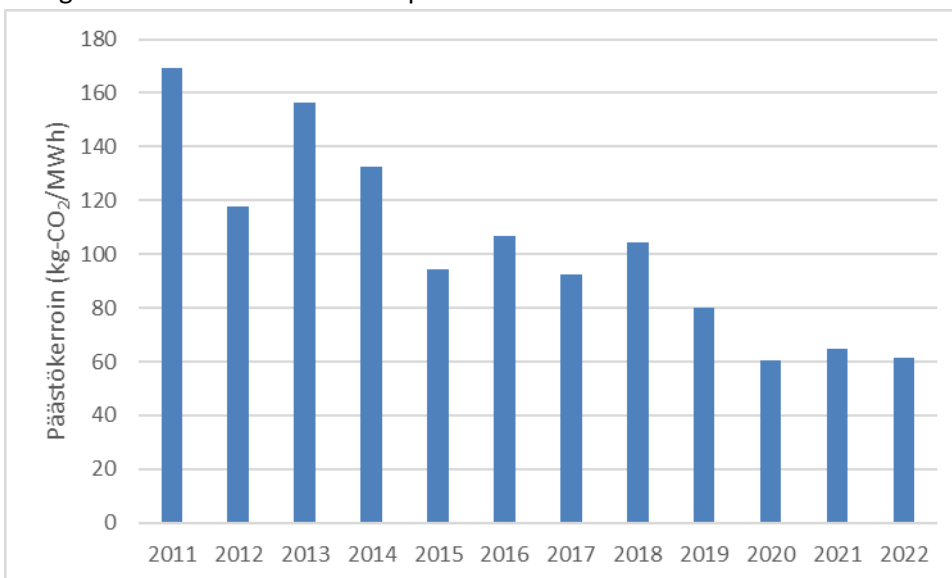
3.1.5. Sähköakku

Sähköakku varastoi sähköä ilman häviöitä. Akku pystyy purkamaan ja lataamaan tunnissa 10% maksimivarauksestaan. Ohjausalgoritmi perustuu seuraavien tuntien sähkön hintoihin ja tietoon aurinkosähkön ylijäämästä. Oletetaan tunnetuksi milloin aurinkosähköstä on ylijäämää. Jos aurinkosähkön tuotannosta on ylijäämää, kyseisen tunnin sähkön hinta asetetaan nollassi.

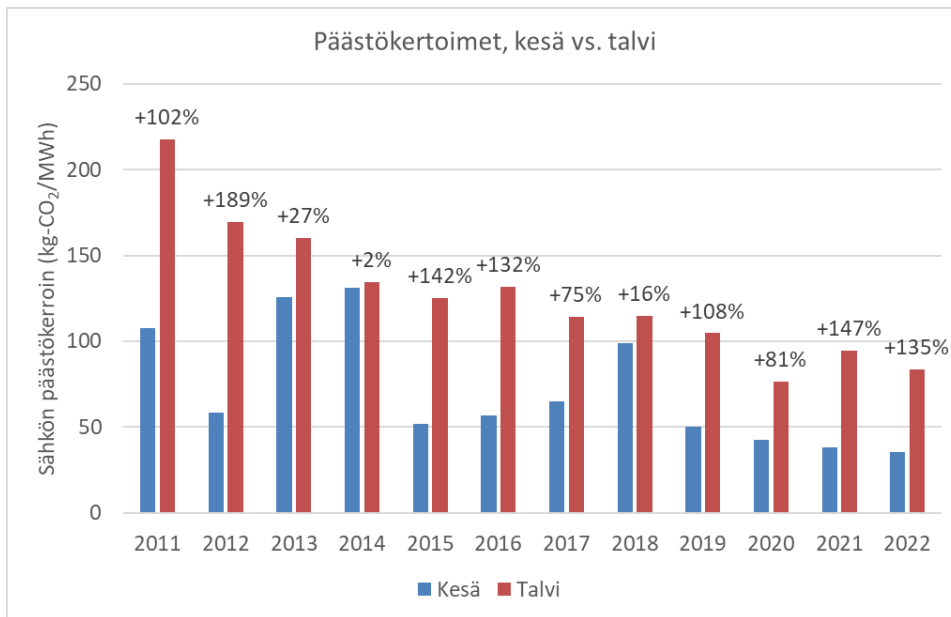
1. Jos aurinkosähköstä on ylituotantoa, lataa akkua.
2. Jos seuraavan viiden tunnin sähkön hintojen mediaani on tämän tunnin hintaa korkeampi, lataa akkua, paitsi jos seuraavina tunteina on odotettavissa aurinkosähkön ylituotantoa.
3. Jos seuraavan viiden tunnin sähkön hintojen mediaani on tämän tunnin hintaa matalampi, pura akkua oman kulutuksen kattamiseksi. Ei akkuun ladatun sähkön myyntiä verkkoon.

3.2. CO₂-päästöprofiilit

Sähköntuotannon päästöt Suomessa ovat tasaisesti laskeneet edellisen vuosikymmenen alusta lähtien (Kuva 12). Päästökertoimien muutoksilla on merkittävä vaikutus hybridijärjestelmien ilmastohyötyihin. Päästökertoimissa on myös selkeää kausivaihtelua: kesäaikana sähkön päästöt ovat talvea matalammat (Kuva 13). Talvella sähkön kulutus on suurempaa ja tuotannossa hyödynnetään enemmän polttamiseen perustuvaa teknologiaa, jolloin myös päästöt ovat suuremmat. Tällöin talviaikaan kohdistuvat energiansäästökeinot vaikuttavat päästöihin keskimääräistä enemmän.

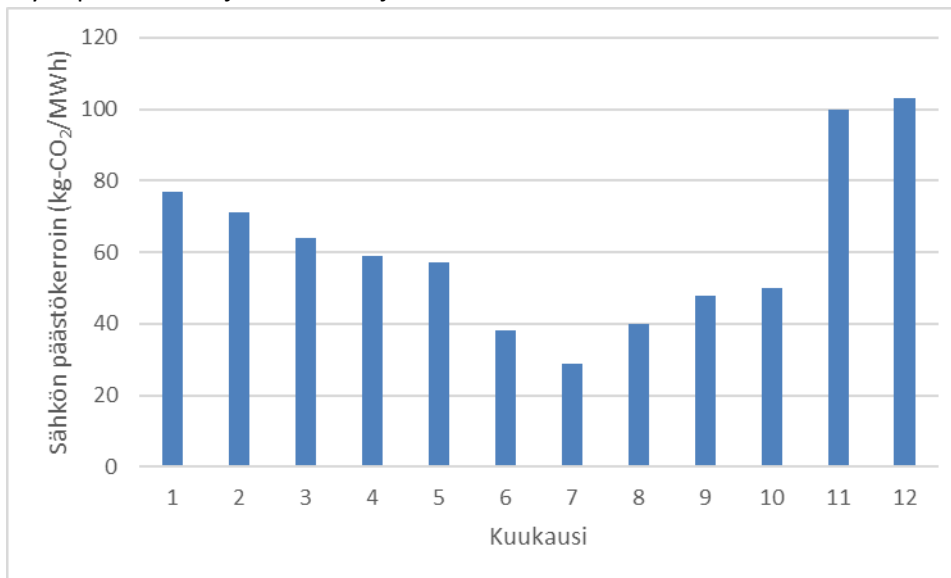


Kuva 12. Sähköntuotannon keskimääräisten päästökertoimien kehitys Suomessa.



Kuva 13. Sähkön tuotannon päästökertoimet Suomessa eroteltuna kesän (kesäkuu-elokuu) ja talven (joulukuu-helmikuu) mukaan. Prosenttiluvut kertovat talviajan päästökertoimien suhteellisen eron kesän päästökertoimiin verrattuna.

Sähkön päästökertoimina käytettiin vuoden 2022 kuukausikeskiarvoja Energiategollisuuden tietojen mukaisesti (Kuva 14). Kesäajalla sähkön päästöt ovat selvästi matalammat kuin talvikaudella, mikä vastaa myös pidemmän ajan keskiarvoja.

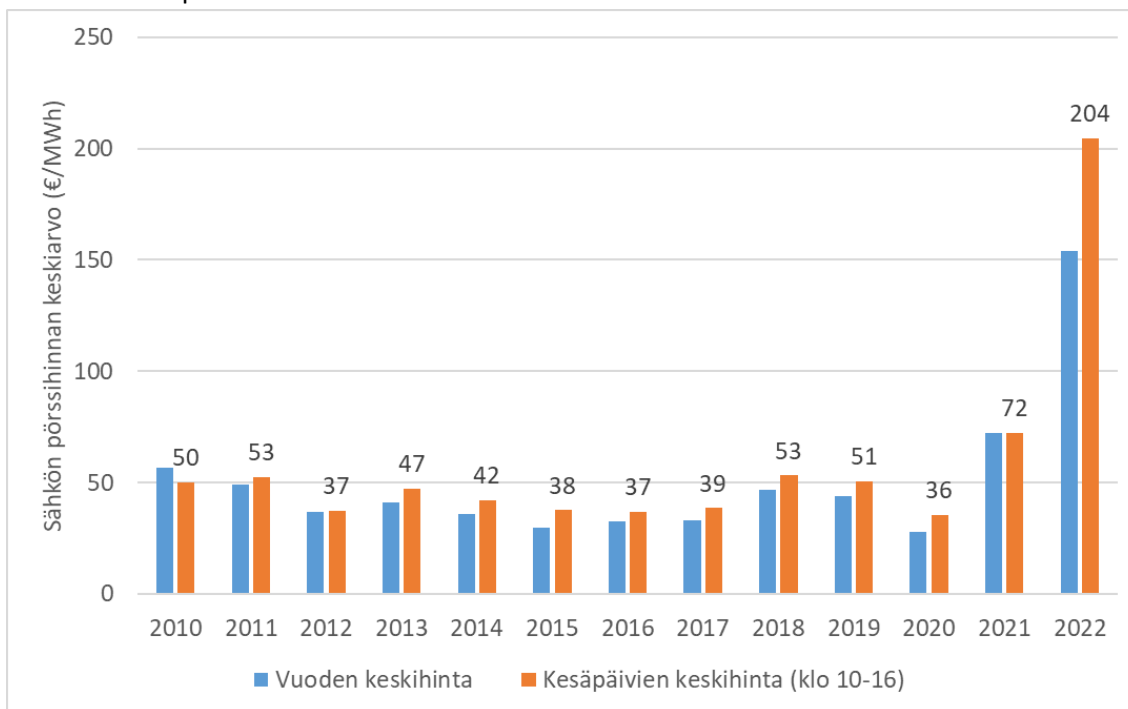


Kuva 14. Sähkön päästökertoimien kuukausikeskiarvot vuodelta 2022.

Kaukolämmön päästökertoimena käytettiin Helenin vuoden 2022 päästöjä, 223 kg-CO₂/MWh. Tämä oletettiin vakioksi koko vuodelle. Kaukolämmön päästökertoimen oli siis selvästi suurempi kuin sähkön.

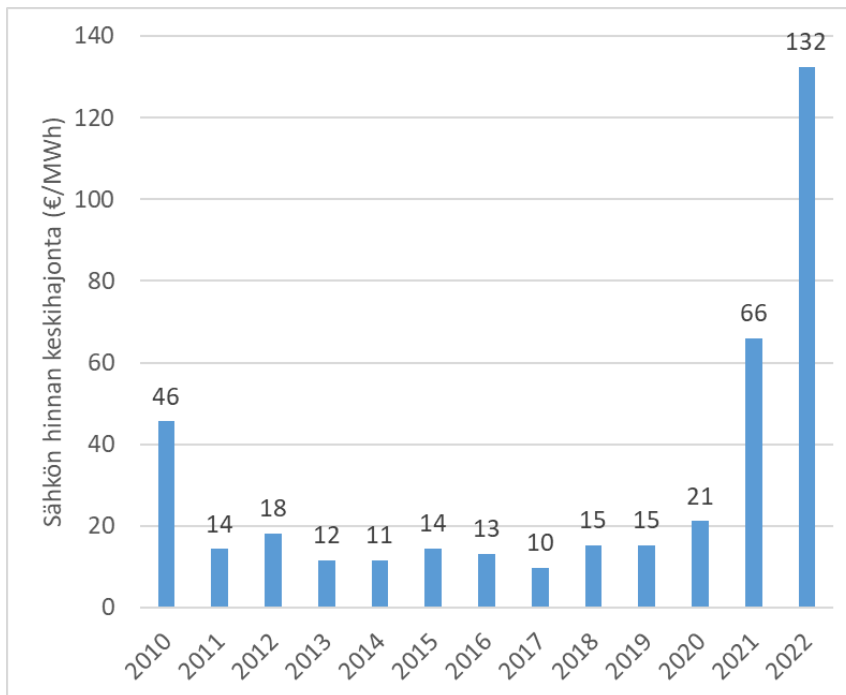
3.3. Sähkön hintaskenaariot

Kuva 15 näyttää sähkön pörssihintojen keskiarvot Suomessa reilun vuosikymmenen ajalta. Lisäksi siinä on eroteltu sähkön keskimääräiset hinnat kesäkauden päiviltä, mikä on relevanttia aurinkosähkötuotannon takia. Vuonna 2021 alkanut energiakriisi näkyy poikkeuksellisen korkeina hintoina edeltäviin vuosiin nähden. Kuva 16 näyttää sähkön pörssihintojen vaihtelun keskihajontana. Energiakriisi nosti selvästi myös hintojen vaihtelua aiempiin vuosiin verrattuna.



Kuva 15. Sähkön pörssihintojen keskiarvot eri vuosilta. Kesäpäivien keskihinta on lisäksi esitetty erikseen.

Sähkön hinnan yleinen taso sekä päivien sisäinen hintavaihtelu riippuu siis vuodesta. Näiden vaikutusten tarkastelemiseksi on luotu neljä sähkön hintaskenaariota: Korkea taso & pieni vaihtelu, korkea taso ja pieni vaihtelu, matala taso ja suuri vaihtelu sekä matala taso ja pieni vaihtelu. Kaukolämmön hinta on kaikissa skenaarioissa sama.



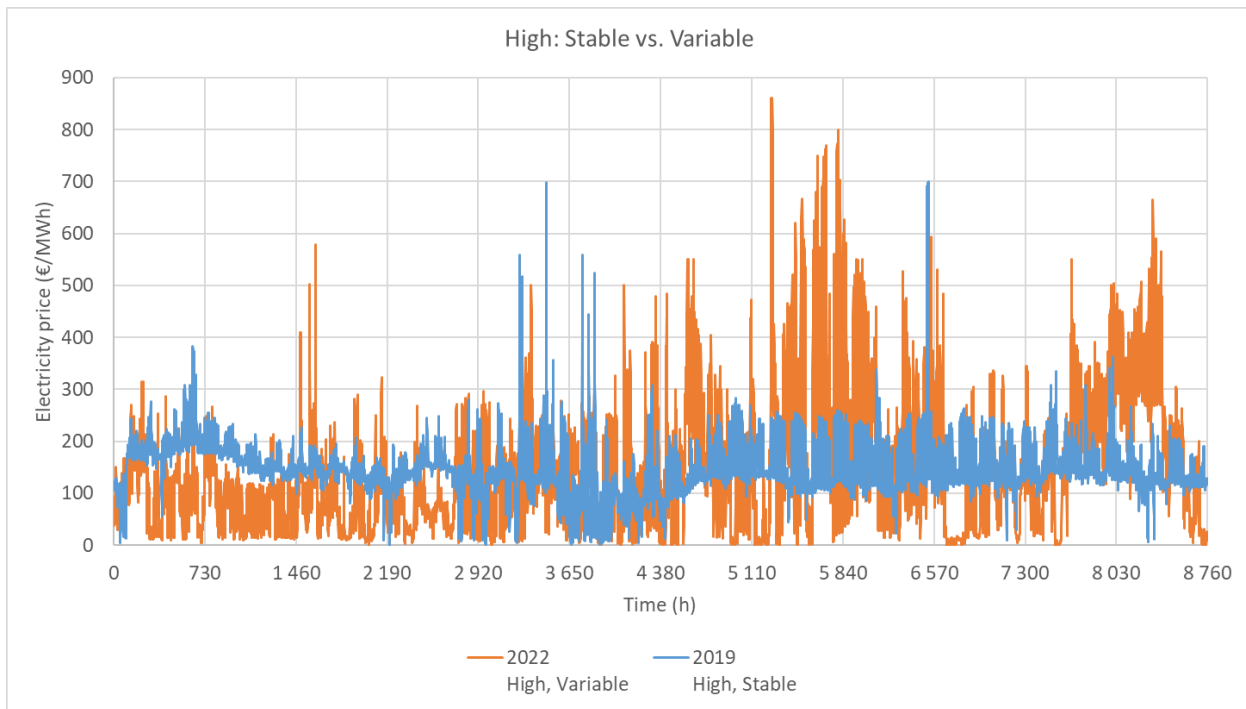
Kuva 16. Sähkön pörssihintojen vuotuinen keskihajonta.

Vuoden 2019 tuntihinnat edustavat matalaa, pienen vaihtelun hintaskenaariota. Vuoden 2022 tuntihinnat edustavat korkeaa, pienen vaihtelun hintaskenaariota. Korkean tason & pienen vaihtelun skenaario luotiin skaalaamalla vuoden 2019 hinnat vastaamaan keskiarvoltaan vuoden 2022 hintatasoa. Vastaavasti matalan tason ja suuren vaihtelun hintaskenaario luotiin skaalaamalla vuoden 2022 hinnat vastaamaan keskiarvoltaan vuoden 2019 hintoja. Valittujen skenaarioiden keskihinnat ja vaihtelut esitetään

Taulukko 3. Vaihtelevan ja vakaan hintaskenaarion tuntitason profiilit näkyvät Kuva 17. Sähköenergian kulutus pohjaisen hinnan (€/MWh) lisäksi huomioitiin kuukausittaisesta huipputehonkulutuksesta määräytyvä tehomaksu (€/kW).

Taulukko 3. Sähköenergian hinnan keskiarvo ja keskihajonta eri hintaskenaarioissa. Tämä ei sisällä siirtomaksua, sähköveroa eikä arvonlisäveroa.

Skenaario	Vuosi-profiili	Hinnan keskiarvo (€/MWh)	Hinnan keskihajonta (€/MWh)
Low, Stable	2019	44	15.3
Low, Variable	2022	44	37.9
High, Stable	2019	154	53.4
High, Variable	2022	154	132.4



Kuva 17. Kahden sähkön hintaskenaarion tuntikohtainen profiili.

3.4. Kaukolämmön hinta

Kaukolämmön hintana käytettiin Helenin kausihintojen keskiarvoja vuosilta 2018-2022 (Taulukko 4). Kesäajan hinta on selvästi matalampi kuin muiden kausien hinta. Kaukolämmön hintataso oli siis hieman korkeampi kuin sähkön hinta matalan hintatason skenaarioissa, mutta selvästi matalampi kuin korkean sähkön hintatason skenaarioissa. Lisäksi huomioitiin kaukolämmön tehomaksu, joka määräytyy vuoden korkeimman tuntitehon mukaan.

Taulukko 4. Kaukolämmön kausihinnat.

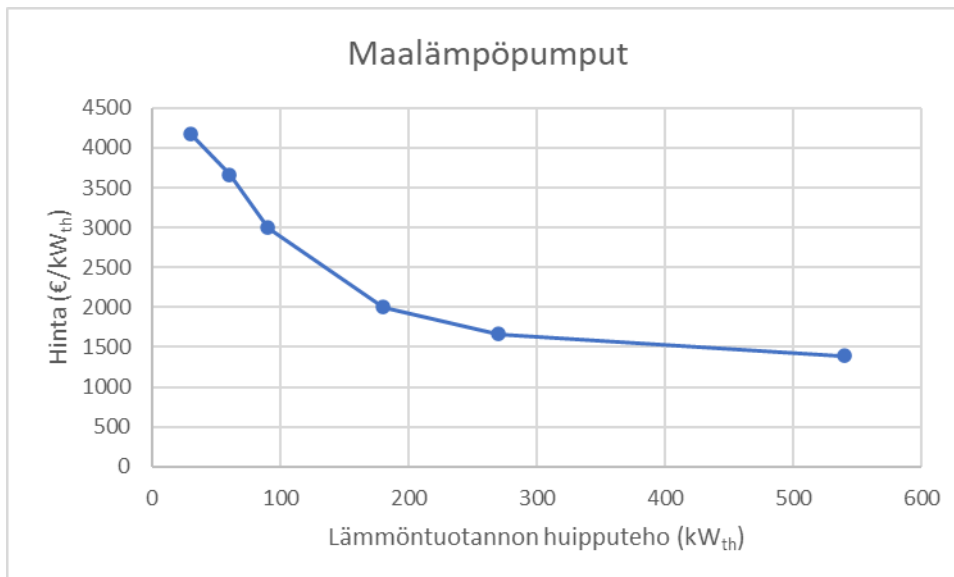
Kausi	Veroton (€/MWh)	Sis. ALV (€/MWh)
Talvi (1.1.-28.2.)	57.78	71.65
Kevät (1.3.-30.4.)	59.79	74.14
Kesä (1.5.-30.9.)	32.06	39.75
Syky (1.10.-31.12.)	62.31	77.26
Keskiarvo	52.98	65.70

3.5. Energiajärjestelmien hintatiedot

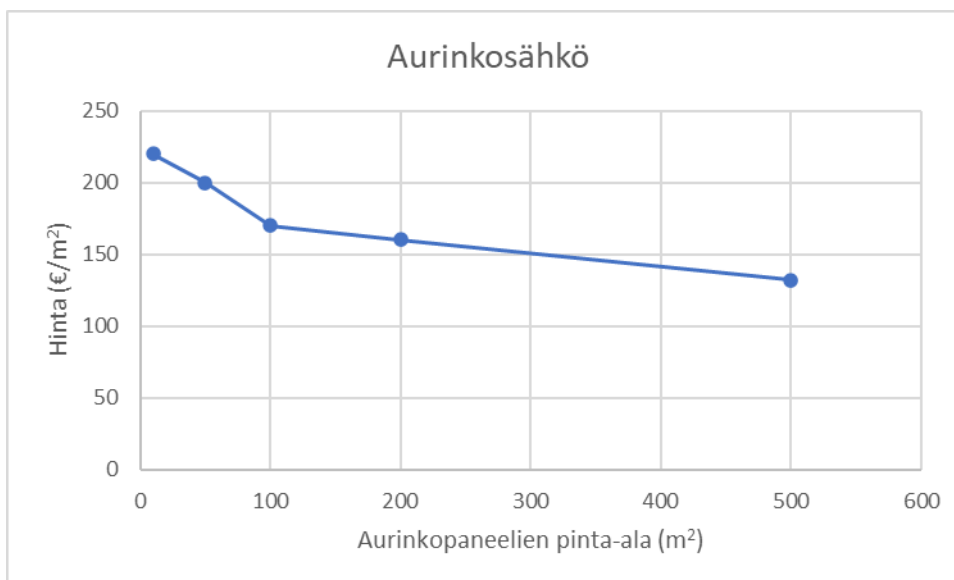
Energiajärjestelmien hintatasot on saatu konsulttiyhtiöiden arvioista. Käytännössä hinnat ovat kuitenkin aina hankekohtaisia eikä niille voida määrittää yleisesti pätevää hintatasoa.

Maalämpö- ja aurinkosähköjärjestelmien tapauksissa yksikköhinta arvioitiin sitä pienemmäksi, mitä suurempi järjestelmä oli kyseessä. Hinnat esitetään kuvissa Kuva 18 ja Kuva 19. Aurinkolämpö- ja

sähköakkujärjestelmien tapauksissa hintatietoja ei ollut tarpeeksi muuttuvan hinnan määrittämiseksi. Sähköakuille käytettiin lähtötietojen keskiarvohintaa 665 €/kWh (veroton). Aurinkolämpökeräimien hintana käytettiin 243 €/m² (veroton).



Kuva 18. Maalämpöjärjestelmien hinnat lämpötehon suhteen.



Kuva 19. Aurinkosähköjärjestelmien hinnat asennetun paneelialan suhteen.

3.6. Parametriajo

Laskentamallissa voidaan suorittaa parametriaajoja, joissa lasketaan yhdellä kertaa suuri määrä erilaisia hybridijärjestelmäkoonpanoja valitulla hintaskenaariolla. Näin voidaan nähdä miten eri ratkaisut vaikuttavat päästöihin ja kustannustehokkuuteen yhdessä ja erikseen.

Tutkittavat parametrit syötetään suhteellisina tehoina (%), jolloin eri rakennuksia voi tarkastella muuttamatta merkittävästi syötettäviä lukuarvoja. Lämpöpumpun kapasiteetti ilmoitetaan prosenttiosuutena vuoden suurimmasta tuntikohtaisesta kaukolämpötehosta ts. suhteessa huippulämmönkulutukseen. Aurinkojärjestelmän kapasiteetti esitetään vastaavasti kesäkauden suurimman kaukolämpötehon mukaan. Aurinkosähköjärjestelmän kapasiteetti taas on prosenttiosuus kesäkauden suurimmasta sähkötehosta. Akkuvarastojärjestelmän kapasiteetti on prosenttiosuus vuoden suurimmasta tuntikohtaisesta sähkötehosta. Lisäksi voidaan säätää aurinkoenergiajärjestelmien asennuskulmia asteina suhteessa vaakatasoon ja etelän suuntaan.

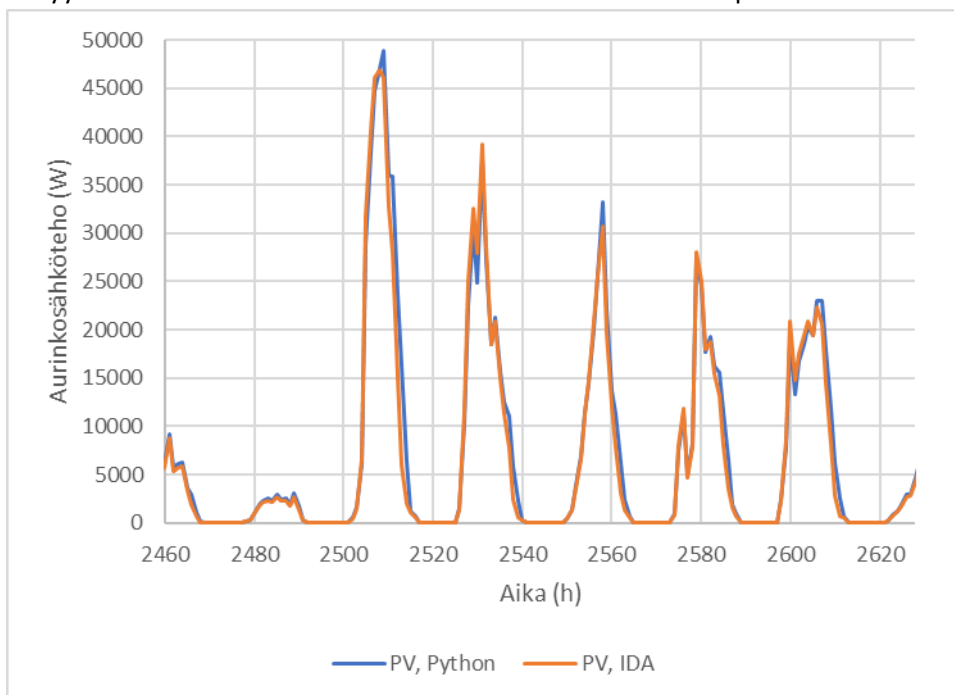
Energiaratkaisupaketteja etsittäessä hybridijärjestelmien tarkastelu toteutettiin parametrijona, jossa jokaiselle rakennukselle ja hintaskenaariolle laskettiin kaikki erilaiset järjestelmäkombinaatiot. Referenssiskenaariossa kaikkien lisäjärjestelmien kapasiteetti oli 0 ja päälämmitysjärjestelmäksi oletettiin kaukolämpö. Kapasiteetit esitettiin suhteessa alkuperäisiin (referenssitapauksen) kulutustietoihin.

4. LASKENTAMALLIN VERTAILU IDA-ICE-LASKENTAAN

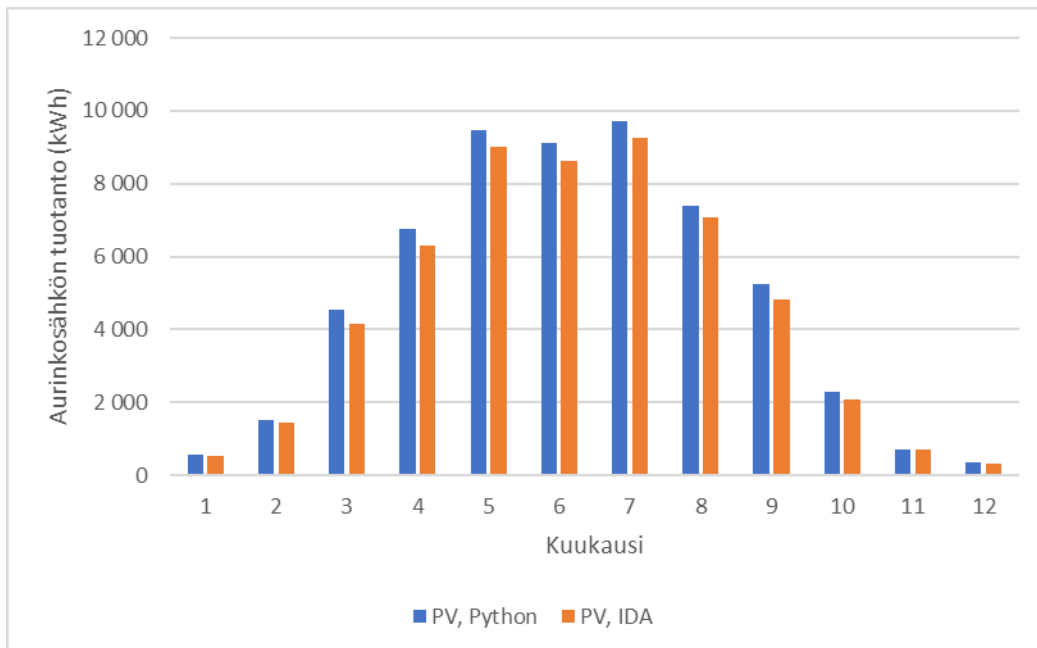
Koska käytössä ei ollut mittausdataa todellisista järjestelmistä, laskentamallin toimintaa verrattiin IDA-ICE-simulointiohjelmaan. IDA-ICE on yksityiskohtaisempi, mutta raskaampi kaupallinen ohjelma rakennusten energijärjestelmien ja sisäilmaston simulointiin. IDA-ICE:ssä simuloitiin rakennusmalli, jonka energiankulutusprofiili ja säätiedosto syötettiin tässä raportissa esitettyyn Python-laskentamalliin. Sen jälkeen molemmilla laskentamenetelmillä mallinnettiin samanlaiset energijärjestelmät. Akkujärjestelmälle ei suoritettu vertailua, koska se ei kuulu IDA-ICE-peruskomponentteihin.

4.1. Aurinkosähkö

Aurinkosähkömallinnus tuotti molemmilla laskentatavoilla tuntitasolla pääosin vastaavan tuloksen, kuten näkyy Kuva 20. Kuukausitasolla mallien tulokset olivat 3-10% päässä toisistaan.



Kuva 20. Aurinkosähkötuotannon vertailu esimerkkiviikolta Python- ja IDA-ICE-malleilla.



Kuva 21. Aurinkosähkön kuukausituotanto eri malleilla.

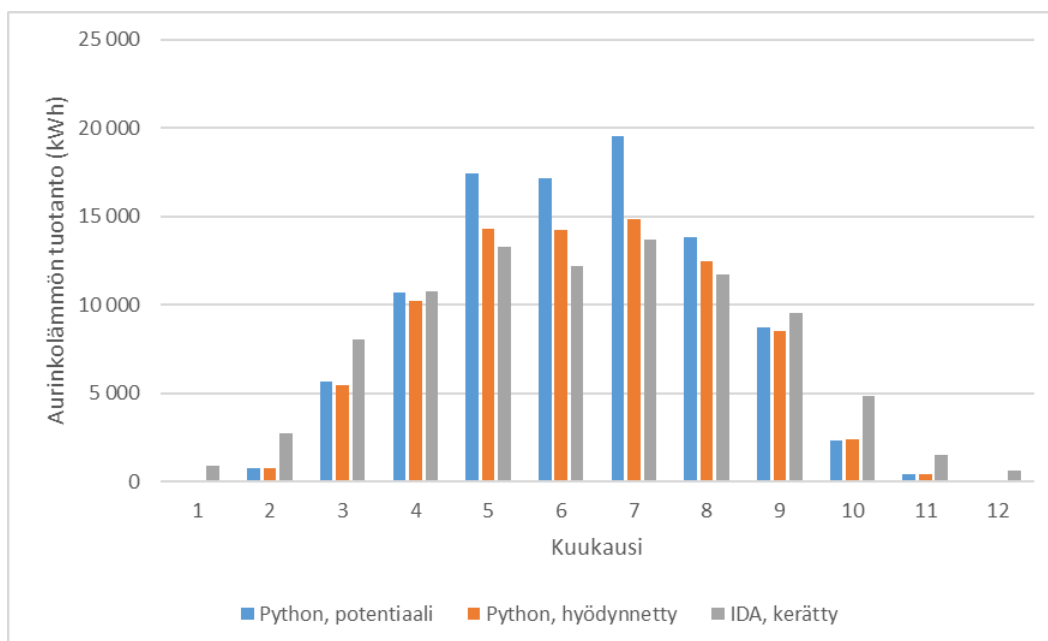
4.2. Aurinkolämpö

Aurinkolämmön tapauksessa energiantuotantoon vaikuttaa merkittävästi tuotettu lämpötilataso ja keräimeen menevän nesteen lämpötila. Lämpövaraston mallinnuksella on siis oma vaikutuksensa lopputulokseen. Python-mallissa lämpövaraston lämpötilaa ei huomioitu ja menolämpötila keräimeen pidettiin vakiona. Esimerkkiviikolla tuntitasoinen simulointi tuottivat ajoituksellisesti samanlaisia tuloksia, mutta huipputuotanto vaihteli (Kuva 22).



Kuva 22. Aurinkolämmön tuotanto eri laskentamalleilla.

Kuukausitasolla Python-mallin tuotantopotentiaali ylittää selvästi IDA-mallissa kerätyn energian (Kuva 23). Tämä johtuu siitä, että IDA-ICE:n lämpötilaperusteisessa varastomallissa aurinkolämmön hyötysuhde heikkenee varaston täytyessä. Python-mallissa taas hyötysuhde riippuu vain ulkolämpötilasta ja tuotantolämpötilasta ja jos tuotanto ylittää kulutuksen, ylijäämä varastoituu tiettyyn energiaylärajaan asti, jonka jälkeen loppu lämmöstä menee hukkaan. Hyödynnetyn aurinkolämmön määrä on selvästi alempana kuin tuotantopotentiaali, jolloin erot IDA-malliin laskevat. Python-malli laskee suurempaa tuotantoa kesäkuukausina, jolloin keräimeen menevä neste on keskimäärin kuumempaa ja pienempää tuotantoa talvikuukausina, kun keräimeen menee keskimäärin kylmempää nestettä. Huhti-syyskuun aikana hyödynnetyn tuotannon erot ovat 5-17%.

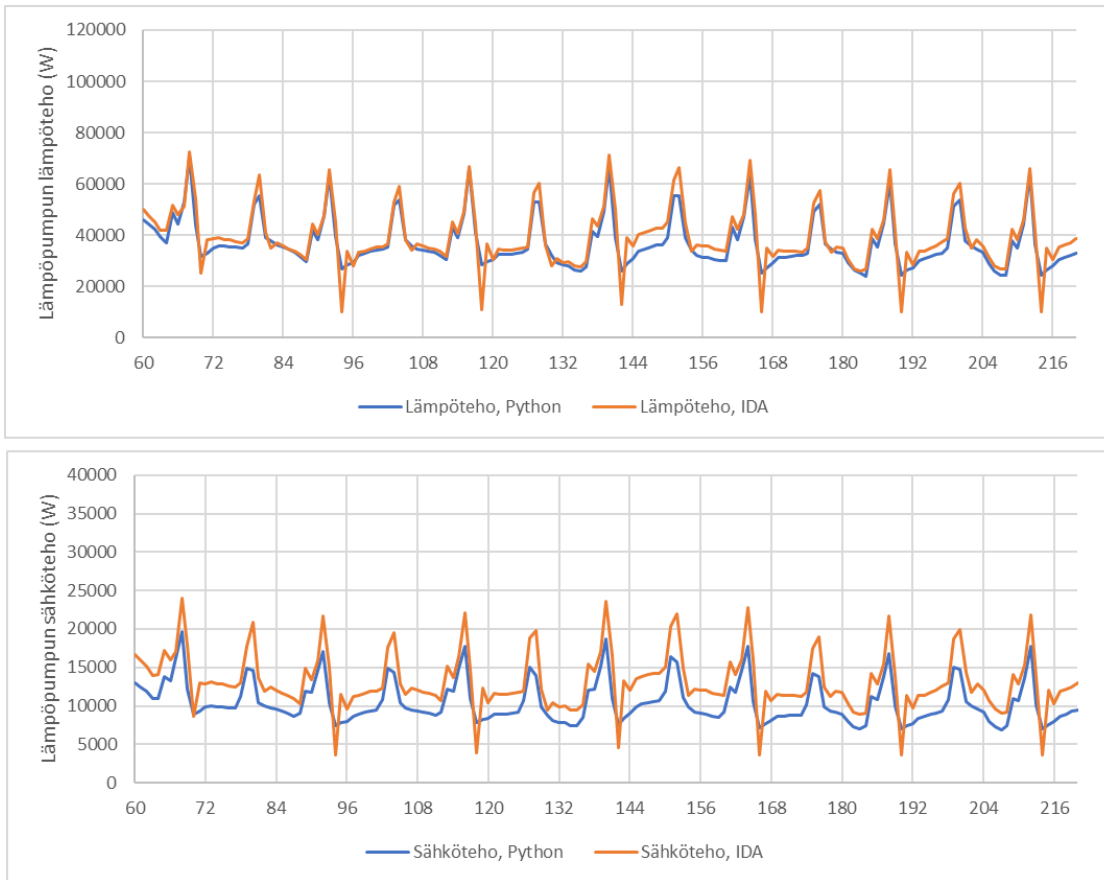


Kuva 23. Aurinkolämpötuotannon vertailu.

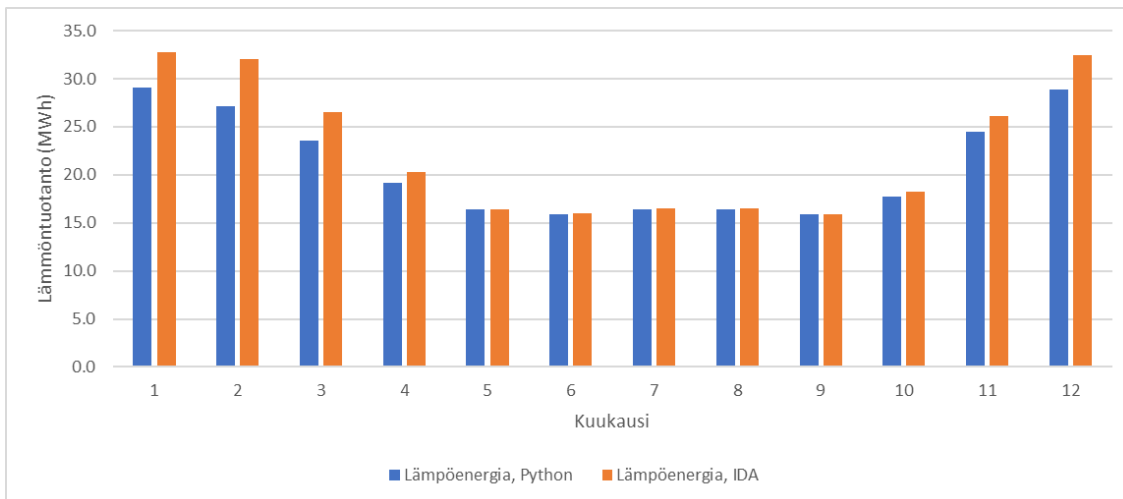
4.3. Lämpöpumppu

Lämpöpumpun kohdalla vertailu oli vaikeampaa, koska IDA-ICE-ohjelmistoon ei voi syöttää vastaavia tehokäyriä kuin Python-mallissa on käytetty, vaan COP-arvo määritetään vain yhdessä 35 °C mitoituspisteessä. IDA-mallissa käytettiin lämpöpumpun oletusarvoja siten, että lämpöpumpun lämpöteho oli sama kuin Python-mallissa ja mitoituspisteen COP-arvo oli molemmissa malleissa 4.

Tuntitason tarkastelussa molemmat mallit tuottivat lämpöä samalla ajoituksella, mutta IDA-mallissa sähkönkulutus oli suurempaa ja COP-arvo siten järjestelmällisesti pienempi (Kuva 24). Tämä selittyy IDA-mallin jatkuvasti korkeammalla lämpötilalla. IDA:n lämpöpumppu tuotti aina noin 65 °C lämpötilaa, kun taas Python-mallissa lämpötila muuttui ulkolämpötilan mukaan ja lämmityskäyrän mukaan. Python-malli siis tuottaa lämpöpumpulle pienemmän sähkönkulutuksen. IDA-mallissa lämpöpumpun lämmöntuotanto seurasi pääosin alkuperäistä lämmönkulutusprofiilia, mutta siinä oli myös jaksoja jolloin lämmöntuotanto nousi selvästi vertailutapauksen kulutuksen yli. Tämä nosti IDA-mallin kulutusta verrattuna Python-laskentaan (Kuva 25).



Kuva 24. Lämpöpumpumallien tuntikohtaisen energiantuotannon vertailu.



Kuva 25. Lämpöpumpumallien kuukausitason lämmöntuotanto.

5. TULOKSET

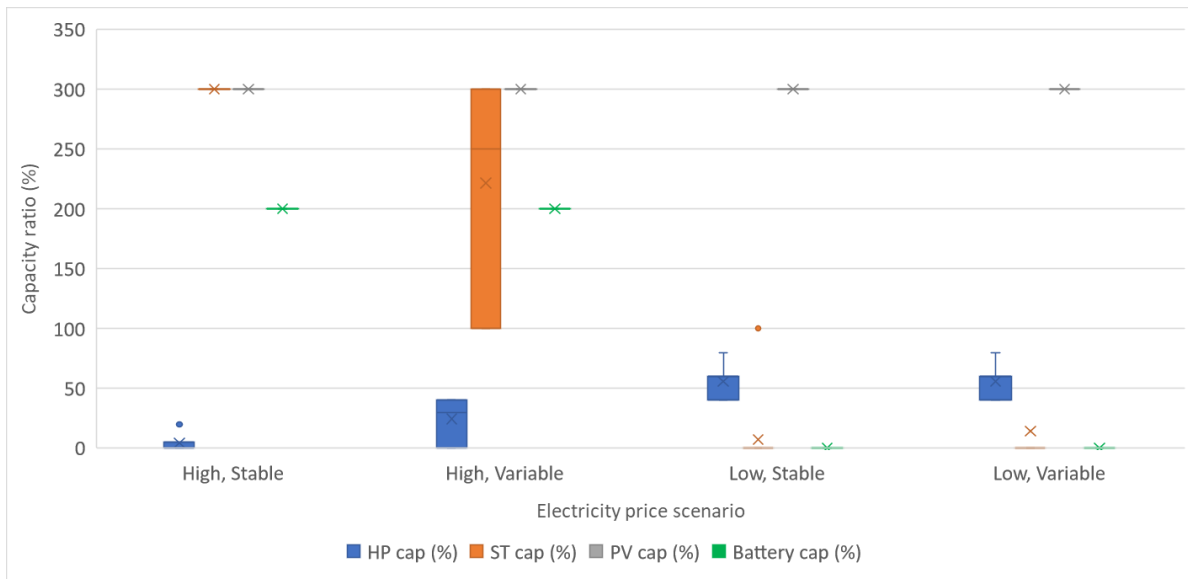
Laskentamallia sovellettiin tarkasteltavana olleisiin rakennuksiin. Esimerkkilaskennan tapaukset muodostuivat Taulukko 5:n parametrien eri yhdistelmistä, jolloin jokaiselle rakennukselle (14 kpl) ja hintaskenaariolle (4 kpl) laskettiin 500 eri järjestelmäkoonpanoa. Aurinkoenergiajärjestelmien asennuskulmien tarkastelu jätettiin pois laskentatapausten vähentämiseksi. Elinkaarikustannusten laskenta-aika oli 25 vuotta ja reaalkorkona käytettiin 3% ja energian eskalaatiokertoimenä 2%.

Taulukko 5. Parametriajon järjestelmävaihtoehdot.

HP capacity (%)	ST capacity (%)	PV capacity (%)	Battery capacity (%)
0	0	0	0
20	100	50	50
40	200	100	100
60	300	200	150
80		300	200

5.1. Yleiskatsaus

Kun kaikki järjestelmäsimulaatiot oli tehty, jokaisen rakennuksen kohdalla etsittiin hintaskenaariokohtaisesti elinkaarikustannuksiltaan halvin ratkaisu. Kuva 26 näyttää valittujen järjestelmien (maalämpö, aurinkolämpö, aurinkosähkö, akkuvarasto) kustannusoptimaalisten kapasiteettien vaihteluvälit kaikissa hintaskenaarioissa, yhdessä kaikille rakennuksille. Kuvasta näkee miten merkittävä vaikutus hintaetuksilla on järjestelmien kannattavuuteen.



Kuva 26. Kaikkien rakennusten elinkaarikustannuksiltaan halvimpien ratkaisujen järjestelmävalinnat eri sähkön hintaskenaarioissa. Laatikko näyttää alueen missä oli vähintään 50% ratkaisuista, viiva mediaanin, rasti keskiarvon ja pisteet ovat poikkeavia ratkaisuja.

Aurinkosähköjärjestelmät olivat mukana kaikkien rakennusten kokonaisratkaisuissa, riippumatta hintaskenaariosta. Akkujärjestelmät olivat kannattavia ainoastaan kalliin sähkön skenaarioissa eikä hinnan vaihtelulla ollut juurikaan merkitystä. Aurinkolämpöjärjestelmät olivat maksimikapasiteetilla kalliin ja vakaan sähkön hintaskenaariossa ja merkittäville kapasiteeteilla myös kalliin ja vaihtelevan sähkön skenaarioissa. Halvalla sähköllä vain muutamassa tapauksessa oli mukana aurinkolämpöä. Maalämmön kannattavuus seurasi selkeästi sähkön hintaa. Korkealla ja vakaalla hinnalla maalämpöä ei yleensä kannattanut asentaa tai kannatti asentaa korkeintaan 20% huippukulutuksesta. Edelleen kallis, mutta vaihteleva hinta nosti selvästi maalämmön kannattavuutta ja järkevä kapasiteetti olikin usein 20-40%. Molemmissa halvan hinnan skenaarioissa tyypillinen lämpöpumppu-kaukolämpö-hybridi sisälsi maalämpöä 40-60% huipputehokkuuden. Kahden hintaskenaarion rakennuskohtaiset kustannustehokkaimmat ratkaisut esimerkkilaskelmasta esitetään Taulukoissa Taulukko 6 ja Taulukko 7.

Taulukko 6. Kustannustehokkaimmat ratkaisut esimerkkilaskelmassa korkean ja vaihtelevan sähkön hinnan skenaariossa.

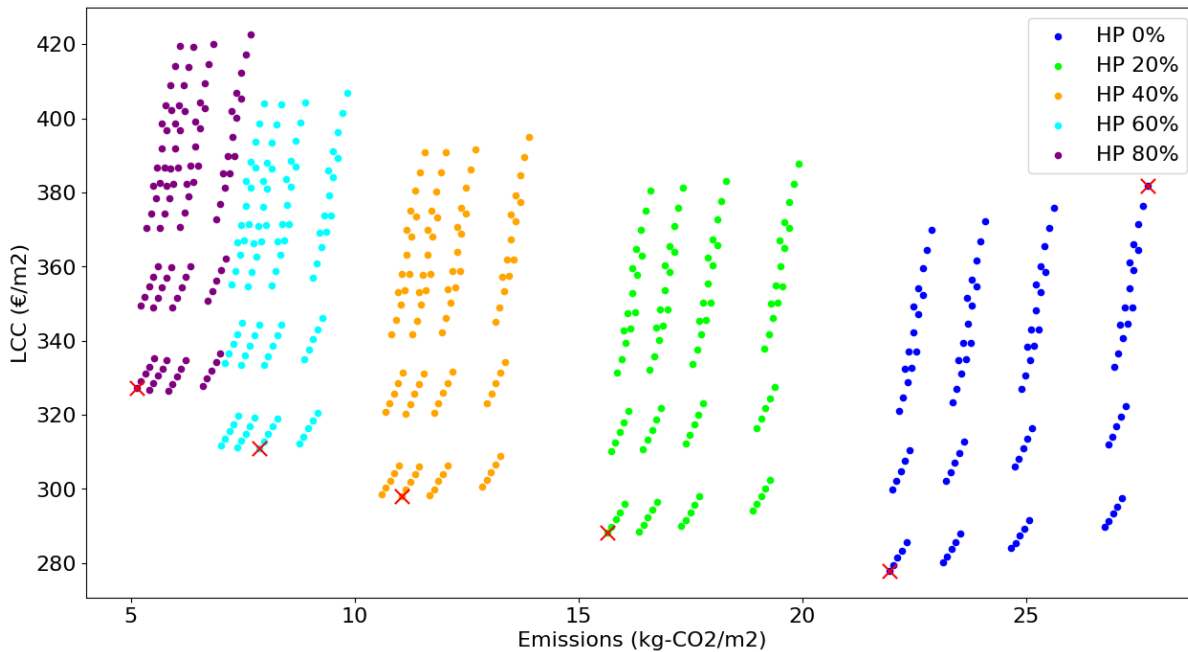
Building	Reference heating demand (kWh/m ²)	Reference electricity demand (kWh/m ²)	HP cap (%)	ST cap (%)	PV cap (%)	Battery cap (%)	DH use (MWh)	Elec use (MWh)	E-value (kWh/m ²)	Emissions (kg-CO ₂ /m ²)	LCC (€/m ²)	DH peak (kW)	Elec peak (kW)
Toimisto 1	105	53.3	40	100	300	200	359	886	100	11.6	419	300	376
Toimisto 2	68	52.0	20	100	300	200	656	692	51	8.6	202	677	344
Toimisto 3	52	38.3	0	300	300	200	650	287	40	9.9	154	402	181
Toimisto 4	121	38.8	0	300	300	200	247	57	71	21.9	278	97	27
Toimisto 5	114	60.6	40	100	300	200	472	662	76	11.1	300	323	204
Toimisto 6	97	69.2	20	300	300	200	4 783	5 238	75	12.3	285	3805	1 585
Toimisto 7	137	46.6	40	300	300	200	403	426	66	11.1	289	267	143
Toimisto 8	136	64.5	0	300	300	200	838	268	89	24.6	317	411	118
Toimisto 9	100	38.4	0	300	300	200	457	126	63	18.5	255	240	58
Toimisto 10	114	60.6	40	100	300	200	472	662	76	11.1	300	323	204
Iho- ja allergiasairaala	198	132.2	40	200	300	200	943	1 475	143	19.9	522	625	432
Kolmiosairaala	230	205.0	40	200	300	200	1 978	3 596	215	27.9	789	1308	996
Peijaksen sairaala	161	172.3	20	300	300	200	4 283	5 452	346	53.1	1 258	2740	1 807
Silmä- ja korvasairaala	189	128.4	40	200	300	200	1 324	2 262	62	8.3	230	968	714

Luokittelemalla rakennuksia niiden energiankulutustunnuslukujen perusteella pyrittiin löytämään sääntöjä, joiden avulla järjestelmäkoonpanoja voitaisiin valita. Yleispäteviä sääntöjä ei kuitenkaan löytynyt, vaan esim. samanlaisia lämpöpumppu/aurinkolämpöjärjestelmiä oli kustannustehokkaimmissa ratkaisuissa sekä suurten että pienten ominaiskulutusten rakennuksissa, riippumatta sähkön ja lämmön huippukulutuksista ja suhteista. Korrelaatio suuren lämmöntarpeen ja suuremman lämpöpumpun suhteen kuitenkin havaittiin esim. kalliin ja vaihtelevan sähkön skenaariossa. Erilaisia sääntöjä voisi löytyä hintaskenaariokohtaisesti erityisesti diskonttaustermejä muuttamalla ja huomioimalla todellisuudessa aurinkoenergialle hyödynnettävissä olevan kattopinta-alan.

Taulukko 7. Kustannustehokkaimmat ratkaisut esimerkkilaskelmassa matalan ja vaihtelevan sähkön hinnan skenaariossa.

Building	Reference heating demand (kWh/m ²)	Reference electricity demand (kWh/m ²)	HP cap (%)	ST cap (%)	PV cap (%)	Battery cap (%)	DH use (MWh)	Elec use (MWh)	E-value (kWh/m ²)	Emissions (kg-CO ₂ /m ²)	LCC (€/m ²)	DH peak (kW)	Elec peak (kW)
Toimisto 1	105	53.3	60	0	300	0	26	1 215	119	7.4	294	200	436
Toimisto 2	68	52.0	40	0	300	0	152	1 020	57	4.7	159	518	406
Toimisto 3	52	38.3	60	0	300	0	24	566	41	2.7	124	162	234
Toimisto 4	121	38.8	40	100	300	0	62	123	66	8.3	235	59	36
Toimisto 5	114	60.6	60	0	300	0	54	870	79	5.3	205	215	234
Toimisto 6	97	69.2	40	0	300	0	1 237	7 365	82	6.7	191	2911	1 905
Toimisto 7	137	46.6	60	0	300	0	56	629	72	5.2	201	179	180
Toimisto 8	136	64.5	60	0	300	0	34	565	83	5.6	239	171	183
Toimisto 9	100	38.4	80	0	300	0	5	283	57	3.6	201	48	122
Toimisto 10	114	60.6	60	0	300	0	54	870	79	5.3	205	215	234
Iho- ja allergiasairaala	198	132.2	60	0	300	0	104	1 999	156	10.2	365	427	515
Kolmiosairaala	230	205.0	60	0	300	0	238	4 679	232	15.3	520	898	1 107
Peijaksen sairaala	161	172.3	40	100	300	0	1 197	7 582	386	31.5	874	2040	1 983
Silmä- ja korvasairaala	189	128.4	60	0	300	0	130	3 050	69	4.4	160	716	780

5.2. Hybridiratkaisut eri päästötasoille



Kuva 27. Yhden rakennuksen (Toimisto 4) kaikkien energiaratkaisujen päästö- ja hintavaikutukset. Rasteilla on merkitty eri päästoluokkien halvimmat ratkaisut sekä referenssiratkaisu. Hintaskenaario: korkea & vaihteleva.

Laskentamallin tärkeä ominaisuus on mahdollisuus vertailla erilaisia energiaratkaisuvaihtoehtoja. Kuva 27 näyttää esimerkkinä rakennuksen Toimisto 4 kaikki ratkaisut päästö-elinkaarikustannus-akseleilla, kun sähkön hinta on kallis ja vaihteleva. Kuvassa on korostettu punaisilla rasteilla viisi ratkaisua: elinkaarikustannuksiltaan halvin ratkaisu, vähäpäästöisin ratkaisu sekä kolme kustannustehokasta ratkaisua näiden väliltä. Samat ratkaisut on esitetty Taulukko 8.

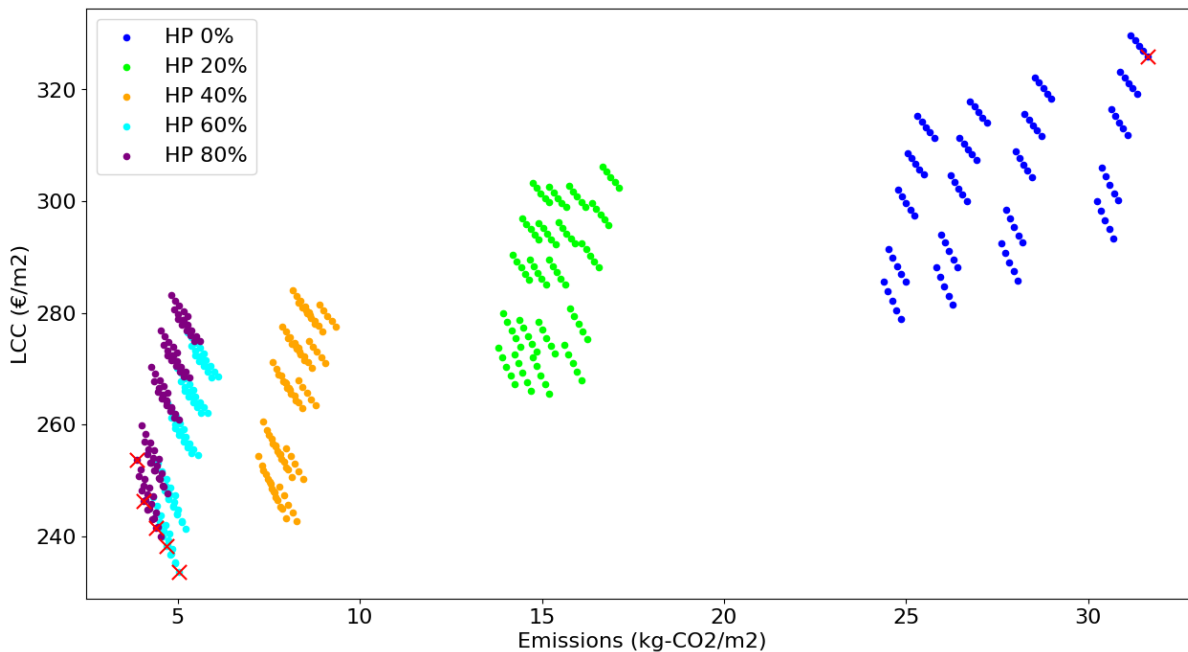
Taulukko 8. Optimaaliset ratkaisut Toimisto 4:lle eri päästötasoilla, kun sähkön hinta on korkea ja vaihteleva.

Case	Emissions (kg-CO ₂ /m ²)	LCC (€/m ²)	Investment cost (€)	Energy cost (€/year)	E-value (kWh/m ²)	HP cap (%)	ST cap (%)	PV cap (%)	Battery cap (%)
0	27.7	381.8	0	52 844	103	0	0	0	0
99	21.9	278.0	133 450	31 634	71	0	300	300	200
199	15.6	288.1	237 311	27 719	64	20	300	300	200
274	11.1	298.1	312 204	25 264	61	40	200	300	200
349	7.9	310.9	369 261	24 114	59	60	100	300	200
499	5.1	327.2	444 448	22 521	54	80	300	300	200

Eri kustannustason ratkaisuissa on suuret vaihtelut vuotuisten päästöjen suhteen. Ratkaisujen värikoodauksesta nähdään myös lämpöpumppukapasiteetin määräävä rooli päästötason määrittämisessä. Sähkön matalat päästökertoimet johtavat siihen, että suurempi lämpöpumppukapasiteetti vähentää selvästi

hiilidioksidipäästöjä verrattuna kaukolämpöratkaisuun. Muut energiateknologiat muuttavat päästöjä ja elinkaarikustannuksia ratkaisuryhmän sisällä, mutta eri lämpöpumppukapasiteetin ratkaisuissa ei ole minkäänlaista päällekkäisyyttä.

Kuva 28 näyttää vastaavasti rakennuksen Toimisto 8 kaikki ratkaisut päästö-elinkaarikustannus-akseleilla halvan ja vakaan sähkön hinnan skenaariossa. Eri lämpöpumppukapasiteetin sisältävät ratkaisut erottuvat jälleen selkeästi omiksi ryhmikseen, mutta halvan sähkön olosuhteissa kaikki taloudellisesti järkevät ratkaisut asettuvat saman pienen alueen sisään. Kaikki ratkaisut sisälsivät 60-80% lämpöpumppukapasiteetin suhteessa huippukulutukseen. Tämän takia näiden ratkaisujen erot hiilidioksidipäästöissä ovat hyvin pieniä eikä lisäinvestoinneilla halvimpaan ratkaisuun verrattuna saada merkittäviä lisäleikkauksia päästöihin. Korostetut ratkaisut esitetään myös Taulukko 9.



Kuva 28. Yhden rakennuksen (Toimisto 8) kaikkien energiaratkaisujen päästö- ja hintavaikutukset. Rasteilla on merkitty eri päästöluokkien halvimmat ratkaisut sekä referenssiratkaisu. Hintaskenaario: matala & vakaa

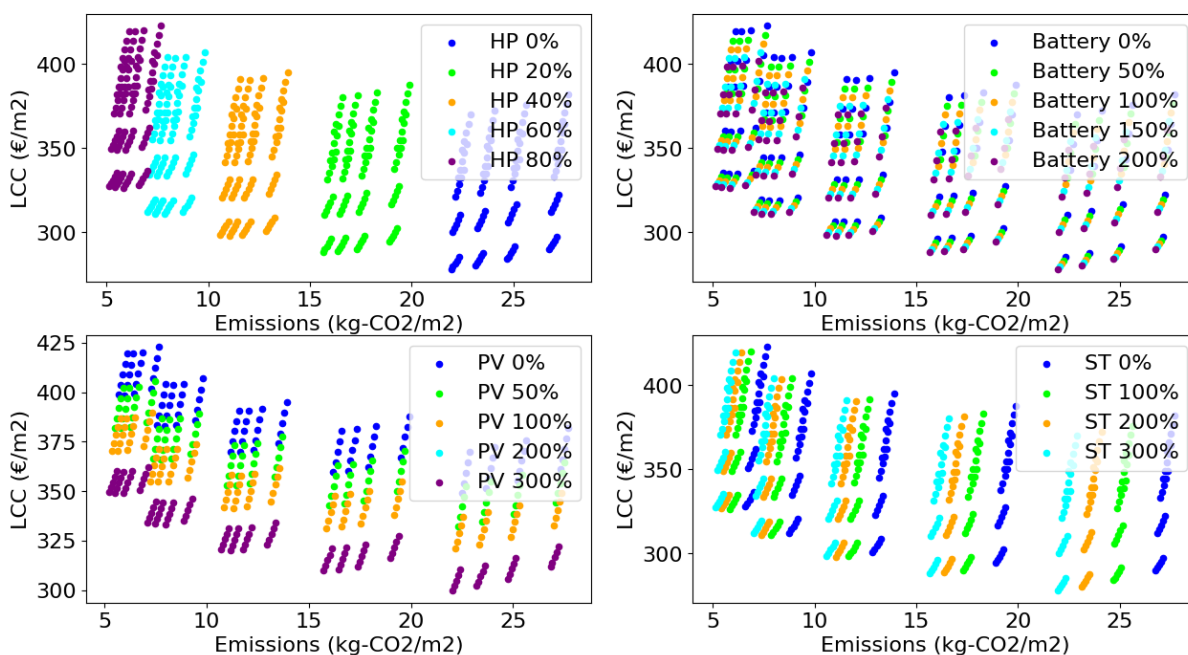
Taulukko 9. Optimaaliset ratkaisut Toimisto 8:lle eri päästötasoilla, kun sähkön hinta on matala ja vakaa.

Case	Emissions (kg-CO2/m2)	LCC (€/m2)	Investment cost (€)	Energy cost (€/year)	E-value (kWh/m2)	HP cap (%)	ST cap (%)	PV cap (%)	Battery cap (%)
0	32.1	346.3	0	147 948	141	0	0	0	0
320	5.3	244.1	753 030	65 711	83	60	0	300	0
420	4.8	250.1	862 771	62 646	83	80	0	300	0
421	4.6	252.2	914 721	60 910	79	80	0	300	50
448	4.3	258.6	1 060 613	56 154	72	80	100	300	150
499	4.0	266.7	1 197 768	52 575	67	80	300	300	200

5.3. Teknologioiden vaikutukset

Laskentamallilla voidaan myös tarkastella yksittäisten teknologiaratkaisujen vaikutusta kokonaisuuteen. Näin voidaan tunnistaa miten eri teknologiat vaikuttavat kustannuksiin, päästöihin ja primäärienergiankulutukseen. Tarkastelussa havaitaan myös hybridijärjestelmän eri komponenttien keskinäistä vuorovaikutusta ja mikä on yhden teknologian vaikutus, kun toisen kapasiteettia muutetaan. Eri teknologioiden vaikutuksia yhden toimistorakennuksen päästöihin ja elinkaarikustannuksiin esitellään Kuvissa Kuva 29 ja Kuva 30.

Senaatti4_High_Variable



Kuva 29. Eri teknologioiden vaikutukset yhden rakennuksen (Toimisto 4) päästöihin ja elinkaarikustannuksiin korkean ja vaihtelevan sähkönhinnan skenaariossa.

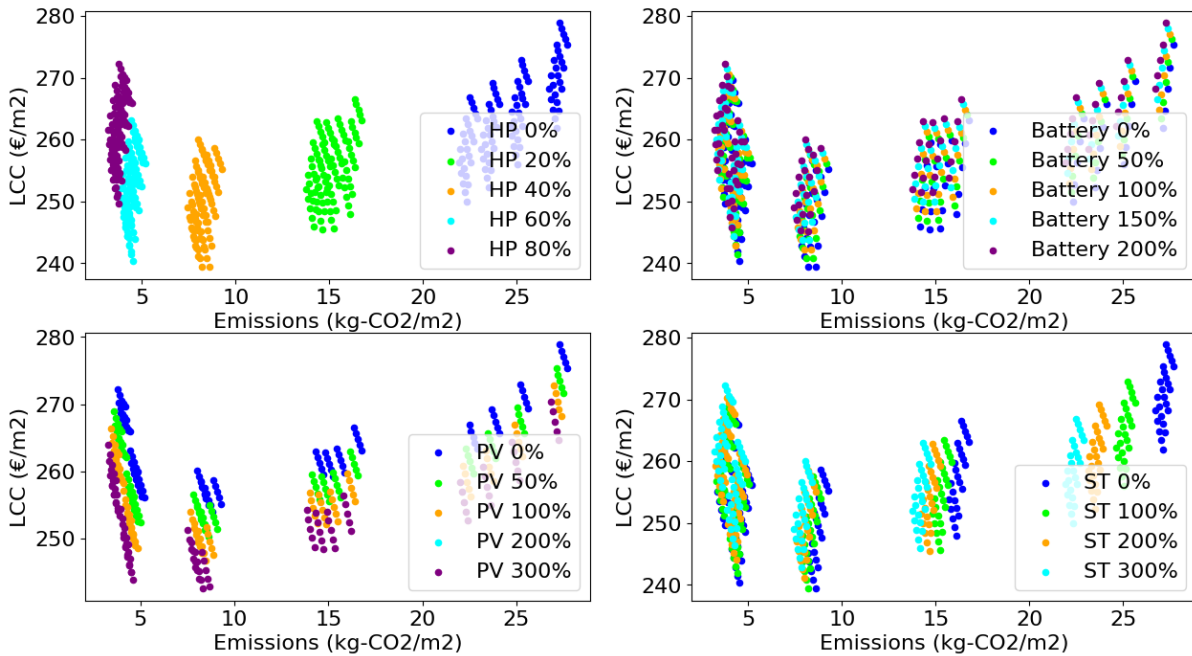
Lämpöpumput (HP) vähensivät päästöjä kaikissa skenaarioissa, mutta kustannusvaikutus oli elinkaarikustannuksia nostava korkean hinnan skenaariossa ja tiettyyn pisteeseen asti laskeva matalan hinnan skenaariossa.

Aurinkosähkö (PV) vähensi elinkaarikustannuksia, mutta päästövaikutus oli hyvin pieni molemmissa hintaskenaarioissa. Tämä selittyy sähkön pienellä päästökertoimella, erityisesti kesäaikaan. Lämpöpumpun päästöhyötyjä korostava ilmiö siis vaikuttaa käänteisesti aurinkosähköön.

Aurinkolämpö (ST) vähensi päästöjä, mutta ei juuri vaikuttanut kustannuksiin. Päästövaikutus oli suurin, kun lämpöpumppukapasiteetti oli pieni, koska tällöin säästö ostoenergiassa kohdistui korkeapäästöiseen kaukolämpöön.

Korkean hinnan skenaariossa akkujärjestelmä vähensi päästöjä ja kustannuksia. Matalan hinnan skenaariossa akkujärjestelmä samoin vähensi päästöjä, mutta nosti kustannuksia.

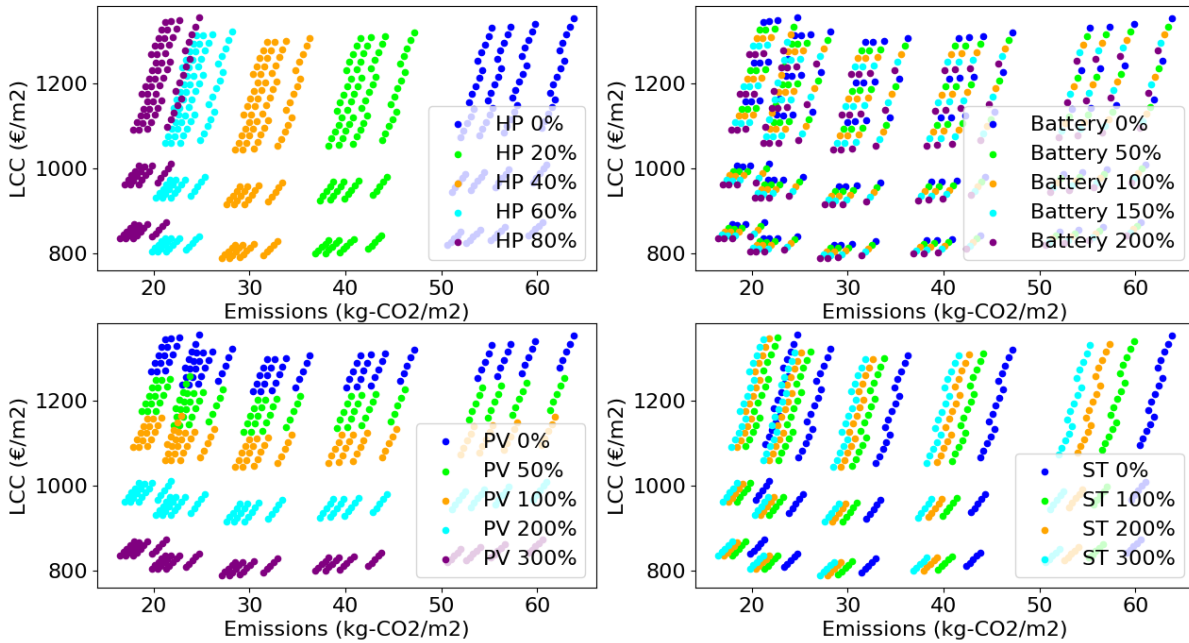
Senaatti4_Low_Stable



Kuva 30. Eri teknologioiden vaikutukset yhden rakennuksen (Toimisto 4) päästöihin ja elinkaarikustannuksiin matalan ja vakaan sähkön hinnan skenaariossa.

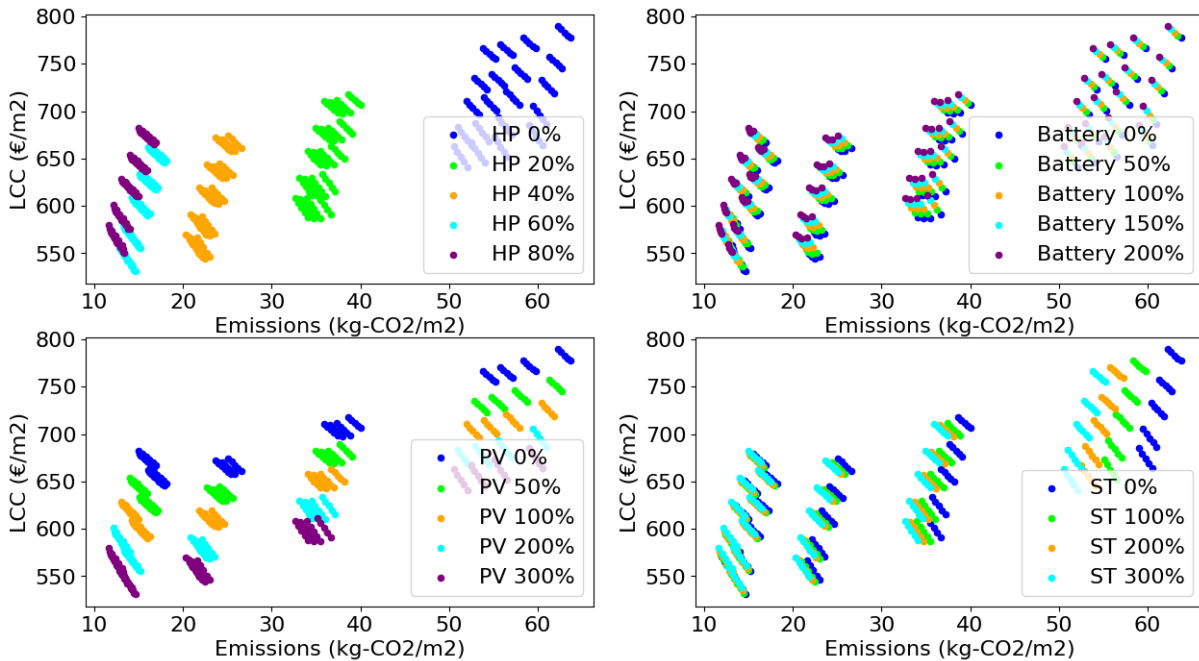
Kolmiosairaalan tapauksessa elinkaarikustannukset ja päästöt olivat suuren pohjakulutuksen johdosta korkeammalla tasolla kuin edellisessä esimerkissä, mutta ratkaisuparvien muoto on hyvin samanlainen. Päästötason määrittää pääasiassa lämpöpumpunkapasiteetti. Toisin kuin toimistorakennuksessa, jopa korkean hinnan skenaariossa 40% lämpöpumpumitoitus näytti kannattavalta Kolmiosairaalan tapauksessa. Aurinkolämpö vähensi päästöjä, mutta vaikutus oli merkittävä lähinnä silloin, kun lämpöpumpua ei ollut asennettu.

Kolmiosairaala_High_Variable



Kuva 31. Eri teknologioiden vaikutukset yhden rakennuksen (Kolmiosairaala) päästöihin ja elinkaarikustannuksiin korkean ja vaihtelevan sähkön hinnan skenaariossa.

Kolmiosairaala_Low_Stable



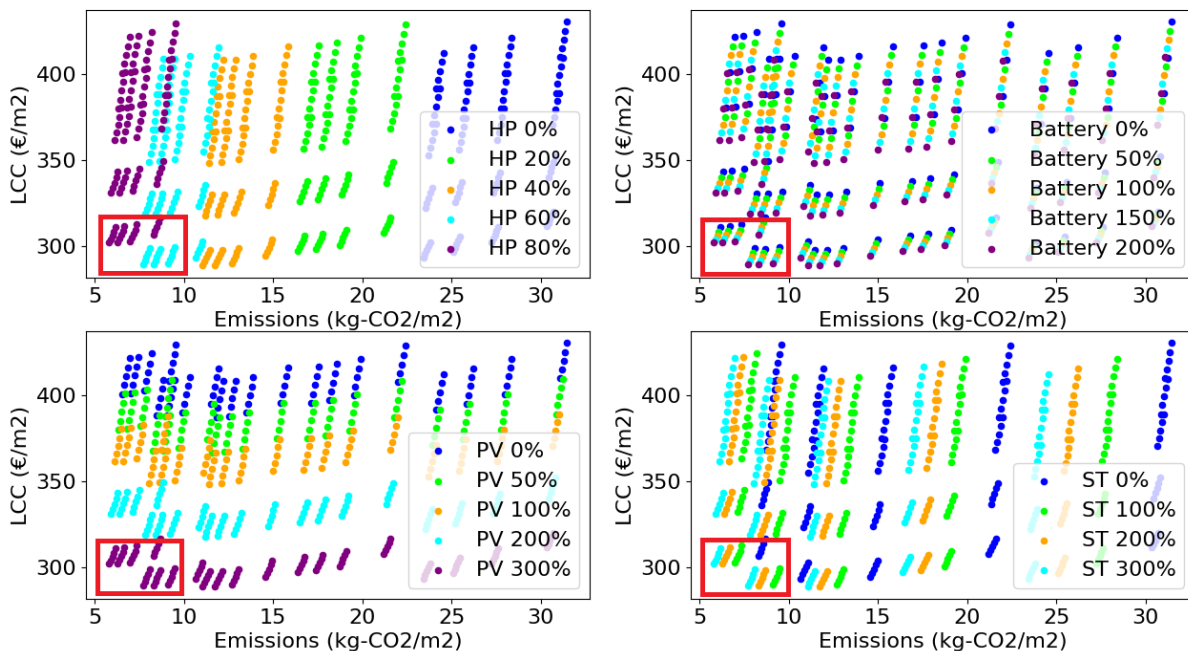
Kuva 32. Eri teknologioiden vaikutukset yhden rakennuksen (Kolmiosairaala) päästöihin ja elinkaarikustannuksiin matalan ja vakaan sähkön hinnan skenaariossa.

5.4. Kaksivaiheinen parametriaajo

Kaikkien mahdollisten järjestelmävaihtoehtojen huomioiminen yhdellä kertaa lisää nopeasti laskentatapausten määrää ja simuloinnin kestoa. Sen sijaan parametriaajo voidaan suorittaa kahdessa vaiheessa. Ensin tutkitaan merkittävimpiä parametreja laajalla skaalalla, jotta nähdään eri ratkaisujen vaikutusten vaihteluväli ja voidaan tunnistaa joitakin kiinnostavia ratkaisuja. Tämän jälkeen voidaan tehdä toinen parametriaajo, jossa muuttujien arvot vaihtelevat esim. ensimmäisen vaiheen kustannustehokkaimman ratkaisun läheisyydessä.

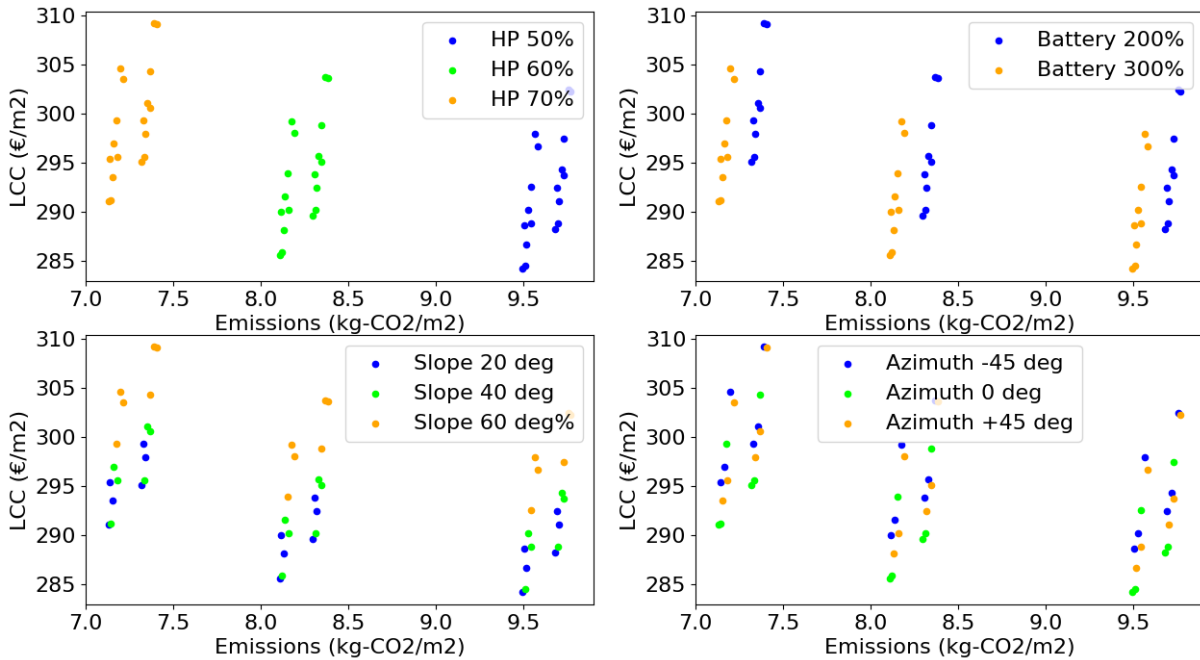
Esimerkki kaksivaiheisesta parametriaajosta nähdään Kuvissa Kuva 33 ja Kuva 34. Ensimmäisessä vaiheessa tutkittiin muuttujia laajalla skaalalla ja tunnistettiin vähäpäästöisten ja kustannustehokkaiden vastausten alue, joka on merkitty punaisella laatikolla Kuvassa Kuva 33. Toisessa vaiheessa aurinkolämpö- ja aurinkosähkökapasiteetit lukittiin erään kustannustehokkaan ja vähäpäästöisen tapauksen arvoihin, lämpöpumpun kapasiteettia muunneltiin pienemmin askelin aiemman ratkaisun ympäristössä ja uusina muuttujina huomioitiin myös aurinkopaneelien ja aurinkolämpökeräimien pysty- ja vaakasuuntaiset asennuskulmat.

Senaatti7_High_Variable



Kuva 33. Parametriaajon ensimmäinen vaihe. Laatikolla on merkitty kustannustehokkaimmat ja vähäpäästöisimmät ratkaisut.

Senaatti7_High_Variable

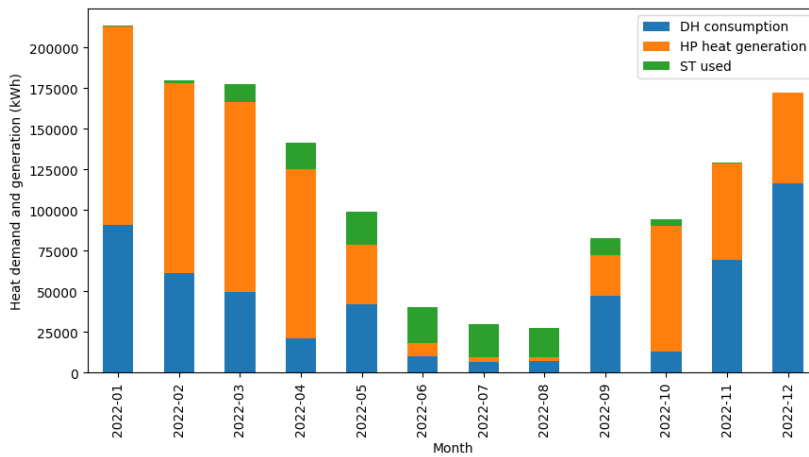


Kuva 34. Parametriajon toinen vaihe. Ratkaisuja on tarkasteltu ensimmäisen vaiheen kustannustehokkaiden ratkaisujen ympäristössä.

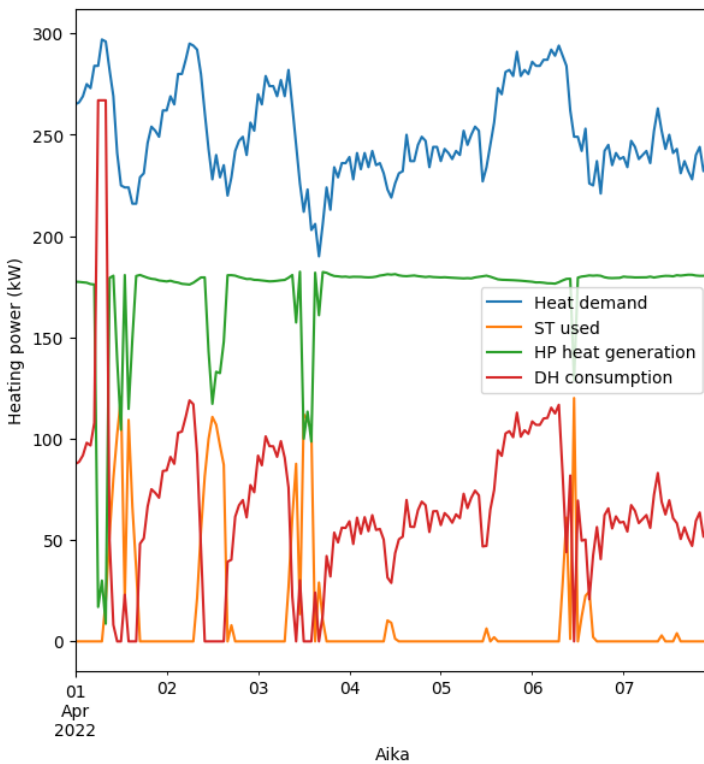
Lämpöpumppukapasiteettia muuttamalla voitiin vähentää joko kustannuksia tai päästöjä, mutta ei molempia yhtä aikaa. Lisää kustannustehokkuutta voitiin saada kasvattamalla akkukapasiteettia edelleen ensimmäisen kierroksen maksimiarvon yli. Aurinkoenergiajärjestelmien asennuskulmia säätämällä ei kuitenkaan voitu vähentää päästöjä tai lisätä kustannustehokkuutta; matala asennuskulma eteläsuuntauksella oli jo valmiiksi hyvä valinta.

5.5. Energiantuotantoprofiili

Parametriaajossa nähdään vuosi/elinkaaritason tuloksia rakennusten energiajärjestelmistä. Laskentaohjelmalla voidaan tarkastella myös lyhyemmän aikavälin energiavirtoja. Kun parametriaajossa on tunnistettu kiinnostava ratkaisu, voidaan kyseisen järjestelmän tiedot syöttää ohjelmalle ja tarkastella kuvista kuukausitason energiankulutusta ja -tuotantoa (Kuva 35). Ohjelma tuottaa myös tuntitason energiaprofiilit, jotka voi ladata taulukkolaskentaohjelmaan. Lisäksi ohjelma näyttää jokaiselta kuukaudelta viikon pituiset esimerkkijaksot valituille tiedoille (Kuva 36).



Kuva 35. Esimerkki kuukausitason lämmitysenergian tuotannosta.



Kuva 36. Esimerkki tuntitason lämmitysenergian tuotannosta.

6. JOHTOPÄÄTÖKSET

Tutkituissa rakennuksissa oli eroja niiden ominaislämmönkulutuksissa sekä sähkön ja lämmön kulutuksien suhteissa. Kaikki rakennukset kuitenkin käyttivät energiaa pääosin päiväaikaan eikä rakennuksia voitu tämän perusteella asettaa eri kategorioihin. Kaikkien rakennusten huippukulutushetket ajoittuivat päiväaikaan, mutta kulutushuippujen kestot kuitenkin vaihtelivat. Rakennuksia voitiin luokitella niiden ominaislämmönkulutuksen ja ominais sähkökulutuksen perusteella, koko vuoden osalta ja eri vuodenaikoina. Rakennuksia voitiin luokitella myös sähkön ja lämmön kulutuksen suhteiden kautta ja huipputehon ja keskitehon suhteilla. Kustannustehokkaissa järjestelmäkapasiteeteissa ei kuitenkaan havaittu selkeitä sääntöjä järjestelmämitoitukseen näiden luokittelukriteerien suhteen. Tiettyjä korrelaatioita nähtiin, mutta samanlaisia suhteellisia mitoituksia nähtiin niin pienillä kuin suurillakin kulutuksilla. Laskentamalli kuitenkin mahdollistaa helpon rakennuskohtaisen tarkastelun, juuri kyseiseen energiaprofiiliin sopivan järjestelmän etsimiseksi.

Rakennusta suurempi vaikutus järjestelmämitoitukseen oli energian hinnalla. Erilaisissa sähkön hintaskenaarioissa nähtiin selvä ero kustannusoptimaalisissa ratkaisuisa. Kun sähkö oli tasaisen kallista, lämpöpumppuja ei juuri kannattanut asentaa. Sähkön suuri tuntikohtainen hintavaihtelu kuitenkin lisäsi jonkin verran lämpöpumppujen kannattavuutta, jolloin pieni lämpöpumppu kannatti liittää kaikkiin rakennuksiin. Halvan sähkön tapauksissa lämpöpumppu oli mukana kaikissa ratkaisuisa merkittävällä kapasiteetilla. Aurinkosähköä kannatti asentaa maksimimäärä kaikissa hintaskenaarioissa ja jokaisen rakennuksen tapauksessa. Aurinkolämpöjärjestelmän järkevyys riippui hinnoista ja muista järjestelmistä. Aurinkolämpöä kannatti asentaa kalliin sähkön skenaarioissa, mutta ei halvan sähkön skenaarioissa. Tämä oli kytköksissä lämpöpumppukapasiteettiin, sillä halvalla tuotetta lämpöpumppuenergia söi aurinkolämmön hyödyt pois. Lämpöpumpuilla saatiin myös suurimmat päästövähennykset. Aurinkolämpö leikkasi päästöjä tehokkaasti, jos lämpöpumppua ei ollut, mutta lämpöpumppukapasiteetin kasvaessa myös aurinkolämmön päästöhyödyt leikkautuivat pois. Sähköakkuvarasto oli kannattava ainoastaan kalliin sähkön skenaarioissa.

Varsinaisten ratkaisupakettien sijaan tutkimushankkeen päätuloksena on esitetty laskentatyökalu, joka mahdollistaa erilaisten hybridiratkaisujen seulonnan hankesuunnitteluvaiheessa. Koska energian hinnan vaikutus on suuri, on tärkeää pystyä kokeilemaan ratkaisujen kannattavuutta erilaisissa hintaskenaarioissa ja tarkastelujaksoissa. Laskentaohjelmalla voidaan tunnistaa kustannustehokkaita ratkaisuja erilaisilla CO₂-päästötasoilla tai primäärienergiakulutuksilla. Parametriajoja voidaan myös toteuttaa useita peräkkäin, jolloin ensimmäisessä vaiheessa voidaan karkeilla valinnoilla tunnistaa kiinnostavimpien ratkaisujen alue ja tutkia sitä tarkemmin toisella laskentakierroksella.

Laskentatyökalua voi edelleen kehittää eteenpäin. Siihen on mahdollista lisätä erilaisia järjestelmiä ja nykyisten järjestelmien toimintaa voi muokata. Erityisen kiinnostavaa olisi toteuttaa järjestelmämallinnus todellisten järjestelmien mittaustataan pohjautuen. Rakennuksen fyysisten rajoitusten, kuten aurinkoenergialle käytettävissä olevan kattopinta-alan huomiointi olisi hyödyksi. Myös graafisen käyttöliittymän kehittäminen olisi hyvä parannus ohjelmaan.

Laskentatyökalun voi ladata HybE-hankkeen verkkosivulta osoitteesta:

<https://research.tuni.fi/talotekniikan-tutkimusryhma/research/hybe/>