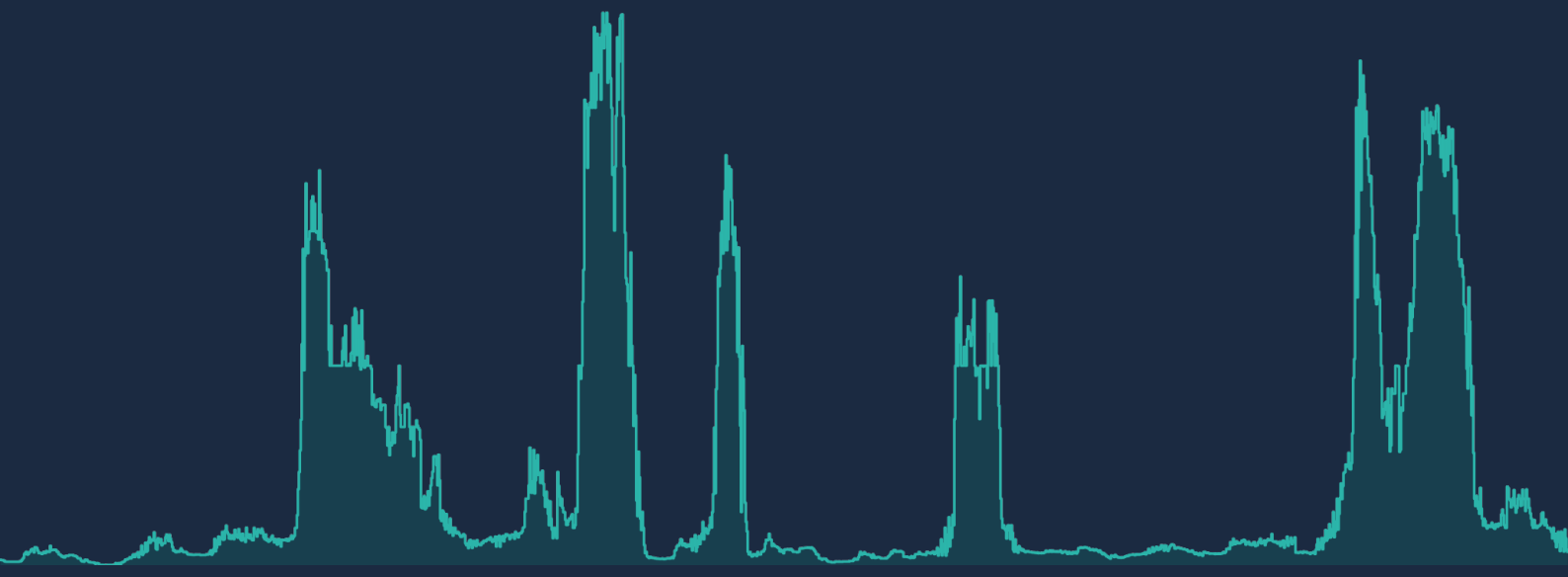
WHITE PAPER · MARRASKUU 2026

Pörssisähkö-optimointi

Omakotitalon lämpöpumpun, käyttöveden ja sähköauton ohjaus varttihintojen mukaan – malli, arkkitehtuuri ja mitatut tulokset



Kirjoittaja

Joni

Tarkastelujakso

19.10.–13.11.2026

Versio

1.1 · 14.11.2026

Kaikki luvut ja kuvaajat perustuvat järjestelmän palvelimelle tallentuneeseen mittaus- ja lokidataan.
Kansikuvan käyrä: toteutuneet varttihinnat 27.10.–12.11.2026.

Sisällys

1. Tiivistelmä . . . 3

2. Lähtökohta: hintavaihtelu ja siirrettävät kuormat . . . 4

3. Arkkitehtuuri . . . 5

3.1 Ohjaussykli . . . 5

3.2 Kehitys ja testaus . . . 6

4. Datalähteet ja integraatiot . . . 6

4.1 Aurinkosähkön ennustemalli . . . 6

4.2 Sisälämpö ja sen laatu . . . 7

5. Optimointimalli . . . 7

5.1 Tehollinen hinta . . . 7

5.2 Hintarankkaus ja mukavuuskaista . . . 7

5.3 Palautesäännöt . . . 8

5.4 MPC-kerros (12 h horisontti) . . . 8

5.5 Aamun mukavuustila ja esilämmitys . . . 9

5.6 Säästön laskenta ja lämmitystehomalli . . . 9

6. Laitekohtaiset ohjausstrategiat . . . 10

6.1 Viessmann Vitocal 333-G . . . 10

6.2 Tesla-lataus . . . 10

6.3 Kodinkoneet . . . 11

7. Turvallisuus ja luotettavuus . . . 11

8. Tietoturva . . . 12

9. Tulokset todellisesta datasta . . . 12

9.1 Aineisto ja menetelmät . . . 12

9.2 Esimerkkipäivä: maanantai 2.11.2026 . . . 13

9.3 Mitattu ajoitushyöty koko talon tasolla . . . 14

9.4 Säästö vakiolämpöiseen taloon . . . 15

9.5 Mukavuus . . . 16

9.6 Tesla-lataus halvimpiin vartteihin . . . 17

9.7 Aurinkosähkö ja omakäyttö . . . 17

10. Opit ja jatkokehitys . . . 18

10.1 Opit . . . 18

10.2 Jatkokehitys . . . 18

10.3 Kotiakun arviointi . . . 19

Liite: datan kattavuus ja puutteet . . . 19

1. Tiivistelmä

Pörssisähkön hinta vaihtuu Suomessa vartin välein, ja saman vuorokauden kalleimman ja halvimman vartin ero on usein moninkertainen. Omakotitalossa suurimmat kuormat eli maalämpöpumppu, käyttöveden lämmitys ja sähköauton lataus ovat juuri niitä, joita voi siirtää ajassa mukavuudesta tinkimättä. **Pörssisähköoptimointi** on itse kehitetty ja itse ylläpidetty Python-sovellus, joka hakee varttihinnat, laskee jokaiselle vartille tehollisen ostohinnan ja ohjaa laitteita niin, että energia ostetaan halvoilla varteilla ja kalliilla varteilla hyödynnetään talon ja varaajan lämpövarastoa.

Järjestelmä pyörii Docker-kontissa Oracle Cloudin ARM-palvelimella Caddy-välityspalvelimen (HTTPS) takana. Se ohjaa Viessmann Vitocal 333-G -maalämpöpumpun kahta lämmityspiiriä ja käyttövettä ViCare-rajapinnan kautta sekä Teslan latausta Fleet API:n kautta. Lisäksi se lukee aurinkovoimalan tuotannon, verkkoyhtiön mittaaman ostosähkön ja sisälämpöanturit. Käyttöliittymiä ovat suomenkielinen web-kojelauta, PWA ja Android-widget. Ohjauksen ympärille on rakennettu kirjoitusvahdit, palautuspisteet, hätäpysäytys ja vain luku -vierasrooli.

Live-ohjaus kytkettiin päälle 19.10.2026. Tämä raportti (versio 1.1, 14.11.2026) kuvaa mallin ja arkkitehtuurin ja esittää tulokset ensimmäiseltä 26 vuorokaudelta (19.10.–13.11.2026). Versio 1.1 päivittää lämmitys- ja säästömallin, aurinkoennusteen, käyttöveden legionella- ja kiertokuvauksen sekä Teslan aamuminimin. Kaikki luvut on laskettu palvelimen tallentamasta datasta.

−5,1 %
Koko talon ostosähkön kulutuspainotettu hinta vs. tasainen kulutus, mitattu 20.10.–12.11.2026 (aiemmin useimpina kuukausina +1…+6 %)

15,53 €
Säästö 19.10.–13.11.2026 vertailtuna vakiolämpöiseen taloon (23,5 °C): 122,40 € → 106,87 € (−12,7 %)

0
Mittausta mukavuuskaistan alarajan (21,5 °C) alapuolella; 79,8 % vartista kaistalla

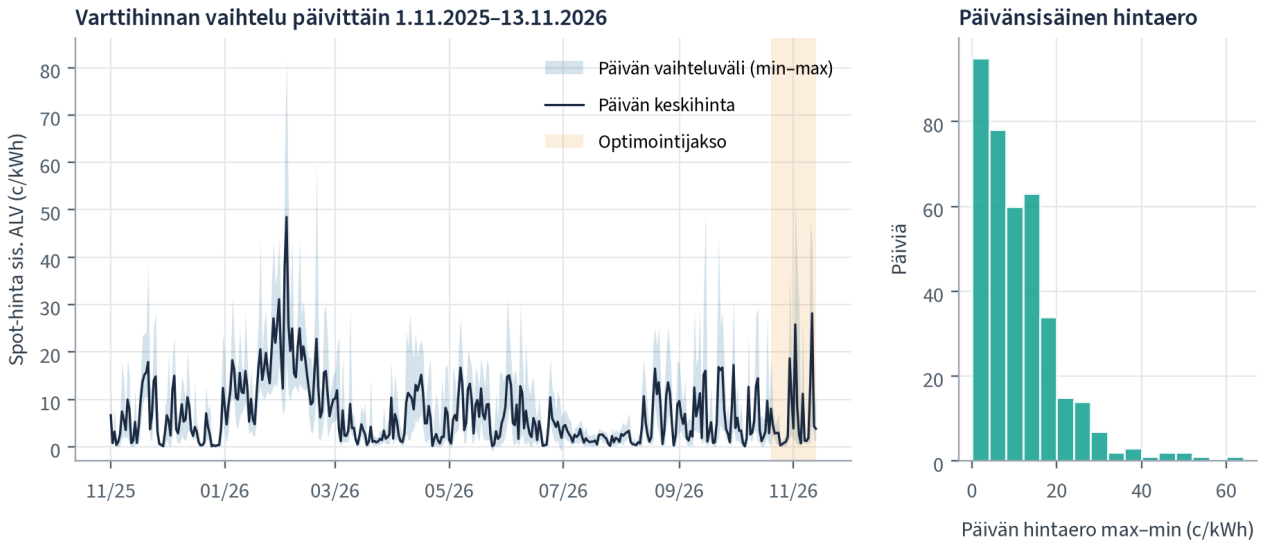
46,5 %
Aurinkosähkön omakäyttöaste 3–10/2026 (6 932 kWh tuotannosta 3 220 kWh omaan käyttöön)

Keskeiset havainnot

- **Mitattu ajoitushyöty:** Verkkoyhtiön tuntimittausten mukaan talo osti 20.10.–12.11. yhteensä 1 265 kWh, ja sen energiakustannus oli 148,33 €. Sama energia tasaisesti vuorokauden yli olisi maksanut 156,32 €, eli ero on 7,99 € (−5,1 %). Edeltävällä neljällä viikolla ostosähkö oli 3,3 % tasaista kalliimpaa, ja edellisen vuoden vastaavana aikana 2,6 % kalliimpaa.
- **Kallis päivä:** 2.11.2026 tehollinen hinta vaihteli 5,7–58,9 c/kWh. Patteripiirin asetus laski kalliiksi päiväksi 20–21 °C:een ja lattiapiiri 27 °C:een, ja käyttövesi ladattiin etukäteen yösähköllä. Sisälämpö pysyi silti välillä 22,2–22,9 °C.
- **Sähköauto:** Oman auton latauksista 18 istuntoa (199 kWh) maksoi energiapainotetusti 9,86 c/kWh, kun latauspäivien keskihinta oli 10,61 c/kWh. Tulos on myönteinen mutta vaatimaton, koska vain 23 % energiasta ladattiin yöllä. Auton oman ajastuksen käyttöönoton (2.11.) jälkeen lataus on odottanut yösiirtoa (esim. 5.–6.11.: 22,6 % halvempi kuin lataus heti kytkettäessä), mutta muutoksen jälkeistä dataa on vielä vähän.
- **Säästö vakiolämpöiseen taloon:** 19.10.–13.11. säästö oli 15,53 € (122,40 € → 106,87 €, −12,7 %). Siitä ajoitus 13,67 €, ylilämmön välttäminen 2,66 €, käyttövesi 1,46 €, lämpömassa −0,15 € ja Tesla −2,11 €. Vertailu on vakio 23,5 °C, koska talo oli ennen optimointia keskimäärin tässä tasossa ja ylilämpeni usein ilman sisäantureita.
- **Mallit 14.11.2026:** aurinkoennuste oppii varjostuskartan auringon asennon mukaan (tuntivirhe 0,488 → 0,424 kWh/h; marraskuussa 0,282 → 0,117 kWh/h). Lämmityssähkö lasketaan UA·ΔT/COP-taulukosta mitatulla keruuliuoksella. Tekoälymallien aineistoa kerätään, mutta opetus on pois päältä.

2. Lähtökohta: hintavaihtelu ja siirrettävät kuormat

Pohjoismaisilla sähkömarkkinoilla vuorokausimarkkinan hinta määräytyy nykyään 15 minuutin jaksoille. Kuluttajan tehollinen hinta koostuu spot-hinnasta arvonlisäveroineen, siirtomaksusta ja sähköverosta. Tässä taloudessa siirto on aikasiirtoa: päivällä klo 7–22 3,80 c/kWh ja yöllä 1,61 c/kWh. Sähkövero on 2,92 c/kWh. Yösiirto tekee yöstä halvan jo silloinkin, kun spot-hinta on tasainen.



Kuva 1. *Päivittäinen varttihinnan vaihteluväli ja keskihinta 1.11.2025–13.11.2026 (spot sis. ALV 25,5 %; lähde: palvelimen hintahistoria, Elering ja spot-hinta.fi). Oikealla päivän sisäisen hintaeron jakauma. Oranssi alue on optimointijakso.*

Tunnusluku (spot sis. ALV)	12 kk: 1.11.2025–31.10.2026	Optimointijakso 20.10.–13.11.2026
Keskihinta	6,88 c/kWh	6,46 c/kWh
Päivän hintaero max–min, mediaani / keskiarvo	9,2 / 10,7 c/kWh	6,3 / 14,5 c/kWh
Päiviä, joina hintaero yli 20 c/kWh	42	7 / 25
Kallein vartti	82,19 c/kWh (3.2.2026 klo 17.00)	52,14 c/kWh (2.11.2026 klo 13.45)
Negatiivisia vartteja	321 (alin −1,09 c/kWh)	0
Keskihajonta	7,6 c/kWh	10,1 c/kWh

Taulukko 1. *Hintavaihtelun tunnusluvut palvelimen hintahistoriasta.*

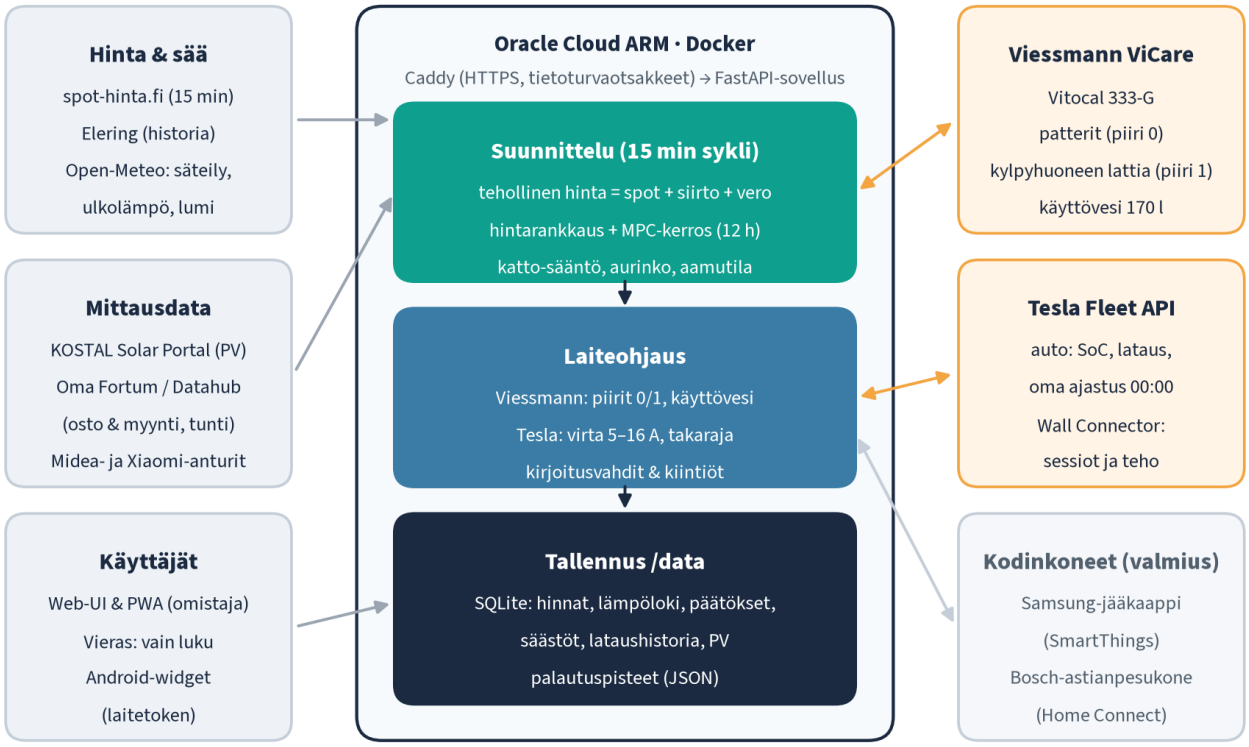
Hintaa ei voi muuttaa, joten säästö syntyy siitä, milloin energia ostetaan. Talossa on kolme kuormaa, joita voi siirtää ajassa:

- **Tilalämmitys** maalämpöpumpulla: patteripiiri (piiri 0) ja kylpyhuoneen lattiapiiri (piiri 1). Talon rakenteet varaavat lämpöä, joten muutaman tunnin esilämmitys tai lämmityksen keventäminen ei näy asukkaalle, jos sisälämpö pysyy kaistalla.
- **Käyttövesi** 220 litran sisäänrakennetussa varaajassa (Vitocal 333-G). Varaaja voidaan ladata halvalla ja antaa jäähtyä kalliina aikana 46 °C:een. Kiertoa ei pysäytetä, ja kerran viikossa varaaja nostetaan 60 °C:een legionellasuojaukseksi. Ylemmät asteet huonontavat COP:ta, joten se on otettava huomioon.
- **Sähköauto**: Tesla ladataan seinälaturilla 11 kW:n teholla (16 A, 3 vaihetta). Päätavoite on 80 % klo 07.00, ja auto pidetään joka aamu vähintään 70 %:ssa. Tyypillinen lataus vaatii vain muutaman tunnin, ja klo 22–07 välillä on 36 varttia, joista valita.

Kuormia on hankala ohjata käsin, koska ne kilpailevat samoista halvoista varteista. Myös laitteiden rajat on huomioitava: Viessmannin rajapinnan kiintiö on 1 450 kutsua vuorokaudessa, Teslan Fleet API on maksullinen, auto ei saa herätä turhaan ja lämmitys reagoi tunnin tai kahden viiveellä. Lisäksi ennusteet muuttuvat, kun huomisen hinnat julkaistaan iltapäivällä.

3. Arkkitehtuuri

Sovellus on yksi Python-prosessi (FastAPI ja APScheduler). Se ajetaan Docker-konttina Oracle Cloudin Always Free -tason Ampere-ARM-palvelimella. Julkinen osoite on kirjautumisen takana (Caddy hoitaa Let's Encrypt -varmenteet ja tietoturvaotsakkeet). Pysyvä data on Docker-volyymissa /data SQLite-tietokantoina ja JSON-tiedostoina. Rakennusvaihetta ei ole: käyttöliittymä on palvelimella renderöityä HTML:ää, ja kaaviot piirretään paikallisesti tarjoillulla Chart.js-kirjastolla. Teslan allekirjoitetut komennot kulkevat samassa Docker-verkossa ajettavan vehicle-command-välityspalvelimen kautta.



Kuva 2. *Järjestelmän arkkitehtuuri. Optimointisykli ajetaan 15 minuutin välein ja Teslan oma ohjaussykli 5 minuutin välein. Kodinkoneiden integraatiot on toteutettu, mutta ne eivät ole tällä hetkellä käytössä.*

3.1 Ohjaussykli

- **Hinnat:** huomisen hinnat haetaan klo 14.15 alkaen, kunnes ne saadaan (viimeistään 23.45). Jokainen haku tallennetaan hintahistoriaan, ja menneet päivät täydennetään Eleringin avoimesta day-ahead-rajapinnasta.
- **Suunnitelma:** joka vartti lasketaan suunnitelma koko tunnetulle hintahorisontille (tyypillisesti 10–34 h): patteri- ja lattiapiirin asetukset, käyttöveden tavoite ja Teslan latausvartit.
- **Palaute:** mitattu sisälämpö, säteilyennuste ja opittu lämpömalli korjaavat suunnitelmaa ennen kirjoitusta (katto-sääntö, aurinkokompensointi, lykkäys ja MPC).
- **Kirjoitus:** ohjaus on varttikohtainen. Asetukset kirjoitetaan noin 5 min vartin alun jälkeen ja vain muuttuneina, ja niitä verrataan laitteen tuoreeseen tilaan. Kirjoitusvahdit, kiintiövaraus ja käsinmuutosten tunnistus voivat estää kirjoituksen. Jaksolla 19.10.–14.11. muutoksia tehtiin tasaisesti kaikilla varteilla (ei tuntirytmiä); viiden minuutin viiveen arvioitu vaikutus oli noin 12 kWh ja 0,26 € (suuntaa antavasti 3–4 €

vuodessa).

- **Lokit:** lämpöloki (15 min), päätösloki, säästöt lähteittäin ja laitteiden laskurit tallennetaan analyysiä ja mallin oppimista varten.

3.2 Kehitys ja testaus

Projekti alkoi 21.9.2026 offline-MVP:nä, jossa laitteet olivat simuloituja. Pilviversio valmistui 10.10.2026, ja Viessmannin live-ohjaus kytkettiin 19.10.2026. Versionhallinnassa on 14.11.2026 mennessä 122 committia ja testisarjassa 63 testitiedostoa ja 455 testifunktiota. Jokaisen deployn commit ja aikaleima näkyvät käyttöliittymän alatunnisteessa.

4. Datalähteet ja integraatiot

Integraatiot on toteutettu laitevalmistajien pilvirajapintojen kautta, joten kotiverkkoon ei tarvita avoimia portteja eikä paikallista palvelinta. Taulukko 2 kokoaa lähteet, niiden käyttötavan ja nykyisen tilan.

Lähde	Mitä	Käyttö ja rajoitteet	Tila
spot-hinta.fi	FI day-ahead 15 min	Ensisijainen hintalähde, ei avainta	Käytössä
Elering (NPS)	Historialliset FI-hinnat	Puuttuvien päivien täydennys; todettu identtiseksi	Käytössä
Viessmann IoT API v2 (ViCare)	Vitocal 333-G: piirit 0/1, käyttövesi, COP, kompressori	Luku välimuistista (≤ 144 lukua/vrk), kiintiö 1 450/24 h	Ohjaus päällä
Tesla Fleet API + Wall Connector	Auton SoC ja lataus; laturin sessiot ja teho	Komennot allekirjoitettuina proxyn kautta; ei herätyksiä; kuukausibudjetti	Ohjaus päällä
KOSTAL Solar Portal	Plenticore 10: PV-tuotanto 15 min	Vain luku, viive n. 25–30 min; ei talon energiamittaria	Käytössä
Oma Fortum / Fingrid Datahub	Verkosta osto ja verkkoon myynti tunneittain	Vain luku, viive 7–12 h; CSV-tuonti varalla	Käytössä
Open-Meteo	Säteily, ulkolämpö- ja lumiennuste	PV-malli, aurinkokompensointi, pakkasnosto	Käytössä
Midea SmartHome	Ilmalämpöpumppujen sisälämpöanturit	Sisälämmön ensisijainen mittaus (vain luku)	Käytössä
Xiaomi-ilmanpuhdistimet	Lämpötila	Sisälämmön varalähde	Käytössä
Samsung SmartThings	Jääkaapin asetus 2–4 °C	Turvaraja 1–5 °C, pito 60 min	Toteutettu, pois päältä
Bosch Home Connect	Astianpesukoneen ajastus	Halvin ikkuna ennen klo 7, StartInRelative	Toteutettu, pois päältä

Taulukko 2. *Integraatiot ja niiden tila 14.11.2026 (tila tarkistettu palvelimen asetuksista).*

4.1 Aurinkosähkön ennustemalli

Kostalin portaali kertoo tuotannon mutta ei talon kulutusta, koska laitoksella ei ole energiamittaria. Siksi oma käyttö lasketaan verkkoyhtiön mittauksista: oma käyttö = PV-tuotanto − verkkoon myyty. Tuotantoennuste lasketaan Open-Meteon säteilystä paneelitason mallilla (kallistus 23°, suunta 135°). Mallin tehollinen kWp ja lämpötilakerroin sovitetaan Kostal-historiaan. Viimeisin sovitus (9.11.2026, 129 päivää, 6 602 varttia) antoi tehollisen tehon 7,49 kWp ja selitysasteen R^2 = 0,86 vuorokausitasolla ja 0,75 tuntitasolla. Keskimääräinen virhe oli 4,35 kWh/vrk, kun keskituotanto oli 22,2 kWh/vrk.

14.11.2026 ennusteeseen lisättiin opittu varjostuskartta: suoran säteilyn kerroin auringon atsimuutin (45–315°, 15°:n lokeroin) ja korkeuden (0–60°, 5°:n lokeroin) mukaan sekä hajasäteilyn kerroin korkeusvyöhykkeittäin, kutistettuna ja tasoitettuna. Sovitus tehtiin pitkästä historiasta vuodesta 2023 alkaen. Kartta poisti ajoituksen näennäisen jäljessä olon, joka johtui varjostuksesta matalalla auringolla eikä paneelien suunnasta. Tuntivirhe oli vuoden yli testattuna 0,488 → 0,424 kWh (marraskuu 0,282 → 0,117 kWh). Lumen kuukausikerroin nollataan, kun kartta on käytössä, jotta häviötä ei lasketa kahteen kertaan.

Sääkorjaus oppii Open-Meteon tuntisäästä aamuhuurretta (yön minimi, kastepistevaje, selkeys, tuuli; kova huurre omassa luokassaan), pilvisyyttä, lumipäivän ajoitusta, lämpötilaa ja tuulta. Säännöt sovitetaan peräkkäin, kutistetaan kohti 1:tä ja otetaan käyttöön vain, jos ne läpäisevät ristiinvalidoinnin tai huurteen toistuvuusportin (kova huurre: vähintään neljä heikkoa aamua). 14.11. käytössä oli vain kovan pakkasen huurrekorjaus; lievempi huurre, pilvisyys, lumi ja tuuli odottavat lisää dataa.

4.2 Sisälämpö ja sen laatu

Sisälämpönä käytetään kahden huoneen Midea-anturien keskiarvoa, joka suodatetaan 30 minuutin aikavakiolla (EWMA), koska anturin porrastus on 0,5 °C. Lukema hylätään, jos se on yli 45 minuuttia vanha tai pysynyt muuttumattomana yli 6 tuntia. Silloin käytetään ilmanpuhdistimien lämpötilaa korjattuna +1,1 °C:lla. Jakson 2 400 lämpölokivartista 2 186:ssa lähde oli Midea ja 7:ssä ilmanpuhdistin.

5. Optimointimalli

Malli on kerroksellinen. Pohjana on deterministinen hintarankkaus, joka on läpinäkyvä, nopea ja aina laskettavissa. Sen päällä palautesäännöt pitävät sisälämmön kaistalla mitatun lämpötilan ja ennusteiden perusteella. Ylimpänä on opittuun lämpömalliin perustuva MPC-kerros, joka saa korvata seuraavan tunnin asetuksen vain, jos se on mallin mukaan halvempi kuin sääntöpohjainen suunnitelma.

5.1 Tehollinen hinta

Jokaiselle vartille t lasketaan ostohinta. ALV (v = 25,5 %) lisätään vain positiivisiin spot-hintoihin.

$$p_t = s_t(1+v) \;+\; c_{\text{siirto}}(t) \;+\; c_{\text{vero}}, \qquad c_{\text{siirto}}(t) = \{3{,}80 \text{ (klo } 7\text{–}22);\;\; 1{,}61 \text{ (muulloin)}\} \text{ c/kWh}$$

Kun PV-ennuste ylittää arvioidun peruskuorman, ylijäämän kattama osa joustavasta kuormasta hinnoitellaan menetetyn myyntitulon mukaan (spot ALV 0 − 0,24 c/kWh). Silloin aurinkoinen keskipäivä näyttää optimoijalle halvalta, vaikka verkon ostohinta olisi korkea. Vertailusuunnitelma käyttää samoja rajahintoja, jotta säästö ei paisu.

5.2 Hintarankkaus ja mukavuuskaista

Vuorokauden vartit järjestetään halvimmasta kalleimpaan (sija r_t, N varttia). Halvimmille varteille annetaan kaistan yläraja, kalleimmille alaraja ja välissä oleville lineaarisesti interpoloitu arvo. Aggressiivisuus on a = 0,7, jolloin raja-arvot ovat 0,331 ja 0,669: noin kolmannes varteista saa ylärajan ja kolmannes alarajan.

$$f_t = r_t/(N-1), \quad \theta = 0{,}33a + 0{,}1$$
$$T_t^{\text{as}} = T_t^{\text{yl}} \quad \text{kun } f_t \le \theta$$
$$T_t^{\text{as}} = T_t^{\text{al}} \quad \text{kun } f_t \ge 1-\theta$$
$$T_t^{\text{as}} = T_t^{\text{yl}} - \tau_t(T_t^{\text{yl}} - T_t^{\text{al}}), \quad \tau_t = \text{clip}((f_t - 0{,}2)/0{,}6,\ 0,\ 1) \quad \text{muuten}$$

Sisälämmön kaista on 21,5–23,0 °C. Aamuikkunassa klo 4–12 yläraja on 24 °C, jotta halvalla yösähköllä voi varata lämpöä aamun kalliita tunteja varten. Kun kokonaishinta nousee yli 25 c/kWh, alaraja saa laskea lineaarisesti enintään 2 °C, mutta ei koskaan alle 20 °C:n:

$$T_t^{\text{al}} = \max\left(20,\ 21{,}5 - 2 \cdot \text{clip}\left(\tfrac{p_t - 25}{80 - 25}, 0, 1\right)\right)\ ^\circ\text{C}$$

Asetukset pyöristetään kokonaisiin asteisiin, koska laite hyväksyy patteripiirin asetuksen vain kokonaislukuna. Asetus ei ole sama asia kuin sisälämpö. Se on ohjausvipu, joka siirtää lämmityskäyrää (käyrä 1,4 / −14 pysyy talvella ennallaan). Kaistaa valvotaan mitatusta sisälämmöstä.

5.3 Palautesäännöt

- **Katto-sääntö:** kun mitattu sisälämpö on ylärajalla, halpa- ja aurinkonostot estetään ja asetus pidetään tasolla ⌊ylärajа⌋ − 1 ("pito"). Kun lämpö on vähintään 23,6 °C, asetusta lasketaan 1 °C ja sitten 1 °C lisää jokaista tuntia kohden, enintään 2 °C ("lasku"). Tila päättyy, kun sisälämpö on laskenut 22,3 °C:een. Päätöslokissa (2 303 kirjausta 20.10.–13.11.) pito oli aktiivinen 926 ja lasku 210 kertaa.
- **Aurinkokompensointi:** historiasta opitaan, paljonko sisälämpö nousee kahdessa tunnissa säteilyn kW/m² kohden. Jos ennuste ylittäisi ylärajan, asetusta lasketaan etukäteen 2 tunnin ennakolla, ja lattiapiiri rajataan perustasoon.
- **Lykkäys:** kun talo on katossa ja seuraavan 6 tunnin halvin vartti on vähintään 30 % halvempi, lämmitystä lykätään.
- **Heilunnan esto:** patteriasetuksen muutosten välillä on vähintään 60 minuuttia, paitsi turvasiirroissa (lämpö alle alarajan ja nosto tai yli ylärajan ja lasku).

5.4 MPC-kerros (12 h horisontti)

Kun päätöslokia on kertynyt vähintään 7 päivää ja 500 näytettä, sovitetaan pienimmän neliösumman (ridge) malli sisälämmön muutokselle. Viive L valitaan väliltä 0–3 h parhaan selitysasteen mukaan. Mallissa u on patteriasetus ja KV käyttöveden latauksen indikaattori:

$$\frac{dT}{dt} = c_0 + c_1\,(u_{t-L} - T_t) + c_2\,(T_t - T_t^{\text{ulko}}) + c_3\,\text{GHI}_t + c_4\,\text{KV}_t$$

Dynaaminen ohjelmointi valitsee kokonaisasteisen asetuksen jokaiselle tunnin lohkolle 12 tunnin horisontissa. Hinnat ovat varttikohtaisia ja ulkolämpö tulee Open-Meteon ennusteesta. Kohdefunktio on lämmityssähkön kustannus ja kaistarikkomusten sakko ($\lambda = 1\,000$), ja 20 °C on käytännössä ehdoton alaraja:

$$\min_{u_1 \ldots u_H \in \mathbb{Z}} \sum_{k=1}^{4H} p_k\,P(u_k,\,T_k,\,T_k^{\text{ulko}})\,\Delta t \;+\; \lambda \sum_k \left[(T_k^{\text{al}} - T_k)^+ + (T_k - T_k^{\text{yl}})^+ + 10\,(20 - T_k)^+\right]$$

Tilaa (sisälämpö 0,05 °C:n tarkkuudella) karsitaan 60 parhaaseen haaraan lohkoa kohden. Ratkaisusta käytetään vain ensimmäinen tunti (receding horizon), ja vain jos sen simuloitu kustannus on enintään sääntösuunnitelman kustannus samalla mallilla. Katto-sääntö rajaa tuloksen vielä tämän jälkeen.

Tila 13.11.2026
MPC-kerros on toteutettu ja testattu, mutta päätöslokissa ei ole yhtään MPC:n tuottamaa asetusta (sarake *mpc_sp* on tyhjä kaikissa 2 303 kirjauksessa). Tarkastelujakson ohjaus perustui siis hintarankkaukseen ja palautesääntöihin. MPC:n kytkeytyminen on yksi jatkokehityksen kohteista (luku 10).

5.5 Aamun mukavuustila ja esilämmitys

Aamun mukavuustila otettiin käyttöön 13.11.2026 ja täydennettiin 14.11. mukautuvalla esilämmityksellä. Kello 6–9 kaistan alaraja nostetaan vähintään 23,0 °C:een ja yläraja vähintään 23,5 °C:een (minimi + 0,5 K). Tarvittavat lämmitysvartit lasketaan mitatusta sisälämmöstä ja opitusta nousunopeudesta (enintään 8 h ennen ikkunaa) ja sijoitetaan halvimpiin, ei kalliisiin, vartteihin. Valituilla varteilla asetus on kaistan yläraja, ja patteripiirin (piiri 0) käyrän siirtoa nostetaan tilapäisesti +4 (kova katto +5). Peruskäyrä 1,4 / −14 palautetaan aina esilämmityksen jälkeen, hätäpalautuksessa ja uudelleenkäynnistyksessä. Käyttöveden lataus estetään esilämmityksen ja ikkunan aikana, kunnes aamuminimi on saavutettu, ellei varaaja ole kriittisen kylmä. Kalliilla vartilla (kokonaishinta vähintään 25 c/kWh) aamuminimiä ei pidetä, vaan normaali kaista on voimassa. Vaikutuksesta on vielä vähän tulosdataa.

5.6 Säästön laskenta ja lämmitystehomalli

Sovellus ajaa jokaiselle päivälle kaksi suunnitelmaa samoilla hinnoilla. Optimoitu suunnitelma on se, joka kirjoitetaan laitteille. Vertailu on vakiolämpöinen talo, jonka sisälämpö on koko vuorokauden 23,5 °C (asetettava). Tämä on talon keskimääräinen taso ennen optimointia: ilman sisäantureita lämpöpumppu ylilämmitti usein, joten ylilämmön välttäminen lasketaan säästöksi. Käyttövesi simuloidaan molemmissa samalla 220 litran varaajamallilla, jossa on kulutusprofiili, seisontahäviöt, laitteen ilmoittama tai varalla oleva COP ja hystereesi. Jakson lopussa varaajaan jäävä lämpöero hyvitetään tai veloitetaan. COP:n lämpötilariippuvuus (2,3 %/°C) rajaa ylimmät käyttövesiasteet niihin vartteihin, joissa hintaetu kattaa huonomman hyötysuhteen:

$$\mathrm{COP}(T) = \mathrm{COP}_{\mathrm{ref}}\,(1 - k\,(T - T_{\mathrm{ref}})), \qquad T \le T_{\mathrm{ref}} + \tfrac{1 - p_t/\bar{p}}{k}, \quad k = 0{,}023\ 1/^{\circ}\mathrm{C}$$

$$S = C_{\mathrm{vert}} - (C_{\mathrm{opt}} - H_{\mathrm{varaaja}}), \qquad C = \sum_t p_t\,(P_t^{\mathrm{lämm}} + P_t^{\mathrm{KV}})\,\Delta t$$

Lämmityssähkö lasketaan tehomallilla $P = \mathrm{UA}\cdot(T_{\mathrm{sisä}} - \text{lämpökuormat} - T_{\mathrm{ulko}}) / \mathrm{COP}(\text{meno, keruu})$. UA on 214 W/K (ViCare-viikkoregressio) ja lämpökuormat 5,6 K. COP tulee Vitocal 333-G:n (BWT 331.C12) datalehden taulukosta bilineaarisena interpolointina ja skaalataan mitattuun $\mathrm{COP}(T_{\mathrm{ulko}})$:hen. Varalla käytetään lämmityksen COP:ta 3,7 ja käyttöveden COP:ta 2,5. Invertterin sähköraja on 2,8 kW (W35) – 3,7 kW (W55). Keruuliuoksen lämpö on vartin mitattu meno; jos mittausta ei ole, käytetään mitattuun tasoon sovitettua vuodenaikakäyrää, koska kaivo jäähtyy talven mittaan ja kiinteä B0 olisi myöhäistalvella liian optimistinen.

Käyttöveden kiertoputket kulkevat laatassa, eikä kiertoa pysäytetä. Kiertohäviö on noin 21 kWh/vrk (käyttöveden energia − laskettu kulutus). Lämmityskaudella 80 % tästä on hyötylämpöä laatassa, mutta se tuotetaan käyttöveden huonommalla COP:lla (varalla 2,5) tilalämmityksen sijaan; kesällä se on hukkaa. Osuus näytetään erikseen eikä sitä lasketa kahteen kertaan. 19.10.–13.11. tästä syntyi lisäkustannusta 13,29 €.

Säästö jaetaan osiin: ajoitus, ylilämmön välttäminen (vertailulämpö vs. mitattu keskiarvo), lämpömassa, käyttövesi ja Tesla. Teslan vertailukohta on lataus heti täysillä kytkennästä alkaen, ja Teslan osuus säilyy ennallaan, kun historia lasketaan uudelleen. Lämmityksen osuus on edelleen **mallipohjainen arvio**. Koko talon mitattu ajoitushyöty esitetään luvussa 9.3. Lämpöpumpun sähköä arvioidaan lisäksi virtuaalimittarilla: talon kulutus (Datahub + oma PV) − seinälaturin istunnot − kalibroitu peruskuorma, vartin ajoitus kompressorin modulaatiosta. Se on analytiikkaa eikä ohjaa laitteita.

6. Laitekohtaiset ohjausstrategiat

6.1 Viessmann Vitocal 333-G

Ohjattava	Strategia	Rajat
Patteripiiri (piiri 0), huoneasetus	Hintarankkaus + katto-sääntö + aurinkokompensointi + (MPC)	20–24 °C, kokonaiset asteet, muutosväli ≥ 60 min
Kylpyhuoneen lattia (piiri 1), asetus	Perustaso 28 °C; halvimmat vartit +1 (halpanosto); kalleimmat −1; pakkasnosto +2	Aina 27–30 °C (yläraja nostettu 29 → 30 °C 13.11.2026)
Lattiapiirin käyrän siirto	katto −1 / normaali 0 / nosto +3; vähimmäispito 30 min; lattiasuoja	Pinta ≥ max(minimi, sisä + marginaali)
Käyttövesi	Halvat vartit ylös, kalliit alas; COP-raja; halpaboosti 57 °C ehdoin (aurinko tai yösiirto ja spot < 1 c)	46–54 °C, boosti 57 °C
Legionellasuojaus	Vähintään 7 vrk välein 60 °C:een, halvin 2 h ikkuna ensisijaisesti yöllä (klo 22–06); luonnollinen nousu nollaa eräpäivän	Saavutettu ≥ 59,5 °C; aikakatkaisu 4 h, uusi yritys 12 h kuluttua
Käyttöveden kierto	Kiertoputket laatassa; kiertoa ei koskaan pysäytetä; häviö mallinnetaan (80 % hyötylämpöä lämmityskaudella)	Ei ohjausta
Kesätila	Vain käyttövesi optimoidaan; kiinteä kesäkäyrä (jyrkkyys 0,2), talvikäyrä tallennetaan ja palautetaan	Vaihto kerran tilanvaihdossa

Taulukko 3. *Viessmann-ohjauksen strategiat ja rajat.*

Pakkasnosto nostaa lattian asetuksen +2 °C, kun seuraavan 24 tunnin aikana tulee sekä kallis vartti että ulkolämpöennuste alle 0 °C. Kalliin vartin määritelmä on oletuksena sama kuin käyttövedellä eli vuorokauden kalleimmat vartit, tai vaihtoehtoisesti kiinteä raja 25 c/kWh. Ajatus on varata kylpyhuoneen lattiaan lämpöä ennen pakkasen ja hintapiikin yhdistelmää. Halpanosto (+1) tehdään joka päivä halvimmilla varteilla. Lattiapiirin asetukset jakautuivat jaksolla seuraavasti: 27 °C 1 416, 28 °C 421 ja 29 °C 373 lämpölokivarttia.

6.2 Tesla-lataus

Päätavoite on 80 % klo 07.00 joka päivä (viikkoaikataulu, kertaluonteinen tavoite ohittaa sen). Lisäksi auto pidetään joka aamu vähintään 70 %:ssa klo 07.00, myös päivinä ilman takarajaa tai kun tavoite on myöhemmin. Puuttuva energia ladataan halvimpiin vartteihin ennen sitä viimeksi luetun varaustason perusteella, joten autoa ei herätetä. Tarvittava energia lasketaan varaustasosta, akun kapasiteetista (75 kWh) ja hyötysuhteesta. Lämpötilamalli (NMC) arvioi kylmän akun vastaanottokykyä ilman auton herättämistä.

$$E_{\text{tarve}} = \frac{\text{SoC}_{\text{tav}} - \text{SoC}}{100} \cdot \frac{C_{\text{akku}}}{\eta}, \qquad E_{\text{vartti}} = \frac{I \cdot 230\,\text{V} \cdot 3}{1000} \cdot 0{,}25\,\text{h} \quad (16\,\text{A} \Rightarrow 2{,}76\,\text{kWh})$$

- Halvimmat vartit saavat täyden virran (16 A), keskihintaiset skaalatun virran ja kalleimmat tauon. Tavoite saavutetaan aina 30 minuutin turvamarginaalilla ennen takarajaa, ja energiaan lisätään 5 % varaa.
- Virta-alue on *älykäs*: alle 40 %:n varauksella 5–16 A, muuten 0–16 A. Lataus on päällä tai tauolla vähintään 30 minuuttia kerrallaan, ja virranmuutosten väli on vähintään 15 minuuttia.
- **Auton oma ajastus** asetetaan muotoon "aloita klo 00.00", kun auto on jo hereillä. Näin kytkentä ei käynnistä latausta heti, ja sovelluksen käynnistyskomento ohittaa ajastuksen.
- Aurinkolataus: kun nowcast-ylijäämä on vähintään 3,45 kW (5 A × 3 × 230 V), ladataan ylijäämää vastaavalla virralla ja energia arvotetaan myyntihinnalla.
- Alle 2 prosenttiyksikön vaje ei käynnistä latausta. Fleet API -kutsuille on kuukausibudjetti (10 $) ja 80 %:n vahti. Marraskuussa 13.11. mennessä: 1 640 datakutsua, 75 komentoa, 0 herätystä.

6.3 Kodinkoneet

Samsung-jääkaapin ohjaus (SmartThings, 2–4 °C hinnan mukaan, turvaraja 1–5 °C) ja Bosch-astianpesukoneen ajastus (Home Connect, halvin ikkuna ennen klo 7, SSE-tapahtumavirta) on toteutettu ja testattu. Ne ovat kuitenkin palvelimen asetuksissa tällä hetkellä pois päältä, joten niistä ei ole tulosdataa.

7. Turvallisuus ja luotettavuus

Lämpöpumppu toimii aina itsenäisesti: ulkolämpötilan mukainen lämmityskäyrä, jäätymissuoja ja käyttöveden lämmitys pysyvät päällä, vaikka sovellus pysähtyisi. Siksi pahin vikatila on, että laitteelle jää viimeksi kirjoitettu arvo. Tätä riskiä hallitaan useilla kerroksilla:

Mekanismi	Toiminta
Hintavahti (V2)	Laitteita ei ohjata simuloiduilla tai vanhentuneilla hinnoilla. Silloin käytetään neutraalia perussuunnitelmaa ja annetaan hälytys.
Patteriasetuksen pito ja suodatus (V3)	Muutosten välillä vähintään 60 min, ja sisälämpö suodatetaan (EWMA 30 min). Turvasiirrot ohittavat pidon.
Anturivahti (V4)	Vanha (> 45 min) tai jumittunut (> 6 h) Midea-lukema hylätään, ja käyttöön otetaan varalähde.
Turva-arvot (V5)	Hallitussa sammutuksessa kirjoitetaan patterit 22 °C, lattia 28 °C (siirto +1) ja käyttövesi 52 °C, mutta vain suunnitellussa katkossa (erillinen lippu).
Kirjoitusvahdit	Lattiapiiri aina 27–30 °C. Suojattuja piirejä ei voi valita patteriohjauksen kohteeksi. Kirjoitetaan vain muutokset, ja niitä verrataan tuoreeseen laitearvoon.
Kiintiövaraus	Viessmannin 1 450 kutsun vuorokausirajasta varataan 150. Lähellä rajaa kirjoitetaan turva-arvot ja pidetään tauko.
Käsinmuutosten tunnistus	Jos arvoa muutetaan laitteelta tai ViCaresta, sovellus ei kirjoita sitä 6 tuntiin. "Jatka optimointia nyt" ohittaa odotuksen. Jaksolla tunnistettiin 8 tällaista lämpölokivarttia.
Palautuspisteet	Alkuperäiset asetukset (suojattu), manuaaliset, automaattiset ennen tilanvaihtoja ja päivittäiset (klo 3.30, 20 säilytetään). Palautus tarkistetaan lukemalla, ja salaisuudet poistetaan aina.
Hätäpysäytys	"Palauta alkuperäiset ja pysäytä optimointi" palauttaa laitteiden alkuperäiset arvot ja pysäyttää ohjauksen. Ohjaus jatkuu erillisellä painikkeella.
Valvonta ja hälytykset	Ulkoinen heartbeat lähtee vain, kun Viessmann-luku onnistuu ja suunnitelma on validi. Offline-varoitus tulee 45 minuutin jälkeen. Maapiirin menolämpötilan hälytys raja 0 °C (Android-ilmoitus).
Uudelleenkäynnistys	Kontti käynnistyy automaattisesti. Myöhästyneet ajot tehdään kerran (coalesce), ja laitteen todellinen tila luetaan ennen kirjoitusta.

Taulukko 4. *Turvallisuus- ja luotettavuusmekanismit (tarkistettu lähdekoodista).*

Vikatilanteita varten repositoriossa on suomenkielinen ohje, joka kuvaa pumpun perusarvot ja niiden asettamisen laitteen näytöltä tai ViCare-sovelluksesta, jos palvelin on pitkään alhaalla. Palvelimella oli 13.11.2026 tallessa alkuperäiset asetukset, yksi manuaalinen palautuspiste ja päivittäiset palautuspisteet 25.10.–13.11.2026.

8. Tietoturva

Järjestelmä ohjaa talon lämmitystä ja autoa, joten sen kirjautumistiedot ovat arvokkaita. Suunnittelun lähtökohta on pienin mahdollinen pinta: yksi julkinen HTTPS-palvelu, ei avoimia portteja kotiverkkoon ja kaikki salaisuudet palvelimella.

- **Kirjautuminen:** omistajan salasana tallennetaan PBKDF2-SHA256-tiivisteenä (310 000 iteraatiota, satunnainen suola). Istunto on allekirjoitettu eväste, joka on voimassa 7 vrk. Ilman salasanaa sovellus vastaa vain paikallisiin pyyntöihin (localhost).
- **Kirjautumisyritysten rajoitus:** epäonnistuneet yritykset lasketaan IP-osoitteittain, ja lukitus kasvaa eksponentiaalisesti 60 sekunnista tuntiin. X-Forwarded-For-otsakkeeseen luotetaan vain sisäverkon välityspalvelimelta.
- **Vierasrooli:** erillinen vain luku -tunnus. Kaikki muut kuin GET-pyynnöt hylätään (403). Asetukset, palautuspisteet, Datahub, lataushistoria, widget-API ja lataukset on piilotettu. JSON-vastauksista poistetaan arkaluonteiset avaimet, kuten tunnisteet, sijainti, tokenit ja käyttöpaikan numero. Diagnostiikka näyttää vieraalle vain kiinteät esimerkkiarvot. Salasanan kierto mitätöi vanhat vierasistunnot.
- **Laitetokenit:** Android-widgetin bearer-token kelpaa vain widgetin omiin polkuihin, ja tokeneita voi luoda, listata ja poistaa.
- **HTTPS ja otsakkeet:** Caddy (Let's Encrypt), HSTS, tiukka Content-Security-Policy (vain oma alkuperä), X-Frame-Options DENY, Permissions-Policy ja Server-otsakkeen poisto.
- **Salaisuudet:** salaisuudet ovat vain .env-tiedostossa (oikeudet 600, ei versionhallinnassa). OAuth-tokenit (Viessmann, Tesla, Kostal) tallennetaan oikeuksilla 600 ja kierretään automaattisesti. Valvonnan heartbeat-osoite suodatetaan lokeista.
- **Tesla-komennot** kulkevat Teslan vehicle-command-välityspalvelimen kautta (allekirjoitetut komennot). Auto ei herää sovelluksen pyynnöstä.
- **Off-site-varmuuskopio:** palvelin tekee joka yö yhdenmukaisen tilannekuvan datasta (SQLite-kannat varmuuskopioidaan kesken kirjoituksen estävällä tavalla). Kotikone hakee arkiston itse ulospäin SSH:lla; kotiin ei avata portteja.
- **Tämä dokumentti** on laadittu niin, ettei siinä ole sijaintia, laitetunnisteita, sarjanumeroita, osoitteita, IP-osoitteita, käyttöpaikan numeroa eikä tunnuksia. Se on julkaistu osoitteessa joni.rapanen.fi.

9. Tulokset todellisesta datasta

9.1 Aineisto ja menetelmät

Analyysi tehtiin 13.11.2026 palvelimelta vain luku -periaatteella kopioiduista tietokannoista. Taulukko 6 kokoaa käytetyt aineistot. Kaikki ajat ovat Suomen aikaa.

Aineisto	Ajanjakso	Resoluutio	Käyttö raportissa
Hintahistoria	1.10.2024–14.11.2026	15 min (1 h ennen 10/2025)	Hintavaihtelu, tehollinen hinta, kotiakku
Lämpöloki (Viessmann + anturit)	19.10.–13.11.2026	15 min	Esimerkkipäivä, mukavuus
Päätösloki	20.10.–13.11.2026	15 min	Katto-säännön tilat, MPC
Säästöhistoria (vakio 23,5 °C)	19.10.–13.11.2026	vrk	Säästö osineen (jälkilaskenta 14.11.)
Oma Fortum: osto / myynti	8/2024 / 1/2024 – 13.11.2026	1 h	Mitattu ajoitushyöty, omakäyttö
KOSTAL Solar Portal	11/2023–13.11.2026 (aukkoja)	15 min	PV-tuotanto 3–10/2026
Wall Connector: sessiot / tila	7/2026– / 19.10.2026–	sessio / 15–20 min	Tesla-analyysi
Lämpöpumpun laskurit	19.10.–13.11.2026	15 min	COP, käyntitunnit

Taulukko 5. *Analyysissä käytetyt aineistot.*

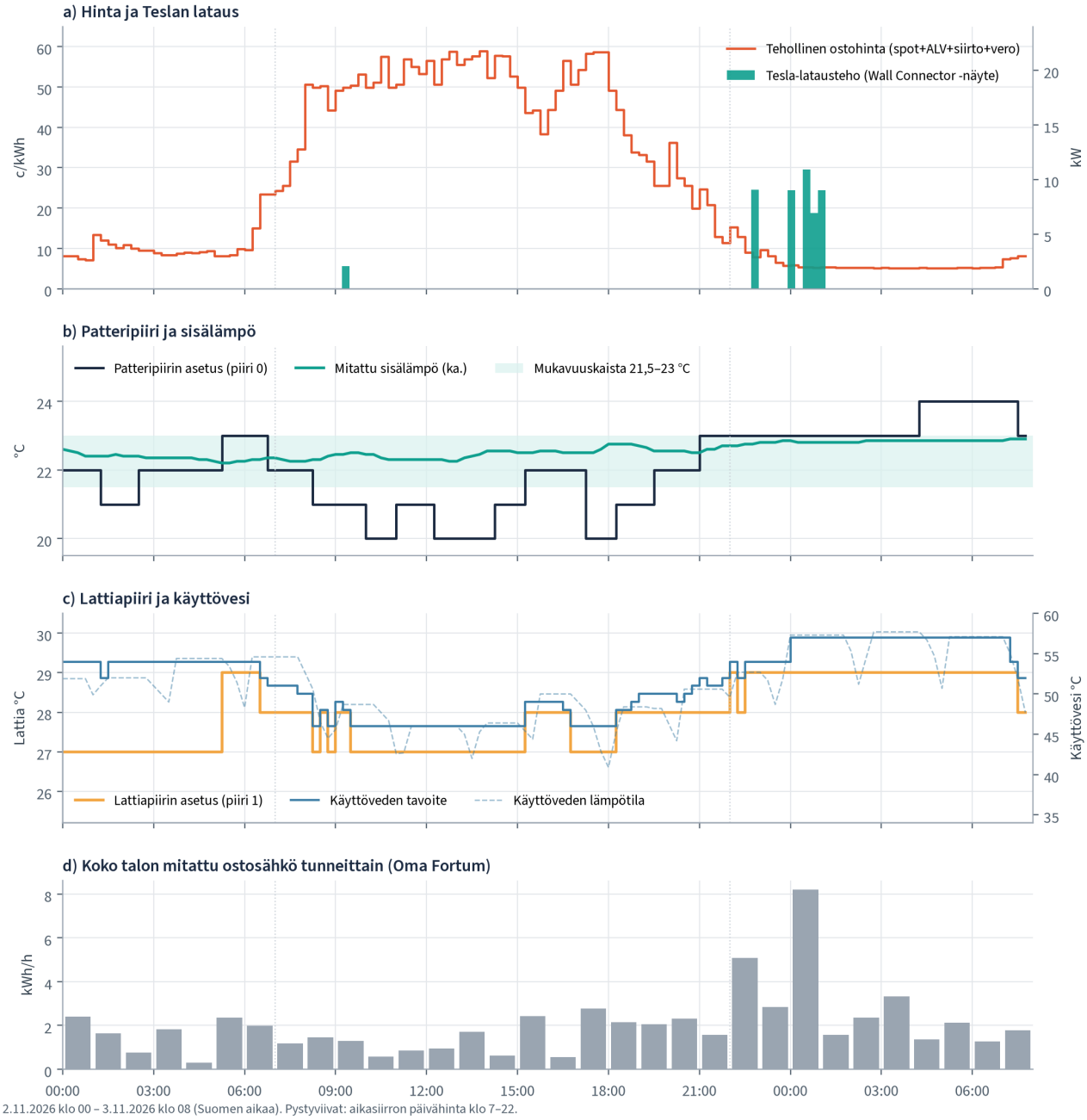
Mitattu ajoitushyöty lasketaan verkkoyhtiön tuntimittauksista. Toteutunutta kustannusta $\Sigma E_h p_h$ verrataan tilanteeseen, jossa saman päivän energia E_d olisi kulunut tasaisesti päivän keskihinnalla $\bar{p}_d$. Vertailu sisältää kaikki talon kuormat: lämpöpumpun, auton ja muun kulutuksen. Hintana käytetään tehollista hintaa (spot + ALV + aikasiirto + vero), eikä kiinteitä perusmaksuja oteta mukaan.

$$\Delta_{\%} = \frac{\sum_h E_h p_h - \sum_d E_d \bar{p}_d}{\sum_d E_d \bar{p}_d} \cdot 100$$

9.2 Esimerkkipäivä: maanantai 2.11.2026

Jakson kallein päivä havainnollistaa mallin toimintaa hyvin. Yö oli halpa (tehollinen hinta noin 8–9 c/kWh). Klo 8–18 hinta oli 44–59 c/kWh, ja illalla se palasi yösiirron alkaessa 6–9 c/kWh:iin. Suunnitelma toimi kuvan 3 mukaisesti:

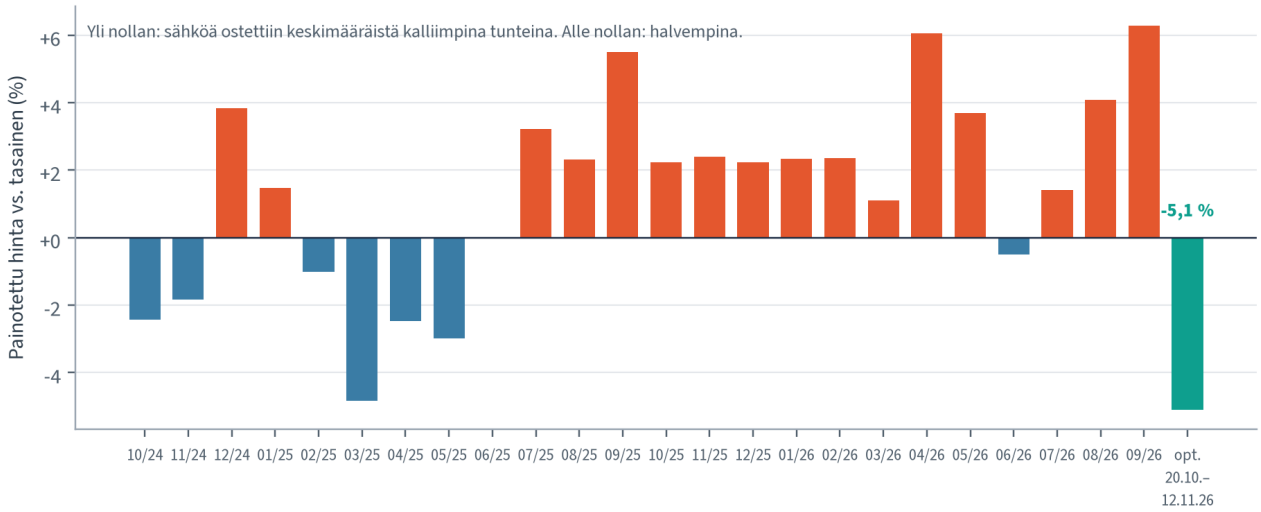
- **Ennen piikkiä** (klo 5.30–6.30) patteriasetus nostettiin 23 °C:een, lattia 29 °C:een käyrän siirrolla +3 ja käyttövesi ladattiin 54 °C:een.
- **Piikin aikana** patteriasetus laski 20–21 °C:een, lattia 27 °C:een ja käyttöveden tavoite 46 °C:een. Varaaja sai jäähtyä noin 42–46 °C:een, ja lämpöpumppu kävi enimmäkseen 20 %:n modulaatiolla.
- **Sisälämpö** pysyi koko päivän välillä 22,2–22,9 °C, eli talon lämpömassa kantoi kalliin jakson kaistan sisällä.
- **Illalla** klo 22 jälkeen asetukset nousivat takaisin (23 °C / 29 °C / 54 °C), ja Tesla latasi yöllä noin 9 c/kWh hinnalla, kun päivän keskihinta oli 31,7 c/kWh.
- **Mitattuna** talo osti sähköä 41,7 kWh, jonka energiapainotettu hinta oli 27,9 c/kWh, kun päivän tuntikeskihinta oli 31,7 c/kWh (−12 %). Kalliina aikana klo 8–18 ostettiin 13,2 kWh eli 32 % päivän energiasta, vaikka jakso kattaa 42 % vuorokaudesta.



Kuva 3. *Esimerkkipäivä 2.11.2026 klo 00 – 3.11.2026 klo 08. a) tehollinen ostohinta ja Wall Connectorin latausnäytteet; b) patteripiirin asetus ja mitattu sisälämpö; c) lattiapiirin asetus sekä käyttöveden tavoite ja lämpötila; d) koko talon mitattu ostosähkö tunneittain.*

9.3 Mitattu ajoitushyöty koko talon tasolla

Kuva 4 näyttää kulutuspainotetun hinnan suhteessa tasaiseen kulutusprofiiliin kuukausittain 10/2024–9/2026 sekä optimointijaksolta. Ennen järjestelmää talo osti sähköä useimpina kuukausina keskimääräistä kalliimpina tunteina: lokakuun 2025 ja syyskuun 2026 välisenä aikana luku oli 11 kuukautena 12:sta +1,1…+6,3 % (kesäkuu 2026: −0,5 %). Optimointijaksolla luku kääntyi −5,1 %:iin, mikä on 25 kuukauden sarjan pienin arvo.



Kuva 4. *Kulutuspainotetun tehollisen hinnan poikkeama tasaisen kulutuksen hinnasta kuukausittain (Oma Fortum -tuntimittaus × varttihinnoista lasketut tuntihinnat). Lokakuu 2026 on jätetty pois, koska optimointi alkoi kesken kuukauden. Viimeinen pylväs on optimointijakso 20.10.–12.11.2026.*

Jakso	Ostettu kWh	Toteutunut €	Tasainen €	Ero
Optimointi 20.10.–12.11.2026 (24 vrk)	1 265	148,33	156,32	−7,99 € (−5,1 %)
Edeltävä jakso 20.9.–18.10.2026 (29 vrk)	1 492	182,75	176,84	+5,91 € (+3,3 %)
Vuotta aiemmin 20.10.–12.11.2025 (24 vrk)	1 300	137,99	134,49	+3,50 € (+2,6 %)

Taulukko 6. *Mitattu energiakustannus verrattuna tasaiseen kulutukseen (tehollinen hinta, ilman perusmaksuja).*

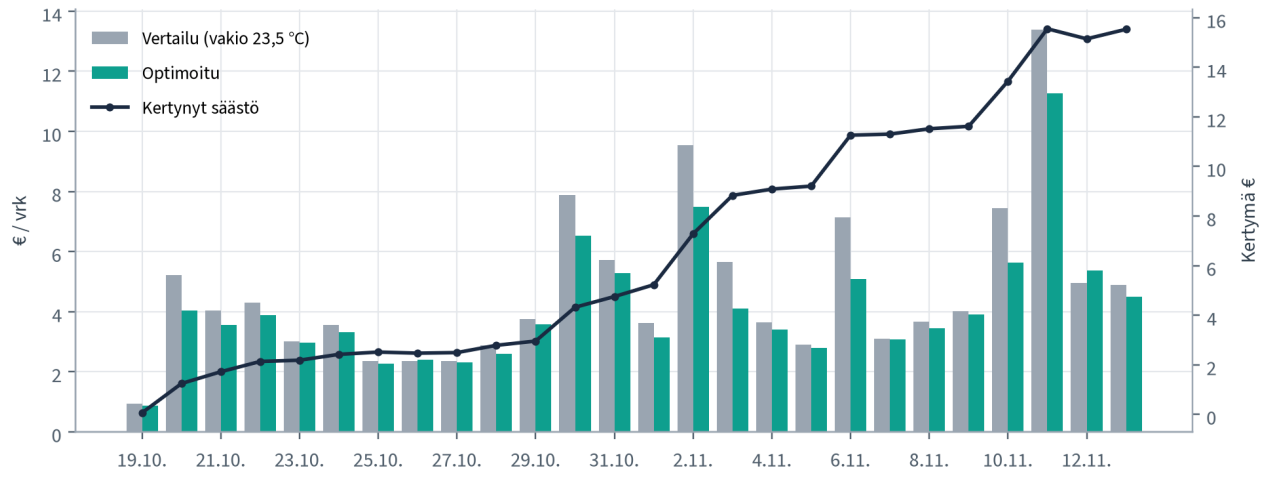
Jos edeltävän jakson +3,3 %:n lisähinta olisi jatkunut, optimointijakson energia olisi maksanut suuntaa antavasti noin 13 € enemmän kuin toteutui (8,4 prosenttiyksikköä × 156,32 €). Tämä on karkea arvio, ei kontrolloitu koe: kulutuksen rakenne, sää ja hintojen muoto vaihtelevat jaksojen välillä, eikä jakso ole vielä kuukauttakaan pitkä.

9.4 Säästö vakiolämpöiseen taloon

Sovelluksen säästölaskenta (luku 5.6, jälkilaskettu 14.11.2026 uudella tehomallilla) antaa jaksolle 19.10.–13.11.2026 (26 vrk) vertailukustannuksen 122,40 € ja optimoidun kustannuksen 106,87 €. Säästö on 15,53 € (−12,7 %). Aiempi suunnitelmamalli (tasainen 22,75 °C ja nimellisteho) tuotti selvästi suuremman luvun, joten sitä ei käytetä enää otsikkolukuna.

Osa	Säästö
Ajoitus (lämmitys halvoille varteille)	13,67 €
Ylilämmön välttäminen (vs. vakio 23,5 °C)	2,66 €
Lämpömassa	−0,15 €
Käyttövesi	1,46 €
Tesla (vs. lataus heti kytkettäessä)	−2,11 €
Yhteensä	15,53 €

Taulukko 7. *Säästön osat 19.10.–13.11.2026 (vakiovertailu 23,5 °C, jälkilaskenta 14.11.2026). Teslan osuus on kokonaissäästön ja muiden osien erotus ja säilyy ennallaan jälkilaskennassa.*



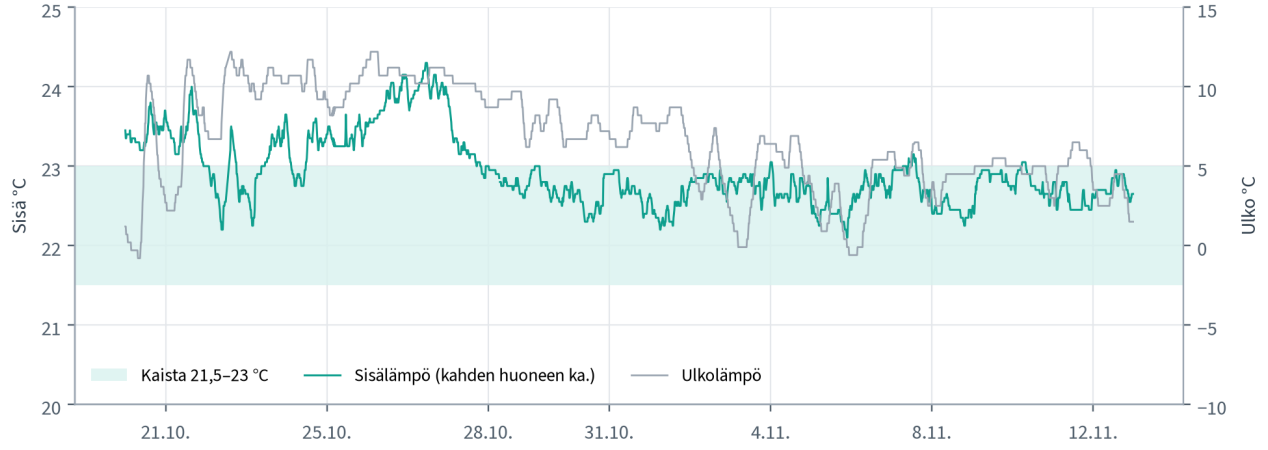
Kuva 5. *Päivittäinen kustannus: vertailu (vakio 23,5 °C) ja optimoitu suunnitelma sekä kertynyt säästö 19.10.–13.11.2026 (sovelluksen säästöhistoria, jälkilaskenta 14.11.2026).*

Suurimmat päiväsäästöt osuivat hintapiikkipäiville: 11.11. 2,11 €, 6.11. 2,05 €, 2.11. 2,05 € ja 10.11. 1,82 €. 12.11. säästö oli negatiivinen (−0,41 €) Teslan osuuden takia.

Tulkinta
Mallisäästö (−12,7 %) ja mitattu ajoitushyöty (−5,1 %) mittaavat eri asioita. Mallisäästö koskee ohjattuja kuormia ja vertaa vakiolämpöiseen taloon; lämmityssähkö on tehomallin arvio. Mitattu luku kattaa koko talon, myös siirtämättömän peruskuorman, ja vertaa tasaiseen profiiliin eikä optimoimattomaan ohjaukseen. Lämpöpumpun virtuaalimittari tarkentaa analytiikkaa, mutta erillistä energiamittaria ei vielä ole.

9.5 Mukavuus

Jakson 2 389 kelvollisesta lämpölokivartista 79,8 % oli kaistalla. Yksikään ei ollut alarajan 21,5 °C alapuolella, ja 20,2 % oli ylärajan yläpuolella (keskimäärin 0,53 K, yli 0,5 K 8,5 %:ssa varteista). Sisälämpö vaihteli välillä 22,1–24,3 °C, kun ulkolämpö oli −0,8…+12,2 °C (keskiarvo 6,7 °C). Analyysistä on poistettu 22.10. klo 12.00–14.15 kymmenen varttia, joiden keskiarvoon oli päätynyt virheellinen testilukema (huoneanturit näyttivät samaan aikaan 22,6–23,3 °C).



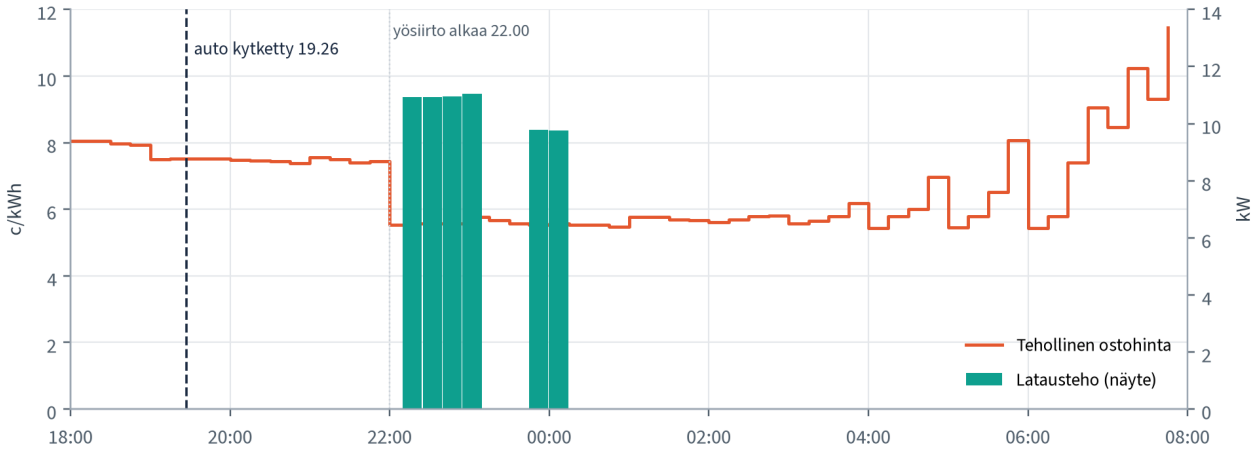
Kuva 6. *Mitattu sisälämpö (kahden huoneen keskiarvo, 15 min) ja ulkolämpö 20.10.–13.11.2026. Vihreä alue on perusmukavuuskaista 21,5–23 °C. Aamuikkunassa klo 4–12 yläraja on 24 °C.*

Ylitykset painottuvat lokakuun lämpimiin ja aurinkoisiin päiviin, jolloin lämmitystarve oli pieni ja lämmityskäyrän viive näkyi. Tämä on mukavuuden kannalta turvallinen suunta, mutta samalla se kertoo, että alarajaa ei vielä hyödynnetä täysimääräisesti säästöön. Lämpöpumpun ilmoittama COP oli jaksolla

lämmityksessä 3,7, käyttövedessä 3,0 ja yhteensä 3,4. Kompressori kävi 25 vuorokaudessa 459 tuntia ja käynnistyi 127 kertaa (noin 5 kertaa vuorokaudessa).

9.6 Tesla-lataus halvimpiin vartteihin

Wall Connectorin sessiohistoriassa on jaksolla 18 oman auton latausta (20.10.–6.11.2026), yhteensä 199,1 kWh ja 19,24 €. Niiden energiapainotettu tehollinen hinta oli 9,86 c/kWh, kun latauspäivien keskihinta oli 10,61 c/kWh (−7 %). Vain 23 % energiasta ladattiin klo 22–07: suuri osa istunnoista alkoi iltapäivällä tai illalla, kun auto kytkettiin. Saatavilla oleva data ei kerro, johtuivatko nämä istunnot "Lataa heti täysillä" -valinnasta, kertaluonteisesta tavoitteesta vai ohjauksen puutteesta.



Kuva 7. *Yö 5.–6.11.2026: auto kytkettiin klo 19.26, mutta lataus alkoi vasta yösiirron alettua klo 22 jälkeen (Wall Connectorin tilanäytteet 15–20 min välein). Istunto: 20,5 kWh keskihintaan 5,80 c/kWh, kun energia jaetaan tasan istunnon varteille kuten sovelluksen omassa laskennassa.*

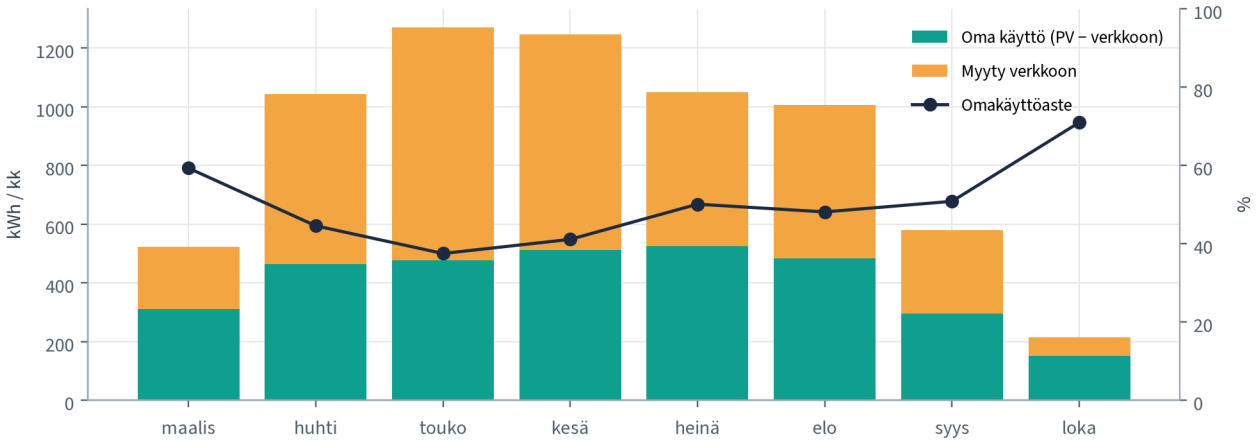
Yö	Havainto	Hinta
5.–6.11.2026	Kytketty 19.26, lataus alkoi klo 22.02–22.17 välillä (tilanäytteet). Heti kytkettäessä alkava, yhtä pitkä lataus olisi maksanut 7,49 c/kWh.	5,80 c/kWh (−22,6 %)
2.–3.11.2026	Lataus klo 22.50–1.15 kalliin päivän jälkeen (päivän keskihinta 31,7 c/kWh). Yön halvimmat vartit klo 2.30–6 olivat noin 5,1 c/kWh, eli ajoitus ei ollut optimaalinen.	8,13 c/kWh
Koko jakso	18 istuntoa, 199,1 kWh; 23 % yöllä	9,86 vs. 10,61 c/kWh

Taulukko 8. *Tesla-latauksen esimerkit (tehollinen hinta).*

Repositorion mukaan 2.11.2026 lisättiin auton oma ajastus (aloitus klo 00.00), jonka tarkoitus on estää latauksen käynnistyminen heti kytkettäessä, sekä tiheämpi Wall Connector -seuranta iltaisin. Tämän jälkeiset tilanäytteet ovat lupaavia: 5.–6.11. lataus odotti yösiirtoa, ja 7.11. lataus näkyi klo 0.15. Muutoksen jälkeistä dataa on kuitenkin vähän. Sovelluksen oma Tesla-säästöarvio 19.10.–13.11. on −2,11 €, mikä kertoo, että latausohjauksessa on vielä parannettavaa. 14.11. käyttöön otettu aamuminimi (70 % klo 07.00) ei vielä näy tässä jaksossa.

9.7 Aurinkosähkö ja omakäyttö

Maalis–lokakuussa 2026 Plenticore 10 tuotti 6 932 kWh. Siitä 3 711 kWh myytiin verkkoon ja 3 220 kWh (46,5 %) käytettiin itse. Aurinkosähkö kattoi 21,2 % talon kulutuksesta (oma käyttö / (oma käyttö + osto)). Omakäyttöaste oli pienimmillään toukokuussa (37,5 %) ja suurimmillaan lokakuussa (71,0 %), jolloin tuotanto oli pientä ja lämmityskuorma kasvoi.



Kuva 8. *Aurinkosähkön tuotanto jaettuna omaan käyttöön ja verkkoon myyntiin sekä omakäyttöaste kuukausittain 3–10/2026 (KOSTAL Solar Portal ja Oma Fortum).*

Optimointi alkoi lokakuussa, joten aurinkopohjaiset toiminnot (PV-rajahinta, aurinkolataus, käyttöveden aurinkoboosti) eivät vielä näy kesän luvuissa. Niiden vaikutus voidaan arvioida vasta keväällä 2027.

10. Opit ja jatkokehitys

10.1 Opit

- **Yksinkertainen rankkaus vie pitkälle.** Läpinäkyvä hintarankkaus ja muutama palautesääntö riittivät kääntämään koko talon ostosähkön keskimääräistä halvemmaksi heti ensimmäisellä jaksolla ilman, että sisälämpö kävi kertaakaan alarajan alapuolella.
- **Mittaa ensin, optimoi sitten.** Kostal-portaalista puuttuu kulutus, Fortumin data viivästyy 7–12 tuntia ja Midea-anturi porrastaa 0,5 °C:n välein. Suodatus, tuoreustarkistukset ja varalähteet olivat välttämättömiä ennen kuin ohjaukseen saattoi luottaa.
- **Rajapintojen kiintiöt ohjaavat arkkitehtuuria.** Viessmannin 1 450 kutsun vuorokausiraja ja Teslan maksulliset kutsut johtivat välimuistiin, muutoksiin perustuvaan kirjoittamiseen ja herätysten välttämiseen.
- **Laite voi toimia omin päin.** Tesla aloittaa latauksen kytkettäessä, ellei autossa ole omaa ajastusta. Vastaavasti laitteelta tehdyt käsinmuutokset on tunnistettava ja niitä on kunnioitettava.
- **Turvallisuus ensin.** Kova lattiaikkuna, turva-arvot, palautuspisteet ja hätäpysäytys tekivät live-ohjauksen käyttöönotosta hallittua.
- **Säästölukuun on suhtauduttava kriittisesti.** Vakiovertailun −12,7 % ja mitattu ajoitushyöty −5,1 % mittaavat eri asioita. Kummankin rajoitukset on syytä kertoa avoimesti. Vanha nimellistehoon perustuva suunnitelmamalli yliarvioi säästön selvästi.

10.2 Jatkokehitys

- **MPC käyttöön:** oppiva lämpömalli ei ole voittanut persistenssiä, joten MPC ei ole ohjannut. Varjotilassa odotettu säästö voidaan lokittaa ilman, että ohjausta vaihdetaan.
- **Lämpöpumpun sähkön mittaus:** virtuaalimittari on käytössä analytiikassa. Erillinen energiamittari tai laitteen oma kulutusdata tarkentaisi lämmityksen säästön mitatusti.
- **Kaistan parempi hyödyntäminen:** ylitykset (20 % varteista) viittaavat siihen, että aurinkokompensointia ja lämmityskäyrän viiveen ennakointia voi kiristää ja kalliina aikana voi laskea lähemmäs alarajaa. Mukautuva aamun esilämmitys on uusi, ja sen vaikutus nähdään vasta tulevina viikkoina.
- **Latausohjauksen todentaminen:** seurataan ajastusmuutoksen ja 70 %:n aamuminimin vaikutusta, kirjataan jokaisen istunnon syy (suunniteltu / heti / kertaluonteinen) ja täydennetään sessiohistorian aukot

tilanäytteistä.

- **Koneoppimisen jäännösmallit:** yhtenäinen varttiaineisto on kerätty taaksepäin vuodesta 2023 (yli 106 000 varttia). Gradienttitehostetut mallit (aurinko, lämpöpumpun sähkö, sisälämpö, käyttövesi) opetetaan vasta, kun aineistokynnykset täyttyvät, ja ne otetaan käyttöön vain, jos ne ovat fysiikkaa tarkempia. Opetus on nyt pois päältä; aurinkomallilla on jo riittävästi dataa, käyttövedellä osa ja lämmityksellä ei vielä (alle −10 °C:n jaksoja ei ole ollut).
- **Kodinkoneet päälle:** jääkaappi ja astianpesukone ovat valmiina. Vaikutus on pieni mutta lähes ilmainen.

10.3 Kotiakun arviointi

Kotiakun arvoa arvioitiin samalla datalla kuin muita tuloksia: 12 kuukauden toteutuneilla varttihinnoilla (1.11.2025–31.10.2026, tehollinen hinta aikasiirtoineen) ja talon mitatulla tuntikulutuksella. Laskelma on teoreettinen yläraja. Siinä on täydellinen ennakkotieto, 90 %:n kokonaishyötysuhde, ei akun ikääntymistä, ja purku rajataan talon mitattuun kulutukseen kunakin varttina (ei myyntiä verkkoon).

Akku	Menetelmä	Arvo / vuosi
10 kWh, 5 kW	Dynaaminen ohjelmointi, purku ≤ mitattu kulutus	202 €
5 kWh, 2,5 kW	Dynaaminen ohjelmointi, purku ≤ mitattu kulutus	148 €
10 kWh, 5 kW	Yksi sykli/vrk, halvimmat ja kalleimmat vartit, ei kulutusrajaa	323 € (karkea yläraja)

Taulukko 9. *Kotiakun teoreettinen arvo toteutuneilla hinnoilla ja mitatulla kulutuksella.*

Käytännön arvo jää näitä pienemmäksi. Ennusteet eivät ole täydellisiä, lämpöpumppu ja auto hyödyntävät jo osan samasta hintaerosta, ja kotiakun ja auton lataus kilpailevat samoista halvoista varteista. Esimerkiksi 202 €/v tarkoittaa noin 3 000 €:n kokonaiskertymää 15 vuodessa ilman korkoa ja akun ikääntymistä. Tämä on investoinnin yläraja, jonka alle akkujärjestelmän hinnan pitäisi asennettuna jäädä. Talon nykyisillä kuormilla kotiakku ei siis näytä kannattavalta pelkän hintaeron varassa. Arviota kannattaa päivittää, jos hintojen vaihtelu kasvaa, reservimarkkinoille osallistuminen tulee mahdolliseksi tai aurinkosähkön ylijäämää halutaan varastoida.

Liite: datan kattavuus ja puutteet

- **Lyhyt jakso:** live-ohjausta on takana 26 vuorokautta syksyllä. Talven pakkasjaksoja, kevään aurinkoa ja kesätilaa ei vielä ole datassa.
- **Oma Fortum** -data päättyi analyysihetkellä 13.11. iltapäivään (viive). Mitattu vertailu kattaa siksi 20.10.–12.11.2026.
- **Lämpöpumpun oma sähkönkulutus** ei ole saatavilla laitteen rajapinnasta (tehokenttä on tyhjä). Lämmityksen säästö on mallipohjainen; virtuaalimittari on käytössä vain analytiikassa.
- **MPC:** päätöslokissa ei ole MPC:n tuottamia asetuksia.
- **Wall Connector -sessiot:** osa tilanäytteissä näkyvistä yölatauksista (esim. 23.10., 27.10., 28.10., 1.11. ja 7.11.) puuttuu sessiohistoriasta, eikä 6.11. jälkeen ole sessioita, vaikka tilanäytteissä näkyy latauksia. Istuntojen syytä (suunniteltu tai käsin käynnistetty) ei tallenneta.
- **KOSTAL-data** on aukollinen ennen maaliskuuta 2026 (esim. touko–lokakuu 2024 ja 2025 puuttuvat). Omakäyttöanalyysi rajattiin siksi 3–10/2026.
- **Aamun mukavuustila** otettiin käyttöön 13.11. ja mukautuva esilämmitys 14.11.2026, eikä niistä ole vielä tulosdataa. Lattiapiirin 30 °C:n yläraja tuli 13.11.
- **Legionellajakso** on ohjelmassa, mutta ensimmäisen syklin tuloksia ei tässä raportissa vielä ole.
- **Keruuliuoksen mittaus** lämpölokiin alkoi 14.11.2026, joten tarkastelujakson COP-laskenta nojaa pääosin vuodenaikakäyrään ja mitattuun COP-tasoon.

- **Kodinkoneet** (jääkaappi, astianpesukone) ovat pois päältä, joten niistä ei ole dataa.
- **Sisälämmön testilukema** 22.10. (10 varttia) on poistettu mukavuusanalyysistä.