OSARAPORTTI – TYÖPAKETTI 2

# JOUSTAVAT SÄHKÖKATTILAT OSANA TULEVAISUUDEN ENERGIAJÄRJESTELMÄÄ

LUT University

ETELÄ-KARJALAN LIITTO

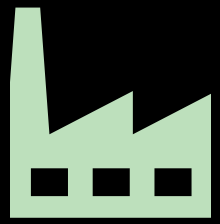
Euroopan unionin osarahoittama

# TP2: SÄHKÖKATTILOIDEN INTEGROINTI SÄHKÖMARKKINOIHIN

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT

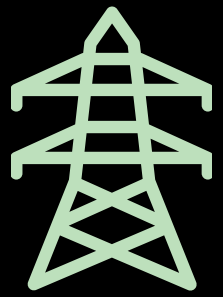
Milja Nylund, 2026

# TYÖPAKETIN TAUSTA JA MOTIVAATIO



## Kaukolämmön tuotannon sähköistyminen

Suomen hiilineutraaliustavoite vuodelle 2035 vauhdittaa siirtymää polttoon perustuvasta lämmöntuotannosta sähköisiin ratkaisuihin



## Sähkömarkkinoiden hintavaihtelut

Uusiutuvan sähköntuotannon lisääntyminen kasvattaa joustavuuden tarvetta ja tarjoaa mahdollisuuksia edulliseen sähkönhankintaan



## Sähkökattiloiden joustavuus

Nopea tehonsäätö mahdollistaa sähkönkulutuksen mukauttamisen markkinahintoihin sekä osallistumisen reservimarkkinoille



## Sähkökattiloiden nopea yleistyminen

Vuonna 2023 sähkökattiloilla tuotettiin lämpöä 746 GWh, kun vuonna 2025 sähkökattiloilla tuotettiin lämpöä jo 2584 GWh

# TYÖPAKETIN TAVOITTEET JA TUTKIMUSKYSYMYKSET

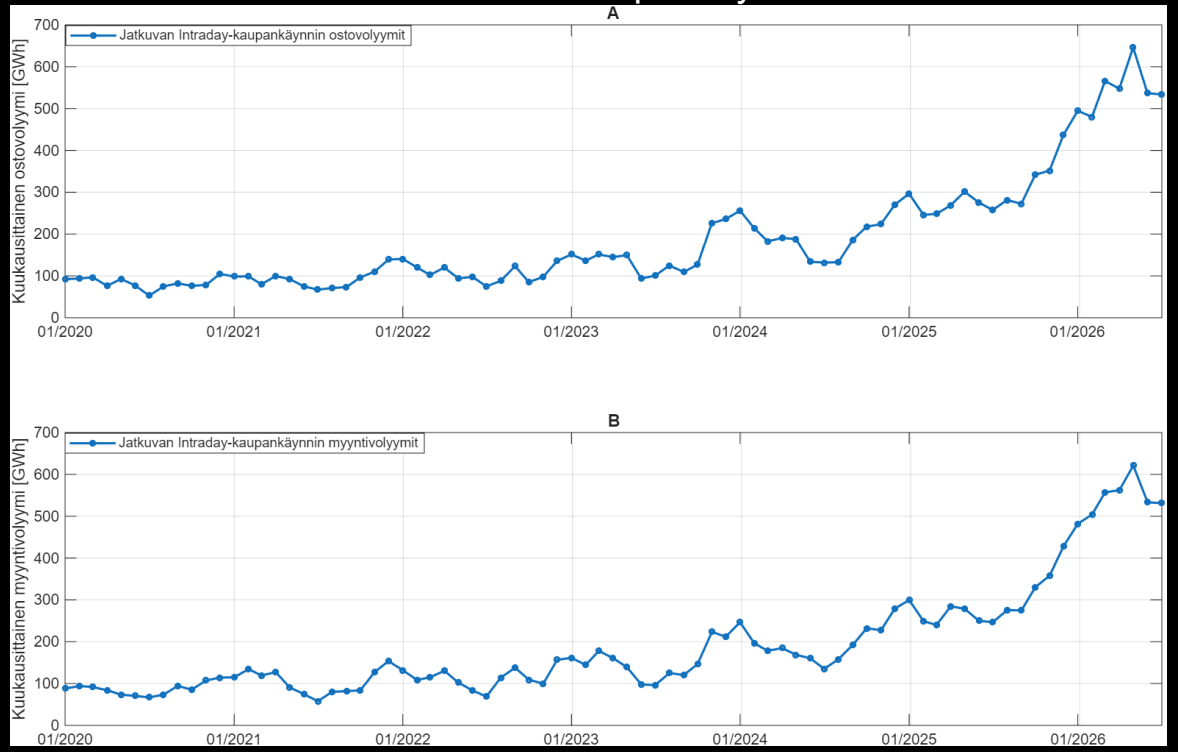
- Työpaketin tavoitteena oli selvittää, mikä on sähkökattiloiden hyödyntämispotentiaali osana kaukolämmön tuotantoa ja selvittää niiden rooli sähkö- ja kaukolämpöjärjestelmien välisessä vuorovaikutuksessa.
- Tutkimuskysymykset
  - Millaisia hyötyjä sähkökattiloiden integrointi eri markkinapaikoille tuo kaukolämmön tuotannolle?
  - Miten eri markkinapaikkojen hyödyntäminen vaikuttaa sähkökattiloiden käyttöön ja kannattavuuteen?
  - Millaisia vaikutuksia sähkökattiloiden hyödyntämisellä on kaukolämpöjärjestelmien toimintaan? Case: Etelä-Karjala

# INTRADAY KAUPANKÄYNTIVOLYYMIT

Huutokauppakierrokset



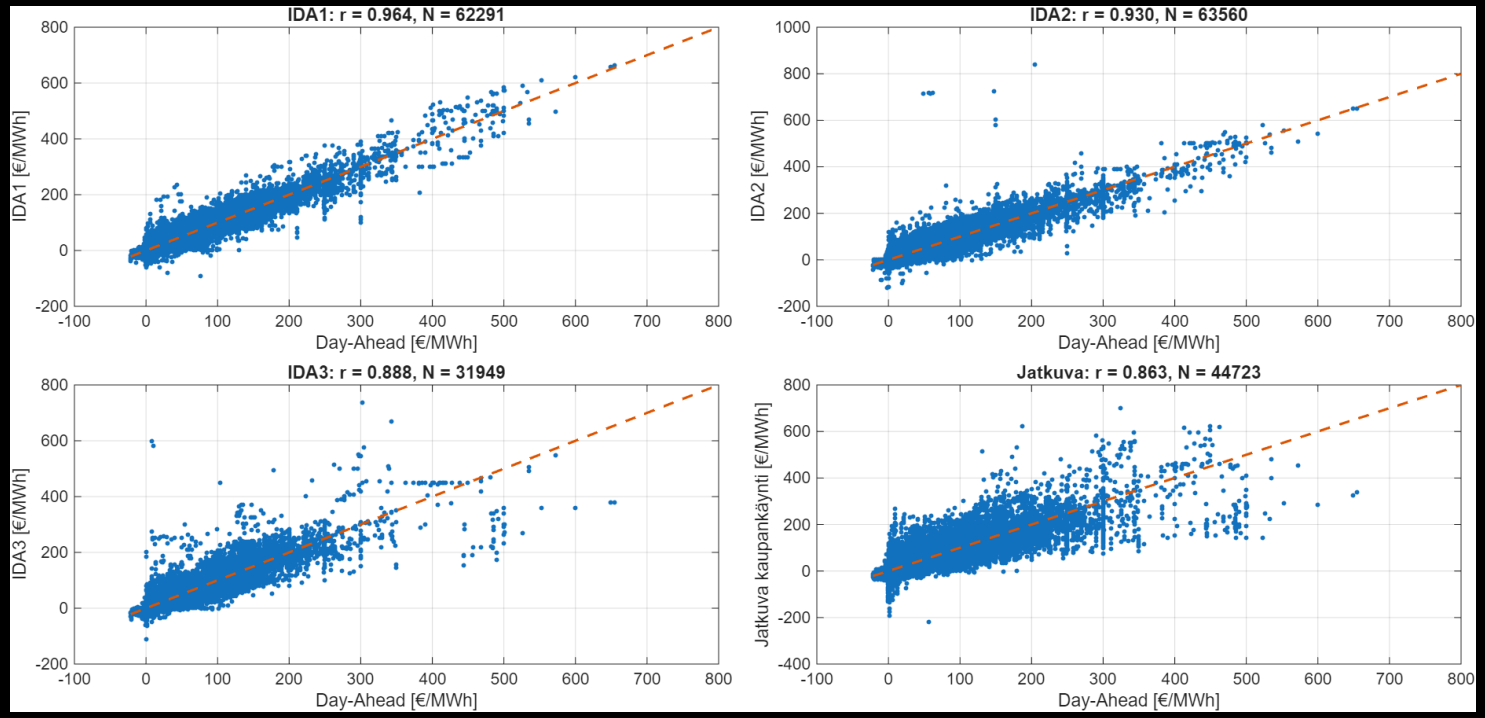

Jatkuva kaupankäynti




Kaupankäynti painottuu selvästi edelleen jatkuvaan Intraday-kaupankäyntiin, jossa kuukausittaiset osto- ja myyntivolyymit ovat huomattavasti IDA-huuto-kauppojen volyymeja suurempia. Molemmissa markkina-paikoissa havaittavissa kasvua DA-markkinan varttihinnoitteluun siirtymisen jälkeen.

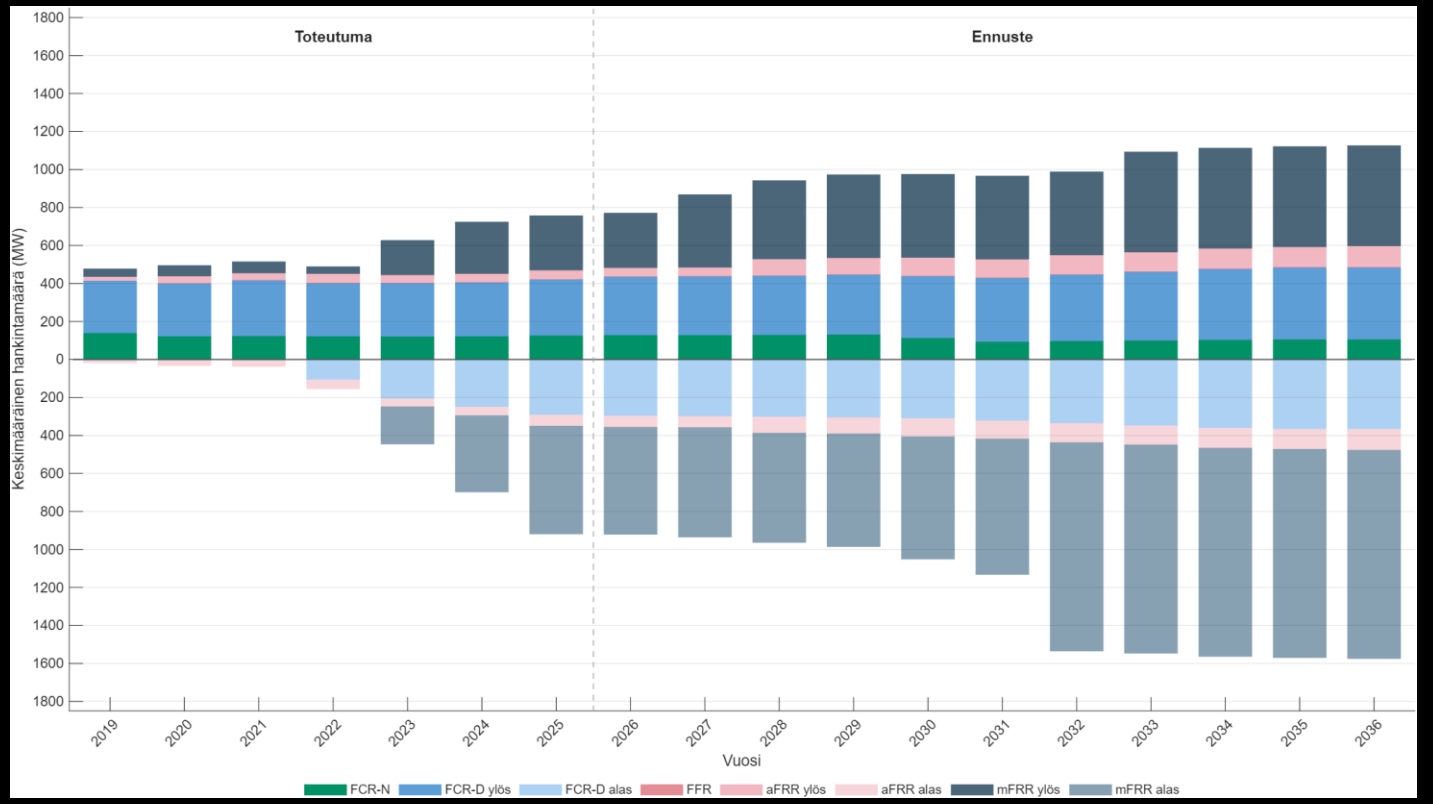
# DAY-AHEAD-MARKKINAHINTOJEN JA INTRADAY-MARKKINAHINTOJEN VÄLINEN KORRELAATIO

- Day-ahead-markkinahintojen ja intraday-markkinahintojen välillä on vahva positiivinen korrelaatio.
- Vahvin positiivinen korrelaatio on kaupankäyntikierroksilla IDA1 & IDA2
- IDA3 & jatkuvan kaupankäynnin yhteys day-ahead-hintoihin on hieman heikompi.
  - Kaupankäyntiasettuu lähemmäksi toimitusajankohtaa, jolloin markkinatoimijoilla on käytettävissään ajan-kohtaisempaa tietoa sähköjärjestelmän tilanteesta. Tällöin intraday-hintoihin voi heijastua toimitushetkeen koskevia muutoksia, joita ei vielä ollut tiedossa day-ahead-markkinan hinnanmuodostuksen aikana.



# SÄHKÖKATTILAT RESERVIMARKKINOILLA

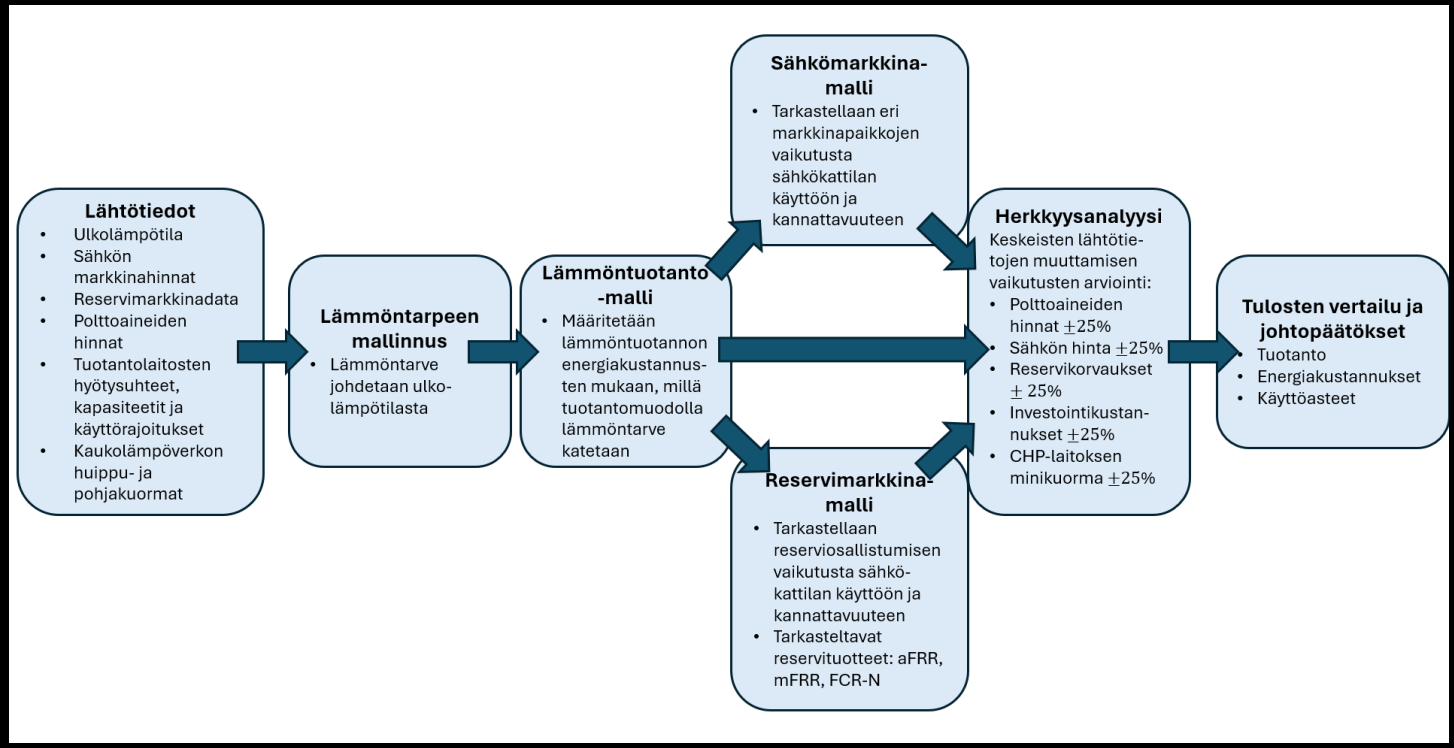
- Sähkökattilat sopivat reservimarkkinoille nopean tehonsäädön ansiosta
- Uusiutuvan sähköntuotannon kasvu lisää säätö- ja joustotarvetta
- Sähkökattilat voivat tarjota ylös- ja alassäätöä
- Reservikapasiteetin tarpeen arvioidaan kasvavan tulevaisuudessa, erityisesti mFRR-alassäädön
- Kaukolämpötoimijoiden on mahdollista saada lisätuloja reserviosallistumisesta




Reservikapasiteetin toteutuneet ja ennustetut hankintamäärät reservituotteittain.

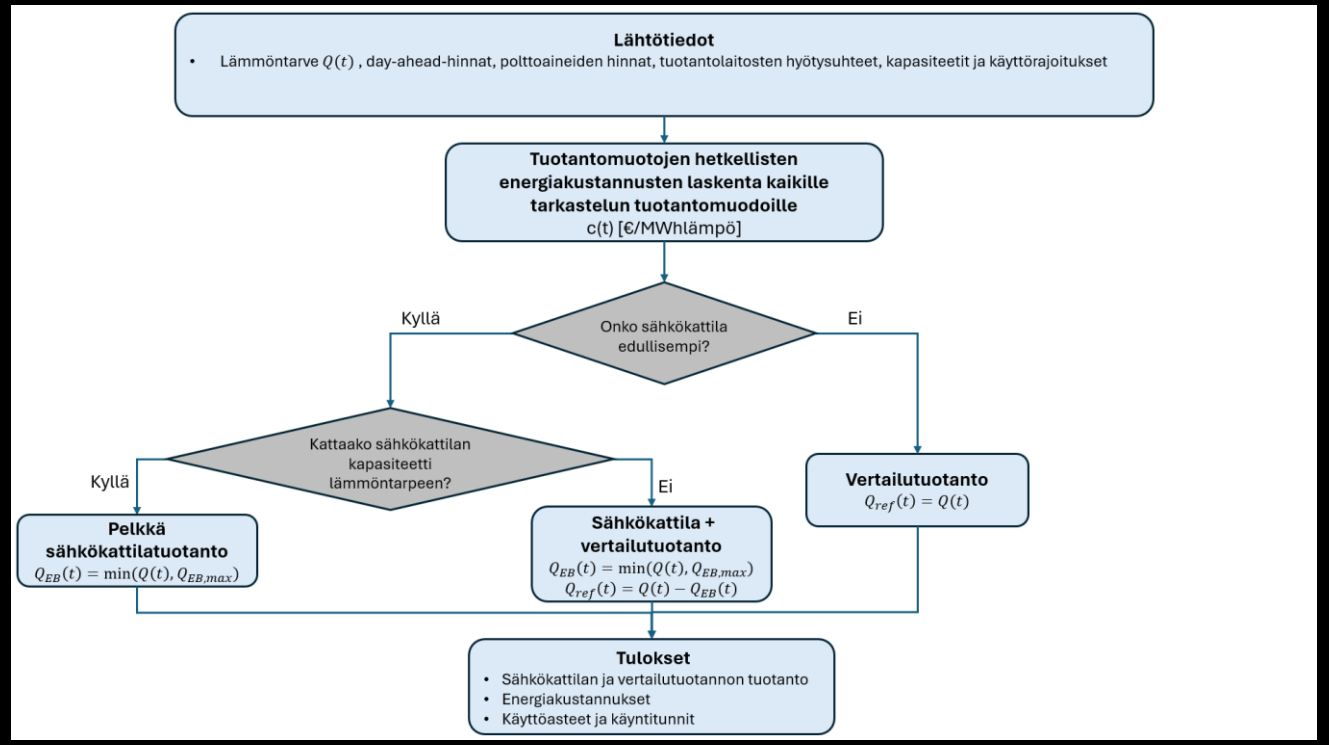
# MALLINNUSMENETELMÄT

- Aineisto:
  - Nord Pool: Day-ahead- ja intraday-markkinahinnat
  - Fingrid Avoin Data: aFRR-, mFRR-, ja FCR-N kapasiteettihinnat + aFRR- ja mFRR-aktivointihinnat
  - Ilmatieteen laitos: Ulkolämpötila
- Tarkastelujakso 13.6.2024-22.4.2026, tulokset vuodelta 2025



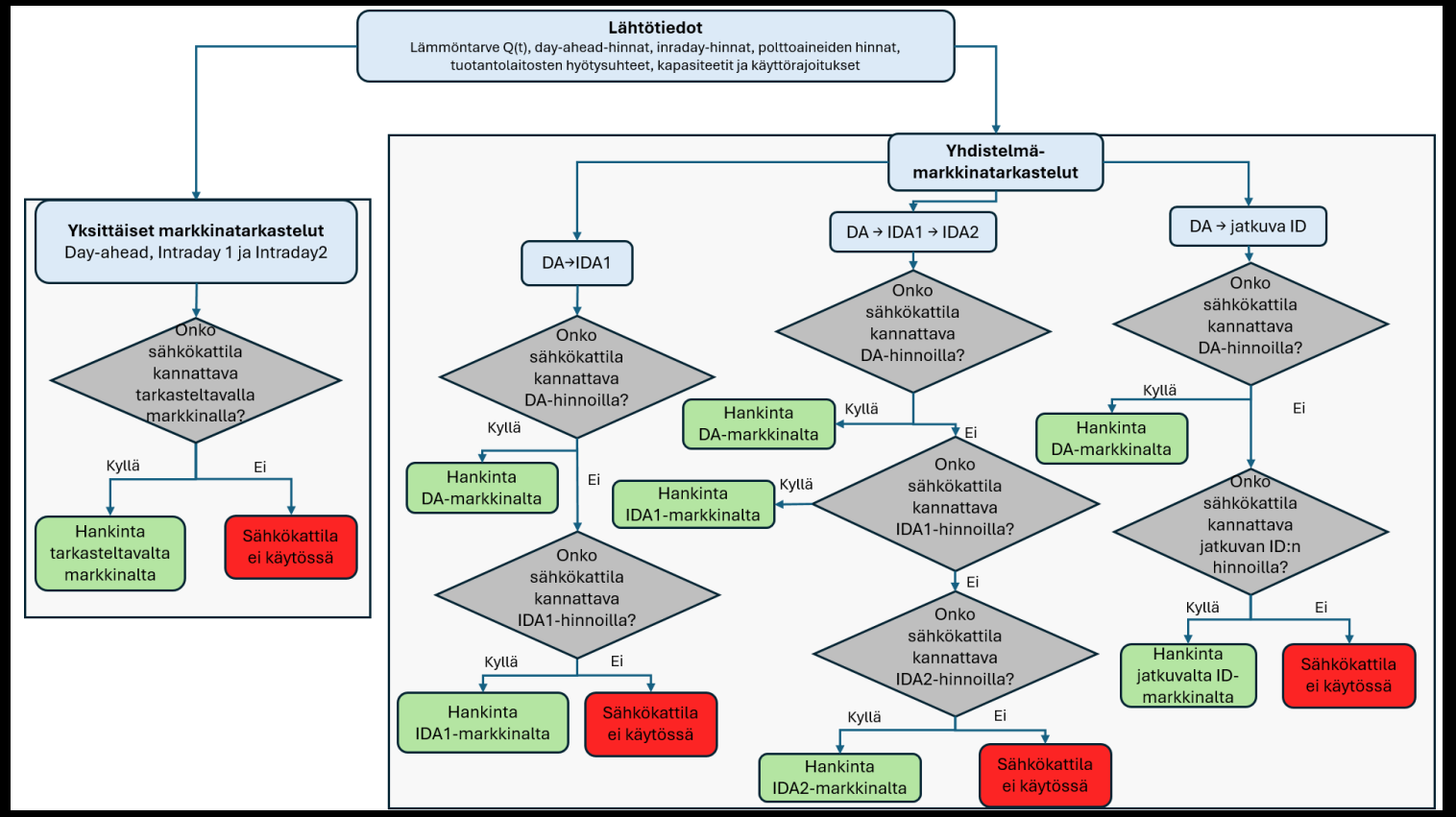
# LÄMMÖNTUOTANTOMALLI

- Mallissa verrataan eri tuotantomuojen hetkellisiä energiakustannuksia, ja alhaisimman energiakustannuksen omaavaa tuotantoa käytetään ensisijaisesti
- Lämmöntarve tulee täyttää jokaisella aika-askeleella
- CHP-laitoksen sähköntuotannon myynti otetaan huomioon vähentämällä siitä saadut nettotulot energiakustannuksista



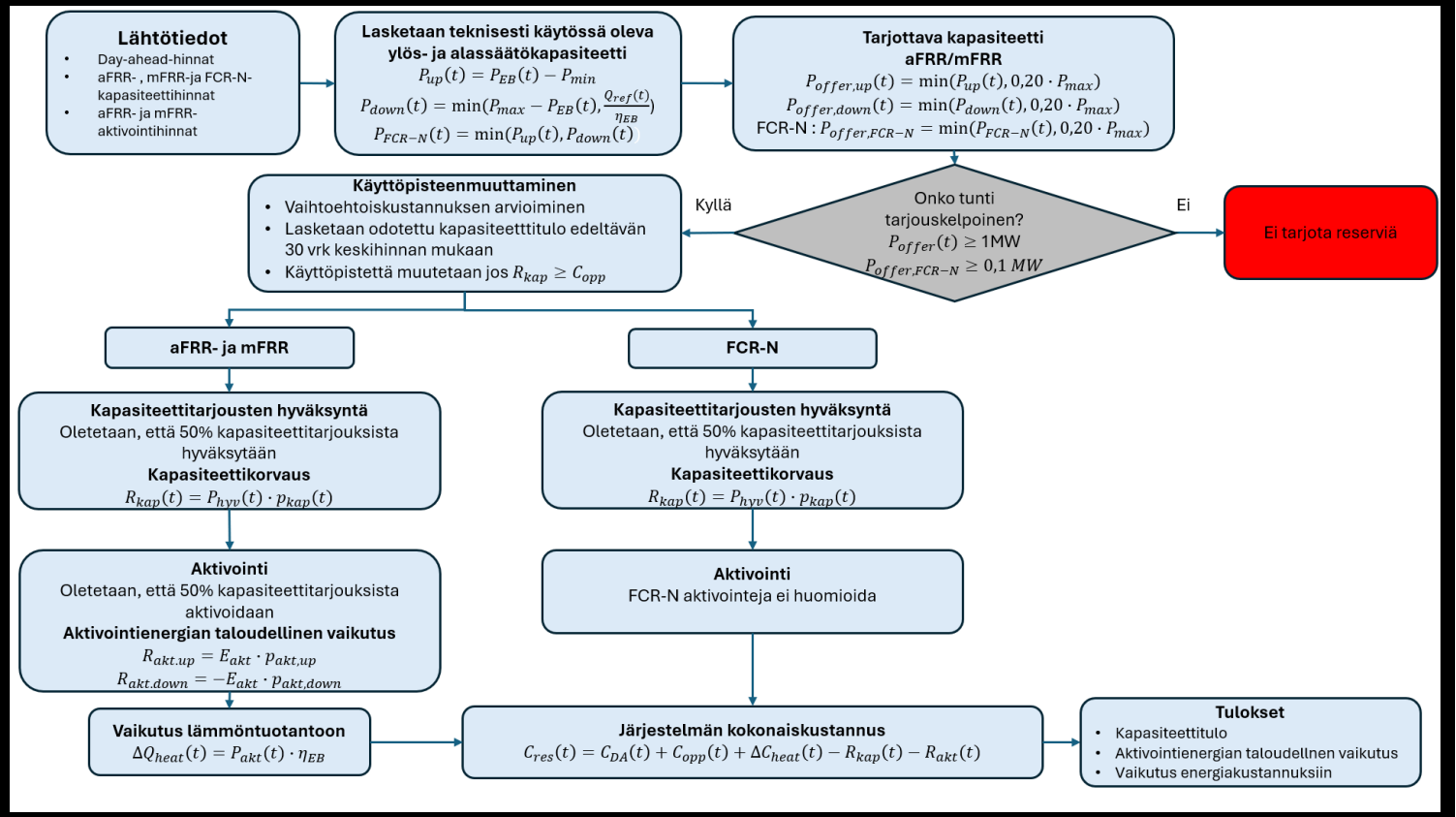
# SÄHKÖMARKKINAMALLI

- Tarkoituksena oli verrata sähkökattilan käyttöä eri markkinapaikoilla ja selvittää, voiko eri markkinapaikkoja hyödyntämällä saada enemmän kannattavia käyttöajankohtia
- Tarkasteltavat markkinapaikat:
  - Day-ahead (DA)
  - Intraday-huutokaupat 1 & 2 (IDA1 & IDA2)
  - Jatkuva intraday kaupankäynti (ID)

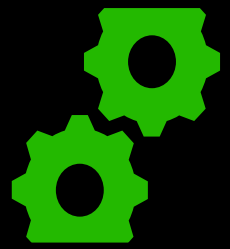


# RESERVIMARKKINAMALLI

- Tarkoituksena oli selvittää sähkökattilan osallistumista reservimarkkinoille sen normaalin ajon puitteissa
- Tarkasteltavat reservituotteet:
  - aFRR, mFRR
  - FCR-N
- Kyseiset tuotteet valittiin, koska suurinosa kattiloista pystyvät teknisin osin osallistumaan näille markkinoille



# LÄHTÖTIEDOT



## Yleinen malli

- Huippukuorma: 80 MW
- Sähkökattila 25 MW, vertailuina 2x40 MW ja 1x40MW
- Vertailutuotantomuodot: biokattila, CHP-laitos (bio) ja öljykattila



## Tapaus A: Simpele

- Huippukuorma 7 MW
- Vertailutuotanto: biokattilalla tuotettu ostolämpö
- Sähkökattilakapasiteetti vertailu 0-7 MW
- Investointikustannus: 0,15 M€/MW, 25a, 6%



## Tapaus B: Lappeenranta

- Huippukuorma 220 MW
- Tuotantomuodot: CHP-laitos (bio) 140 MW, sähkökattila 38 MW, kaukolämpöakku 40 MW, kaasukattilat 250 MW ja pellettikattilat 14 MW
- Sähkökattilakapasiteettivertailu 20-100 MW

Investointikustannus: 0,07 M€/MW, 25 a, 6%

# MIKSI LAPPEENRANTA & SIMPELE

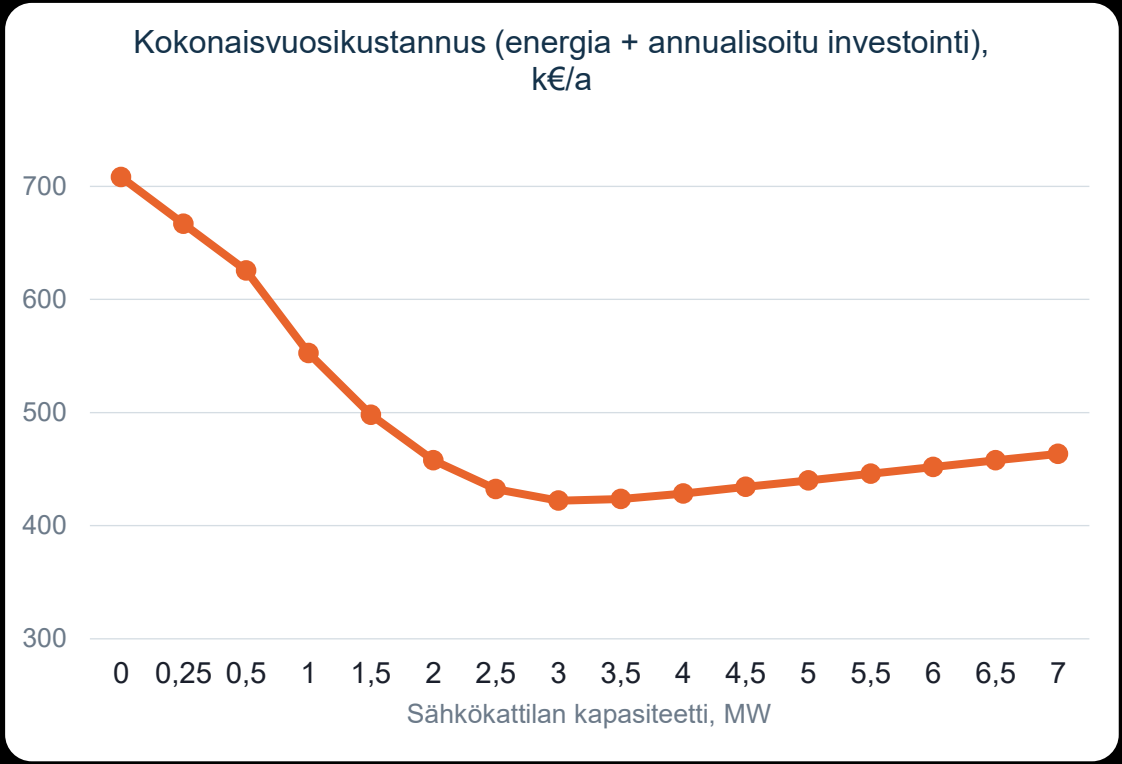
- Suurin osa suomalaisista kaukolämpöyhtiöistä on pieniä tai keskikokoisia
- Simpeleen kaukolämpöjärjestelmä on pieni huipputeholtaan 7 MW ja sillä on yksinkertainen tuotantorakenne
- Lappeenranta edustaa keskikokoista kaukolämpöverkkoa, jonka huipputeho 220 MW ja lämmöntuotanto rakentuu useista tuotantomuodoista
  - Lappeenrannassa on myös kaukolämpöakku
- Kaksi keskenään merkittävästi erilaista kaukolämpöjärjestelmää mahdollistavat arvioinnin, miten järjestelmän koko ja tuotantorakenne vaikuttavat sähkökattilan hyödyntämismahdollisuuksiin.

# SÄHKÖKATTILA PIENENTÄÄ ENERGIAKUSTANNUSIA

| Lämmöntuotanto-skenaario | Sähkökattila-tuotanto [GWh] | Vertailu-tuotanto [GWh] | Energia-kustannus [M€] | Sähkökattilan käyttöaste [%] |
|---|---|---|---|---|
| Pelkkä biokattila | – | 205,5 | 8,91 | – |
| 25 MW EB + biokattila | 108,0 | 97,5 | 5,40 | 50,3 |
| 2 × 40 MW EB + biokattila | 127,6 | 77,9 | 4,81 | 18,6 |
| Pelkkä CHP-laitos | – | 205,5 | 8,79 | – |
| 25 MW EB + CHP-laitos | 108,6 | 96,9 | 3,44 | 50,6 |
| 2 × 40 MW EB + CHP-laitos | 128,4 | 77,1 | 2,54 | 18,7 |
| Pelkkä öljykattila | – | 205,5 | 28,32 | – |
| 25 MW EB + öljykattila | 155,9 | 49,6 | 12,02 | 72,7 |
| 2 × 40 MW EB + öljykattila | 190,2 | 15,4 | 8,86 | 27,7 |
| 2 × 40 MW EB | 205,5 | – | 9,62 | 29,3 |

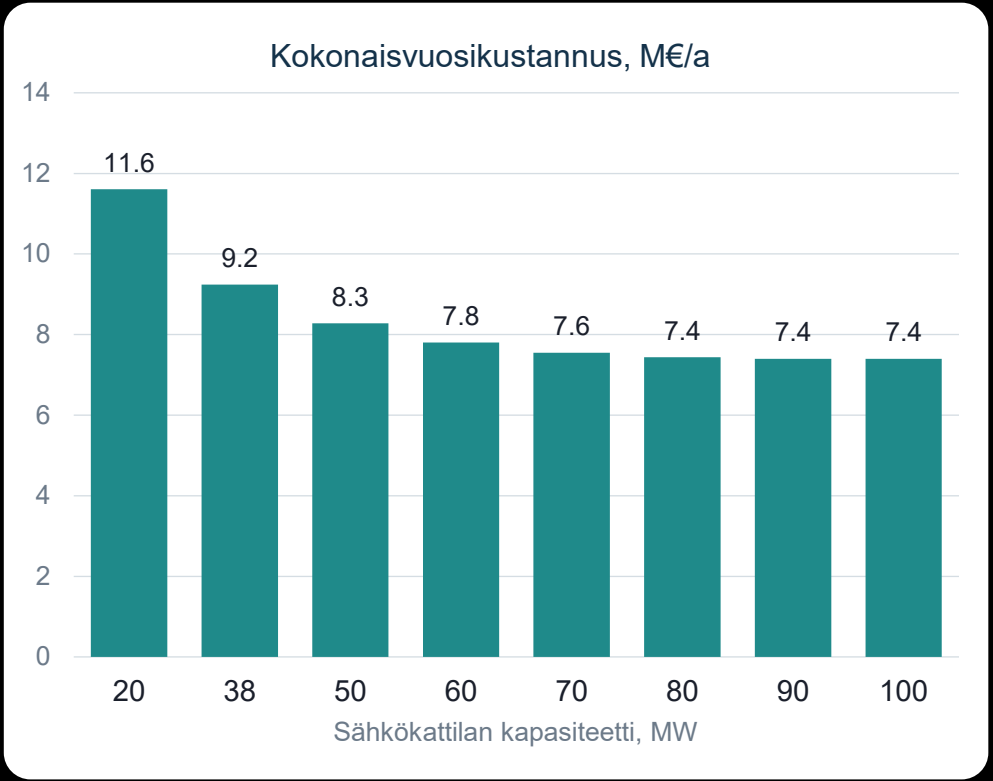
- Säästö 25 MW sähkökattilalla:
  - - 39% biokattila
  - - 61% CHP-laitos
  - -58% öljykattila
- Ratkaisevaa ei ole sähkön absoluuttinen hinta vaan sen suhde korvattavan lämmöntuotannon kustannukseen
- Sähkökattilakapasiteetin lisääminen lisäsi tuotantoa vain noin 18% biokattilan ja CHP-laitoksen tapauksissa, ja käyttöaste laski 19%:iin

# SIMPELE: KUSTANNUSOPTIMI JO 3 MW:N KATTILALLA



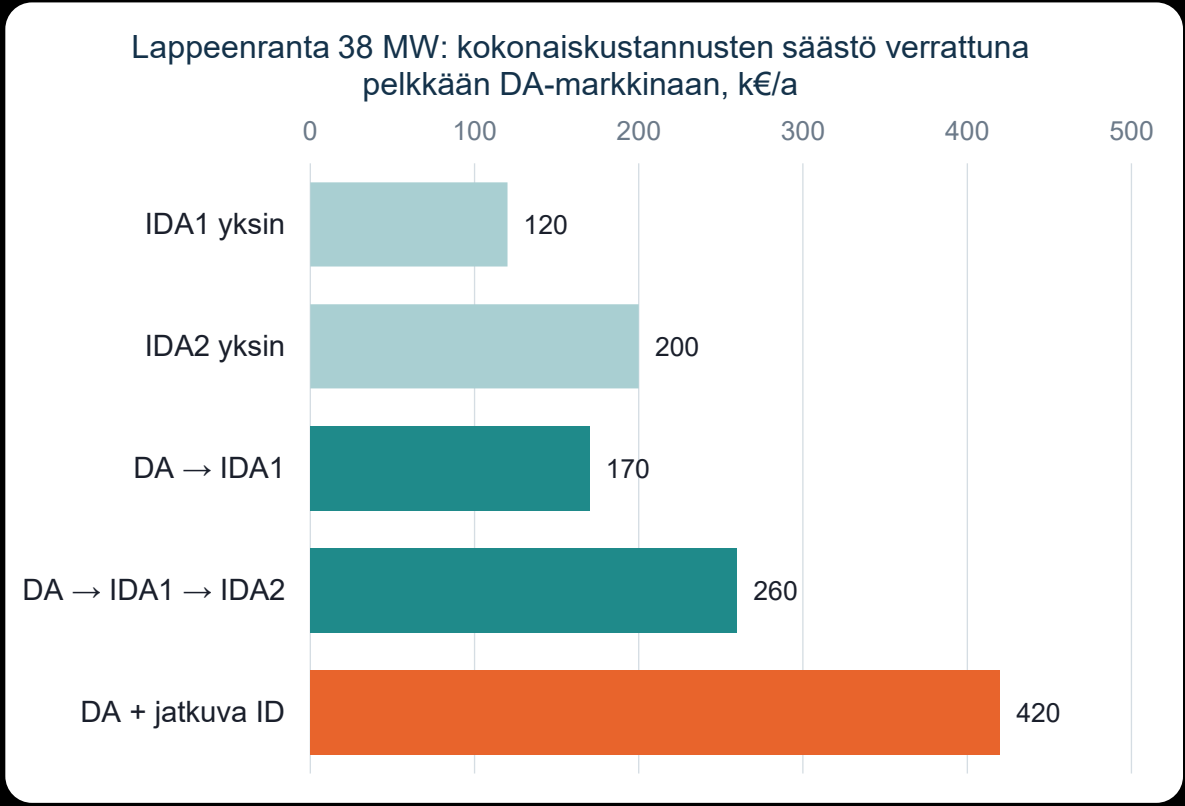

- Kokonaiskustannukset ilman sähkökattilaa 708k€/a -> 3 MW sähkökattilalla voidaan tiputtaa kustannuksia noin 40 %
- Kattilakapasiteetin kasvattaminen ei lisää tuotantoa enää 4 MW jälkeen (kun kattilaa ajetaan markkinaehtoisesti)
- 4 MW sähkökattilan tuotanto 10,2 GWh ja takaisinmaksuaika 1,8 a

# LAPPEENRANTA



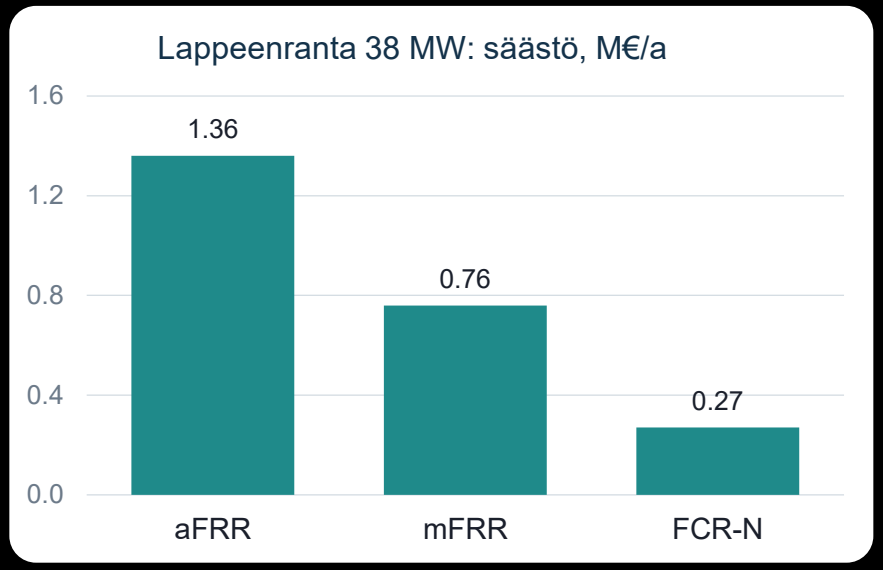

- Nykyinen 38 MW sähkökattila: tuotanto 160 GWh, kokonaisvuosikustannus 9,2 M€, ja käyttöaste 48%
- Lisäkapasiteetin tuoma lisähyöty pienee myös sähkökattilan kapasiteetin kasvaessa
- Lämpöakun käyttö kasvaa myös kattilakapasiteetin kasvaessa

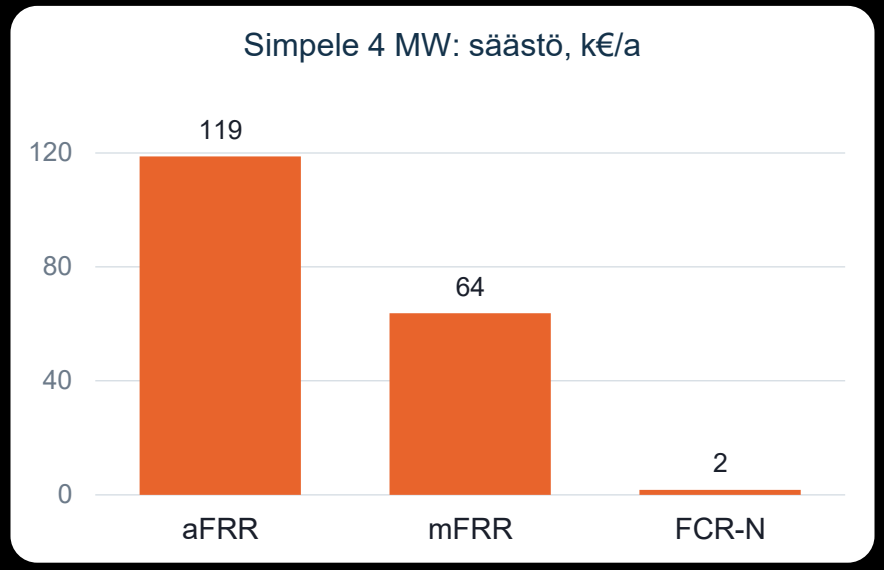
# PÄIVÄNSISÄISET MARKKINAT VOIVAT TOIMIA VUOROKAISIMARKKINOITA TÄYDENTÄVÄNÄ MAHDOLLISUUTENA




- DA-markkinoiden vaihtaminen yksittäisiin IDA-huutokauppoihin alentaa kustannuksia, mutta myös sähkökattilan kannattavia käyttöajankohtia
- DA-markkinan täydentäminen ID/IDA-markkinoilla lisää kannattavia käyttöajankohtia ja pienentää kustannuksia
- Jatkuvalta ID-markkinalta saatiin parhaimmat hyödyt:
  - Lappeenrannassa lämmöntuotantoon +13,7 GWh lisää ja säästöt 420k€/a
  - Simpeleellä kustannussäästöt 24k€/a

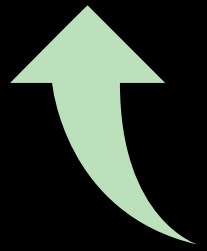
# RESERVIMARKKINOISTA AFRR TUO SUURIMMAT SÄÄSTÖT KOKONAISKUSTANNUKSIIN



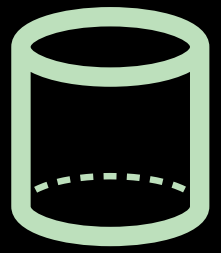

- FCR-N-hyödyt jää pieniksi, aktivointeja ei mallinnettu
- Takaisinmaksuaikaa on mahdollista pienentää reserviosallistumisella esim. Simpele ilman reservejä 1,84 a, aFRR osallistumisella 1,35 a tai mFRR osallistumisella 1,54
- Reserviosallistuminen ei merkittävästi pienentänyt kuitenkaan sähkökattilalla tuotetun lämmön määrää esim. Simpele pelkkä DA 10,16 GWh -> DA+aFRR 9,63GWh, Lappeenranta pelkkä DA 160,40 Gwh -> DA+ aFRR 158,58 GWh

# RESERVIEN HYÖTY RIIPPUU KAUKOLÄMPÖJÄRJESTELMÄSTÄ



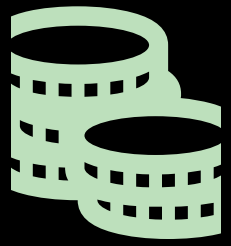
## Ylössäätöä selvästi enemmän kuin alassäätöä

Alassäätö vaatii vapaata lämpötehoa ja kuormaa



## Lämpövarasto avaa alassäädön

Lappeenrannassa (akku 40 MW) alassäätöön soveltui 4790 h, kun taas Simpeleellä 2624 h. Varasto irrottaa tuotannon hetkellisestä kulutuksesta



## Ylimitoitus ei kasvata reservituloja

Simpeleellä sähkökattilan kapasiteetin nostaminen 4 MW:sta 7 MW:iin reservitulot pysyi lähes ennallaan. Ratkaisevaa on säätöön vapaa kapasiteetti ja lämmöntarve on rajoittava tekijä

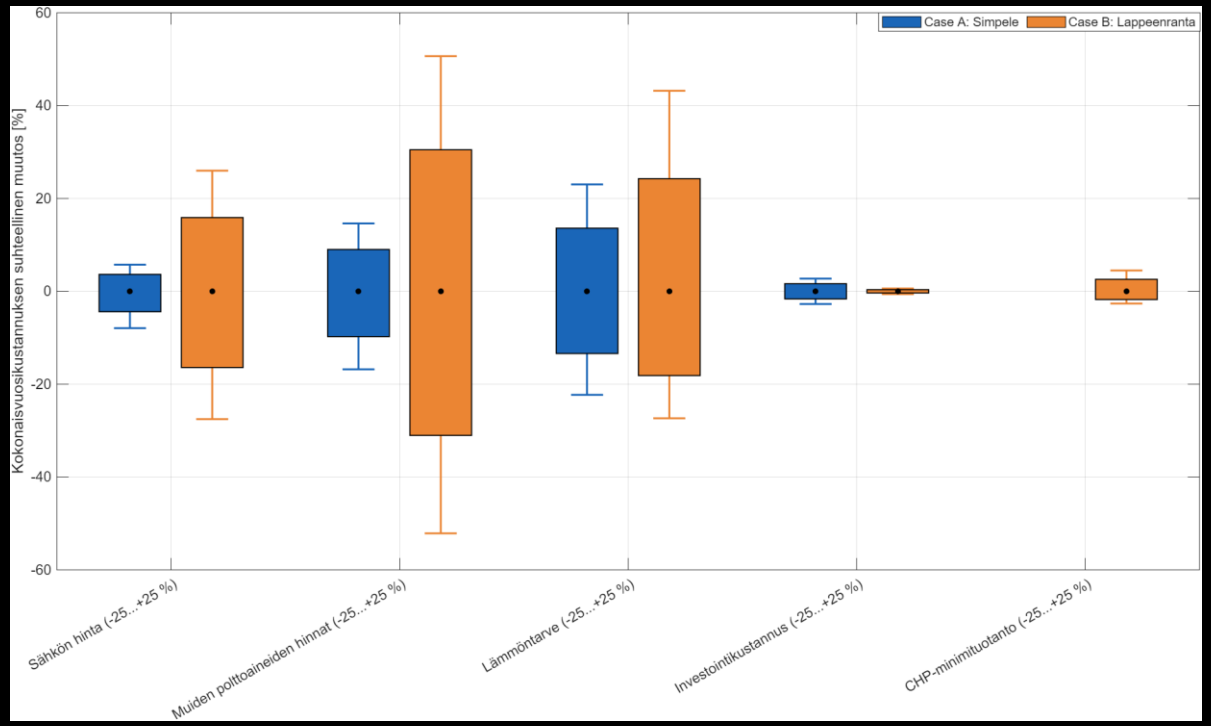


## Kallis korvaava tuotanto syö korvauksista saatavat hyödyt

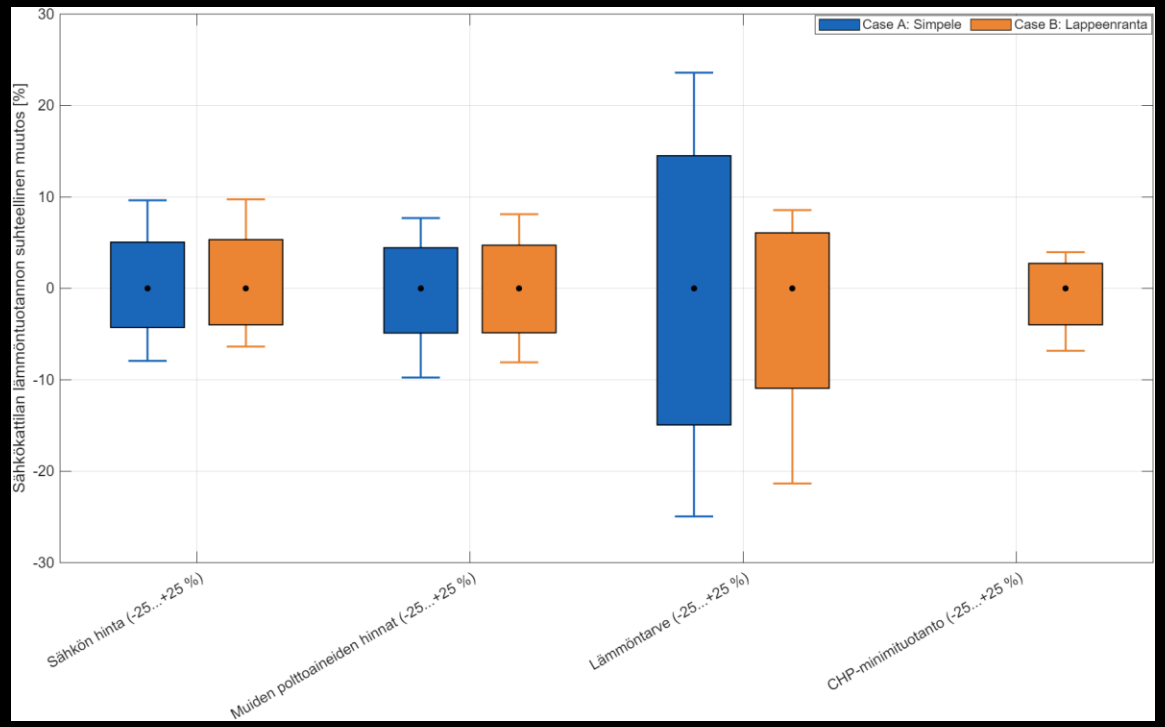
Esimerkiksi öljykattilaan verrattaessa aFRR osallistuminen nosti energiakustannusta 12,02 -> 12,09 M€, koska ylössäädössä menetetty lämpö tulee korvata kalliilla öljyllä

# HERKKYYSANALYYSI: LÄMMÖNTUOTANTO

Vaikutukset lämmöntuotannon kokonaisvuosikustannuksiin



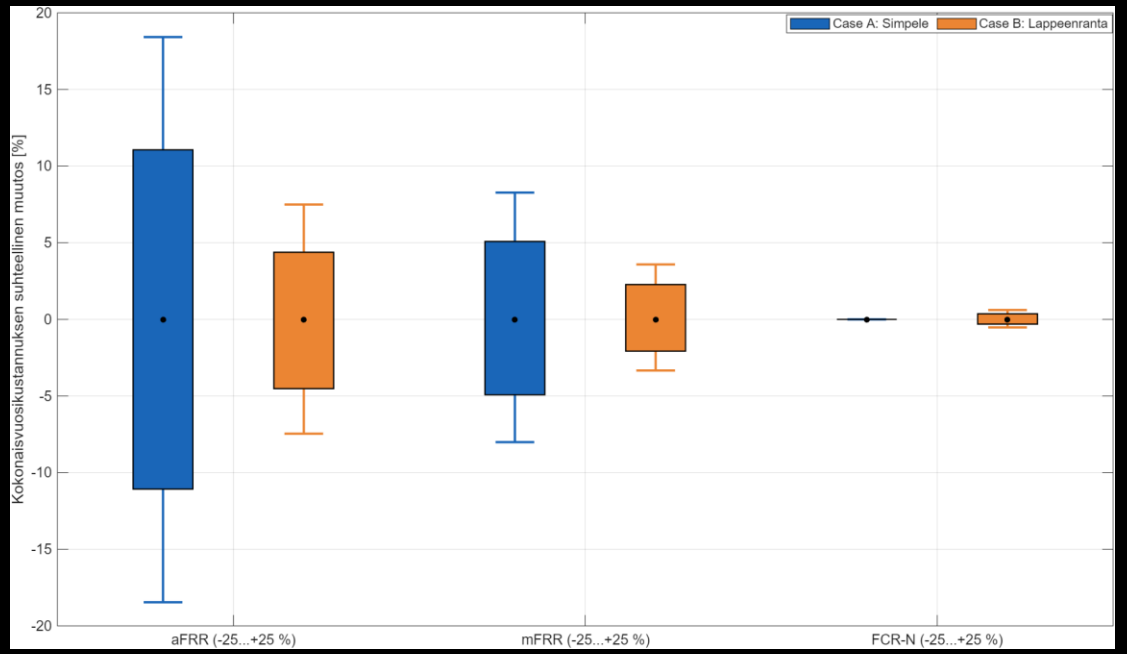

Vaikutukset sähkökattilan lämmöntuotantoon



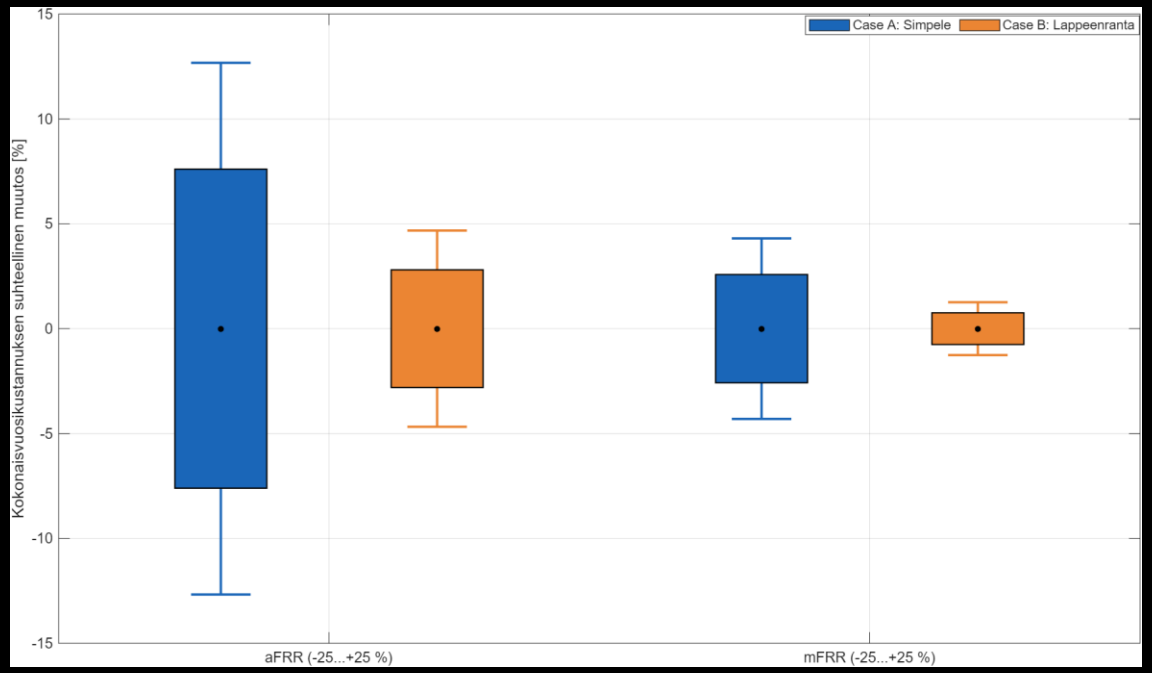

- Polttoaineiden hinnat ja lämmöntarve aiheuttivat suurimmat kustannusmuutokset molemmissatapauksissa
- Lämmöntarve rajoittaa Simpelettä enemmän -> kattilatuotanto reagoi lämmöntarpeeseen herkemmin pienemmässä kaukolämpöverkossa
- Lappeenrannassa muiden polttoaineiden hintojen muutokset vaikuttaa paljon, koska lämmöntarve on isompi sen kattamiseen tarvitaan muutakin tuotantoa kuin sähkökattilan tuotanto
- Investointikustannusten nousu vaikuttaa vain vähän eli energiakustannukset on hallitseva tekijä

# HERKKYYSANALYYSI: RESERVIT

Hyväksyntäaste




Aktivointiaste




- Reserveistä saataviin hyötyihin vaikuttaa merkittävästi se kuinka monet tarjoukset hyväksytään ja aktivoidaan
- Kapasiteetti- ja aktivointikorvausten muutosten vaikutukset jäivät vähäisimmiksi, mutta aktivointikorvauksen vaikutus oli kapasiteettikorvausta isompi

# ARVIOINTIKEHIKKO

| Tarkasteltava tekijä | Hyödyntämiselle edullinen olosuhde | Hyödyntämistä rajoittava olosuhde | Arvioinnissa tarkasteltava asia |
|---|---|---|---|
| Korvattavan lämmöntuotannon kustannus | Kallis korvattava lämmöntuotanto | Edullinen korvattava lämmöntuotanto | Sähkökattilan kannattava sähkön hintaraja |
| Kaukolämmön lämpökuorma | Riittävä lämmöntarve suuren osan vuodesta | Pieni lämpökuorma erityisesti kesällä | Lämpökuorman pysyvyys ja ajallinen vaihtelu |
| Sähkökattilan mitoitus | Kapasiteetti on suhteutettu lämmöntarpeeseen ja saa-vutettaviin kustannussäästöihin | Sähkökattilan ylimitoittamisen tuottamat hyödyt jää vähäiseksi suhteessa investointi-kustannuksiin | Kapasiteetin vaikutus tuotantoon, käyttöasteeseen ja kokonaiskustannuksiin |
| Sähkön hinnan vaihtelu | Edullisten hintojen ajoittuminen suuren lämmöntarpeen hetkiin | Korkeat hinnat suuren lämmöntarpeen aikana | Kannattavien käyttöajankohtien määrä ja ajoittuminen |
| Lämmön varastointi | Mahdollistaa lämmöntuotannon ajallisen siirtämisen | Tuotanto riippuu hetkellisestä lämmöntarpeesta | Lämpövaraston kapasiteetti ja käytettävyys |
| Päivänsisäisten markkinoiden hyödyntäminen | Tuotantosuunnitelmaa voidaan muuttaa joustavasti | Tuotannon muuttamista rajoittavat tekniset tekijät | Eri sähkömarkkinapaikkojen yhdistämisestä saatavat hyödyt |
| Reservimarkkinoille osallistuminen | Sähkökattilalla on käytettävissä säätökapasiteettia | Kattilan käyttötila tai lämpökuorma rajoittaa säätöä | Ylös- ja alassäätöön soveltuvat tunnit sekä reservitulot |
| Sähköverkon liityntäkapasiteetti | Olemassa oleva liittymä mahdollistaa suunnitellun sähkökattilatehon | Liittymäkapasiteetti ei riitä tai verkon vahvistaminen aiheuttaa merkittävät kustannukset | Käytettävissä oleva liittymäteho, vahvistamistarve ja liittymäkustannukset |

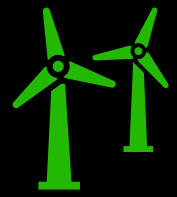
# RISKIT JA EPÄVARMUUDET



## Sähkön hintakehitys

Kulutus kasvaa (datakeskukset, teollisuus), mutta myös tuulivoiman lisääntyminen voi lisätä alhaisia sähkönhintoja. Olennaista on alhaisten hintojen ajoitus suhteessa lämmöntarpeeseen.

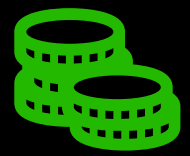
Vuosi 2025 oli mittaushistorian toiseksi lämpimin vuosi ja DA-hinnat matalammat kuin vuosina 2022–2024 tai 2026. Joten vuonna 2025 olosuhteet on sähkön hintojen puolesta olleet otolliset sähkökattiloille, mutta alhaisempi lämmitystarve on voinut osaltaan rajoittaa käyttöä.



## Intraday-likviditeetti

Intraday-markkinoiden merkitys voi kasvaa sääriippuvaisen sähköntuotannon lisääntyessä, sillä tuotantoennusteiden tarkentuminen lähellä toimitusajankohtaa lisää kaupankäynnin tarvetta. Lisäksi tuulivoiman tuotantoennusteiden virheiden ja intraday-hintojen välinen negatiivinen korrelaatio voi voimistua tuulivoimakapasiteetin kasvaessa.

Huutokauppojen volyymit ovat pieniä; suuren kattilan koko ostotarve ei välttämättä toteudu halutulla hinnalla.



## Reservihinnat ja verkkoliityntä

Reservimarkkinoille osallistumisen kannattavuuteen liittyy epävarmuuksia erityisesti reservihintojen ja -tulojen kehityksen osalta. Reserviresurssien tarjonnan kasvu voi laskea kapasiteettikorvauksia hankintamäärien kasvusta huolimatta, mikä heikentää sähkökattiloiden osallistumisen kannattavuutta erityisesti silloin, kun reservin tarjoaminen edellyttää käyttötehon muuttamista. Reservienergiamarkkinoiden kehitys voi kuitenkin poiketa kapasiteettimarkkinoista, jolloin aktivointitulot voivat säilyä merkittävänä tulonlähteenä.

# JOHTOPÄÄTÖKSET

- Sähkökattila mahdollistaa lämmöntuotantokustannusten pienentämisen ja jouston lisäämisen sähkö- ja kaukolämpöjärjestelmien välille
- Vuorokausimarkkinoita kannattaa täydentää päivänsisäisillä markkinoilla, jatkuvan intraday-kaupankäynnin hyödyntäminen toi parhaimman hyödyn
- aFRR- ja mFRR-markkinoille osallistuminen voi tuoda lisätuloja kaukolämpötoimijalle, mutta reserviosallistumisessa tulee huomioida, millä tuotantomuodoilla mahdollinen sähkökattilan tuotannon puute korvataan ja onko alassäätöön tarpeeksi lämpökuormaa