

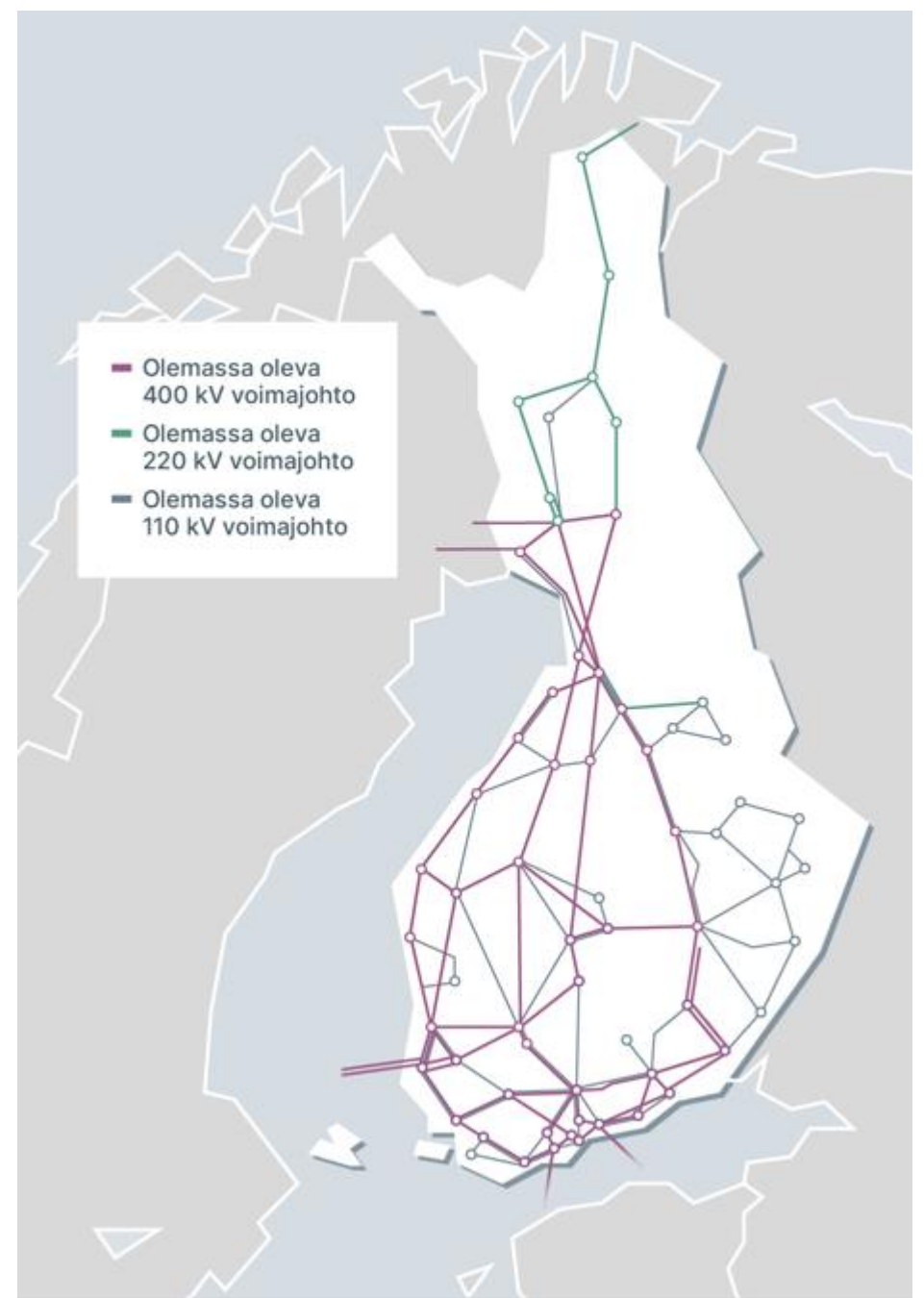
Puhtaan siirtymän investoinnit

Sähköverkkojen tulevaisuus

Janne Seppänen, janne.seppanen@aalto.fi, janne.seppanen@fingrid.fi

Suomen kantaverkko

- Sähkönsiirron runkoverkko
- Kantaverkkoon liittyvät sähkön tuottajat, suuret sähkön kuluttajat ja alueelliset jakeluverkot
- Yhdistää Suomen kansainvälisille sähkömarkkinoille
- Suomen kantaverkko on synkronikäytössä pohjoismaisten kantaverkkojen kanssa



Pohjoismainen verkko muodostaa kokonaisuuden

- Pohjoismaista sähköverkkoa käytetään yhdessä sovittujen pelisääntöjen mukaan.
- Kantaverkon käytön pääperiaatteet:
 - N-1 periaate
 - järjestelmän on kestävä minkä tahansa yksittäisen komponentin vika
 - häiriön jälkeen käyttötilanne palautettava normaaliksi 15 minuutin kuluessa

Yhteensä:

Huippukulutus ~
60 GW

Sähkönkulutus ~
400 TWh

Statnett

FINGRID

Suomi:

Huippukulutus ~
15 GW

Sähkönkulutus ~
80 TWh

SVENSKA
KRAFTNÄT

ENERGINET

Kulutus	11 230 MW
Tuotanto	9 749 MW
Tuonti - / vienti + (netto)	-1 477 MW
Suomen aluehinta vuorokausimarkkinoilla	74 €/MWh
Kulutetun sähkön CO ₂ -päästöarvio	28 gCO ₂ /kWh
Voimajärjestelmän käyttötilanne	Normaali

Sähkön siirto

- TUONTI
- VIENTI



Sähkön riittävyys tulevana talvena on hyvä Aurora Linen myötä

Arvio Suomen tehotaseesta talvikaudella 2025–2026		
	Erittäin kylmänä ja tyynenä talvipäivänä	Keskivertoisena kylmänä talvipäivänä
Kotimainen saatavilla oleva kapasiteetti	11 700 MW	13 500 MW
Arvioitu kulutus	15 000 MW	14 000 MW
Kotimaan tehotase, netto	-3 300 MW	-500 MW
Tuontikapasiteetti	4 100 MW	4 100 MW
- Ruotsista	3 100 MW	3 100 MW
- Virosta	1 000 MW	1 000 MW



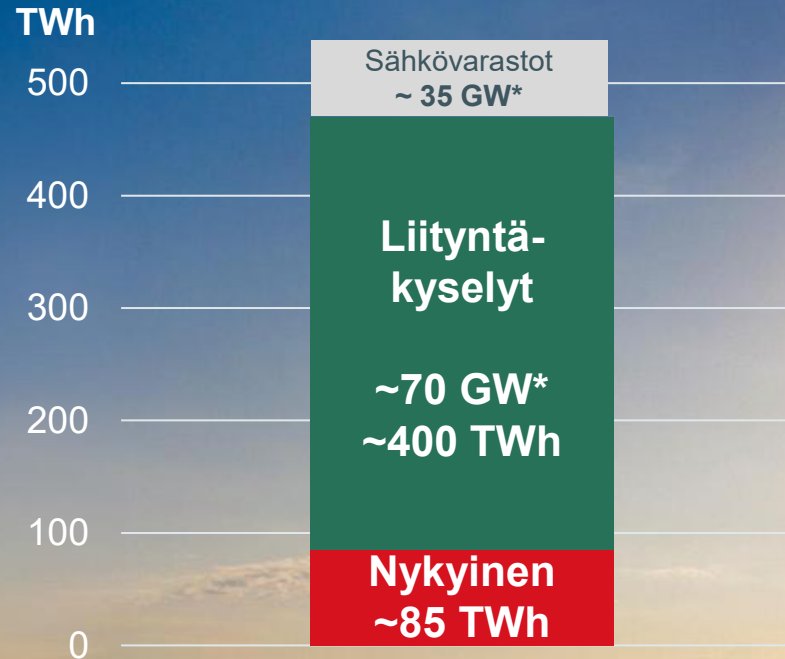
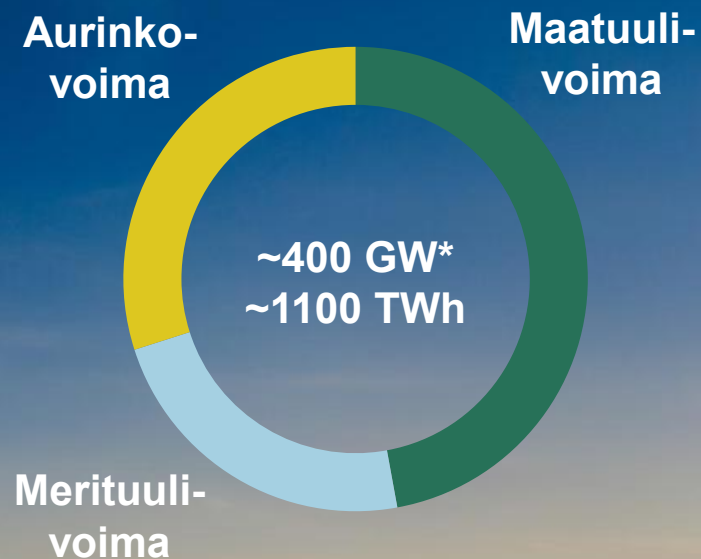
Fingridin arvio sähkön riittävydestä perustuu yksityiskohtaiseen koko talven tuntitaso mallinnukseen sähköjärjestelmän tehotaseesta eli tuotannon ja kulutuksen tasapainosta eri säätilanteissa sekä erilaisten vikaantumisten sattuessa. Esimerkiksi sään osalta huomioidaan epätodennäköinen noin kerran kymmenessä vuodessa tapahtuva erittäin kylmä ja tyyni pakkasjakso.

FINGRID

Miten sähköjärjestelmä kehittyy seuraavan vuosikymmenen aikana?

Suomen näkymät lupaavat – puhdas sähkö houkuttelee sähköintensiivistä teollisuutta!

Ja potentiaalia on rakentaa lisää teollisuuden kasvaviin tarpeisiin



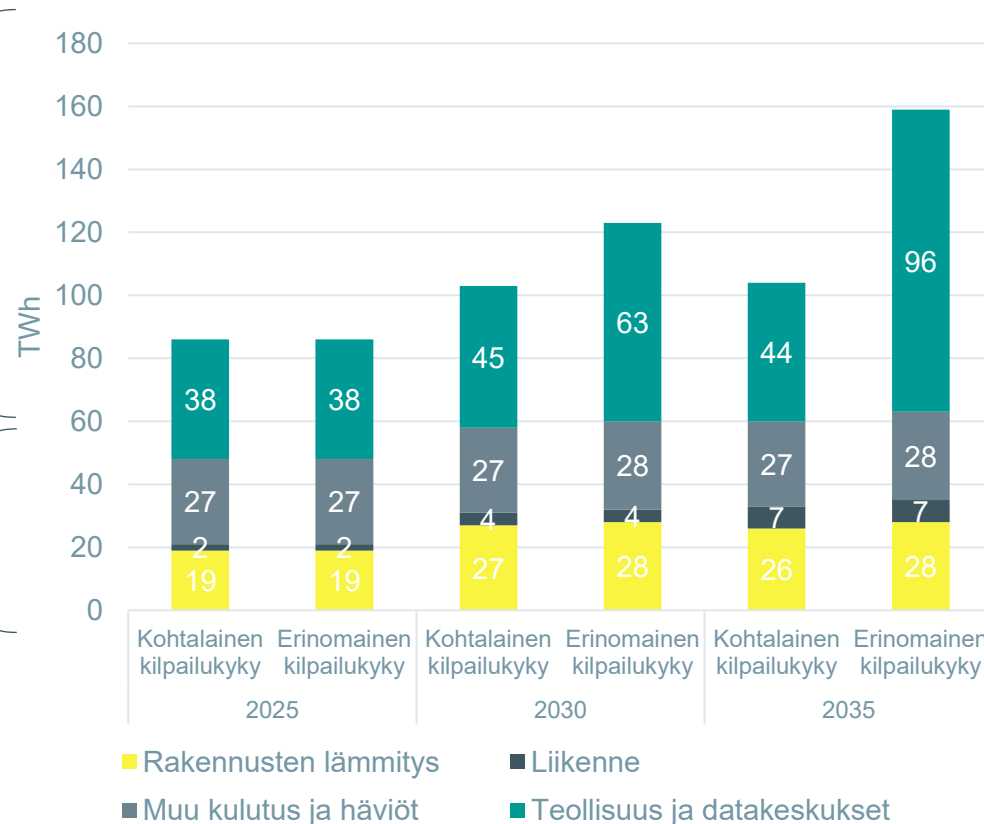
*Liityntäkyselyt, jotka eivät ole sitovia ja perustuvat hankkeiden ennakkotietoihin

Sähkön kulutuksen kasvunäkymä on lupaava – Suomen kilpailukyky ratkaisee toteutuuko se

Sähkön kulutuksen kasvunäkymä (Q3/2025)*

Teollinen sähkönkulutus:
2035: 44-96 TWh
(2025: <40 TWh)

Ei-teollinen sähkönkulutus:
2035: ~60 TWh
(2025: ~50 TWh)



- Erinomainen kilpailukyky -skenaario
 - Suomi kykenee voittamaan laajasti datakeskus-, vety- ja teollisuusinvestointeja
 - Kantaverkon suunnittelun perusta
- Kohtalainen kilpailukyky -skenaario
 - Ainoastaan hyvin pitkälle edenneet kysyntähankkeet toteutuvat
 - Sähkön kulutuksen kasvu pysähtyy ~100 TWh tasolle
- **Fingrid varautuu Suomen menestykseen – menestys ei ole varmaa eikä itsestäänselvyys**

* Sähkön tuotannon ja kulutuksen kehitysnäkymät Q3/2025. <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/kantaverkko/kantaverkon-kehittaminen/best-estimate-q3-2025/sahkon-tuotannon-ja-kulutuksen-kehitysnakymat-q3-2025-fingrid.pdf>

Suomessa on erinomaiset edellytykset lisätä merkittävästi kilpailukykyistä sähköntuotantoa

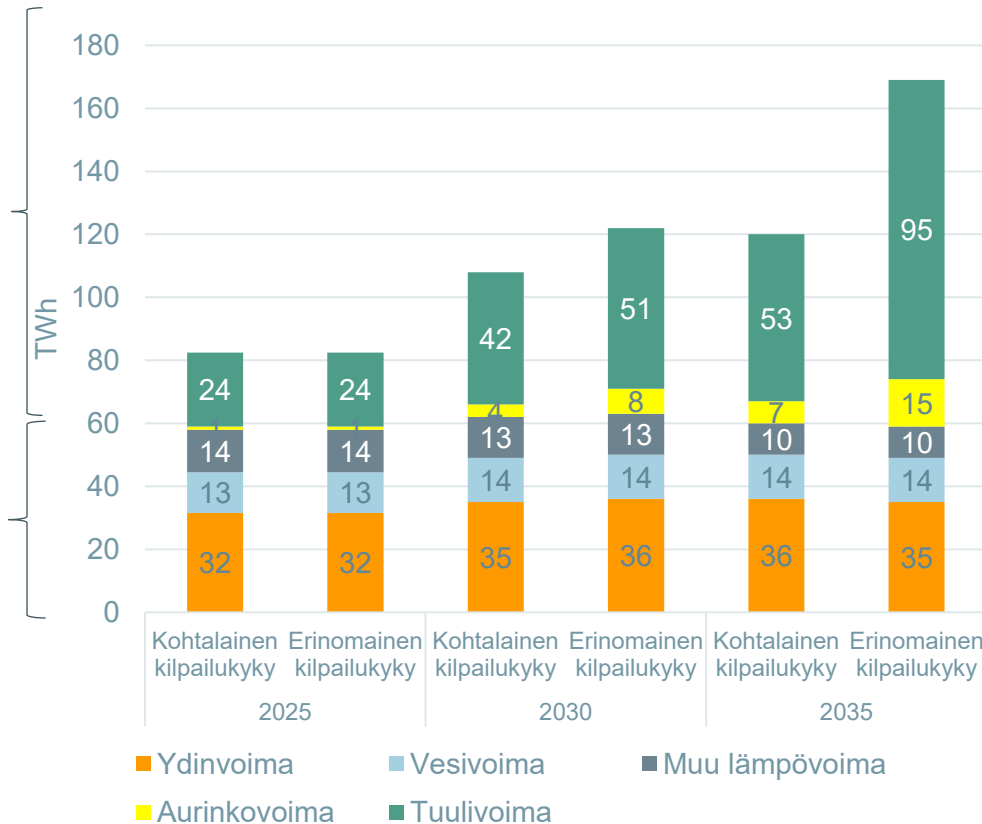
Sähkön tuotannon kasvunäkymä (Q3/2025)*

Suuntaaja-
kytketty
sääriippuva
tuotanto:

2035: 60-110 TWh
(2025: ~25 TWh)

Synkroni-
kytketty perus-
ja säätövoima:

~60 TWh



- **Kilpailukykyinen maatuulivoima on kysynnän kasvun mahdollistaja**
 - Kysyntäinvestoinnit voivat toteutua vain, jos sähköntuotantoa voidaan rakentaa lisää kilpailukykyiseen hintaan
- **Järjestelmä sekä kasvaa että muuttuu samanaikaisesti**
 - Sääriippuvan tuotannon osuuden kasvu
 - Suuntaajavaltainen sähköjärjestelmä
- **Edullisen tuuli- ja aurinkovoiman lisäksi tarvitaan tasapainottavia sähkövarastoja ja säätövoimaa**

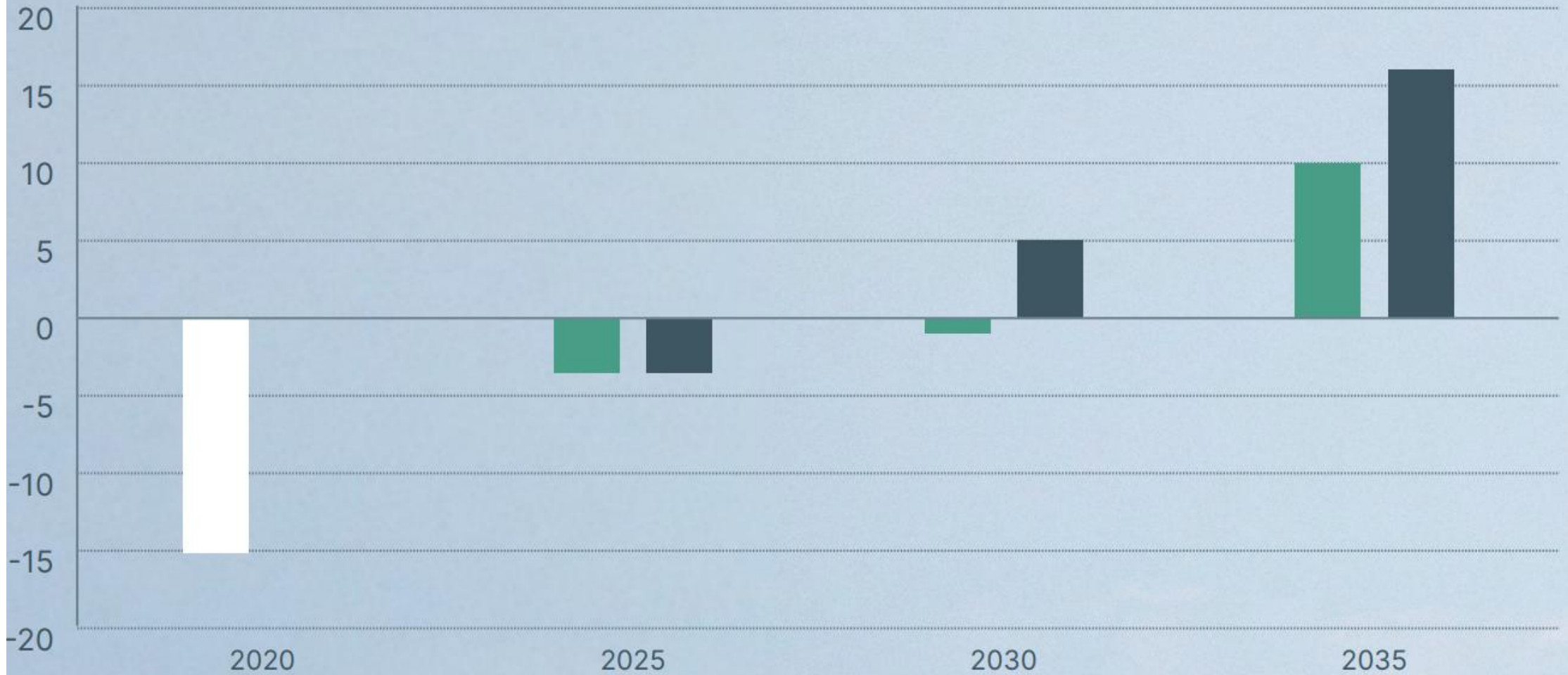
* Sähkön tuotannon ja kulutuksen kehitysnäkymät Q3/2025. <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/kantaverkko/kantaverkon-kehittaminen/best-estimate-q3-2025/sahkon-tuotannon-ja-kulutuksen-kehitysnakymat-q3-2025-fingrid.pdf>

Sähkötase (TWh)

Fingridin ennuste, syyskuu 2025.

FINGRID

TWh



A Toteuma Erinomainen kilpailukyky Kohtalainen kilpailukyky

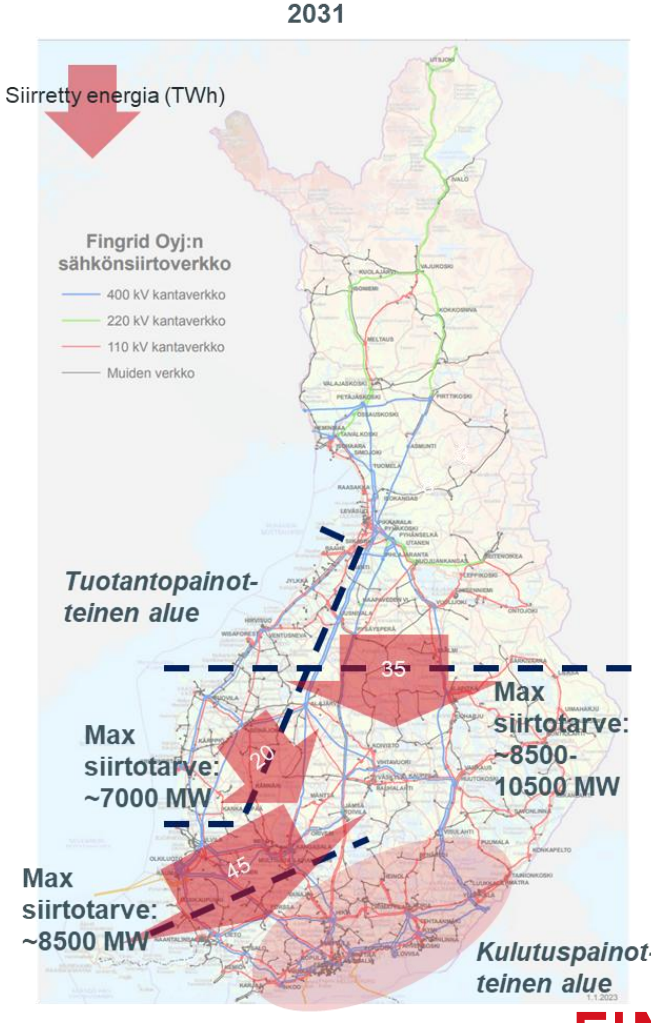
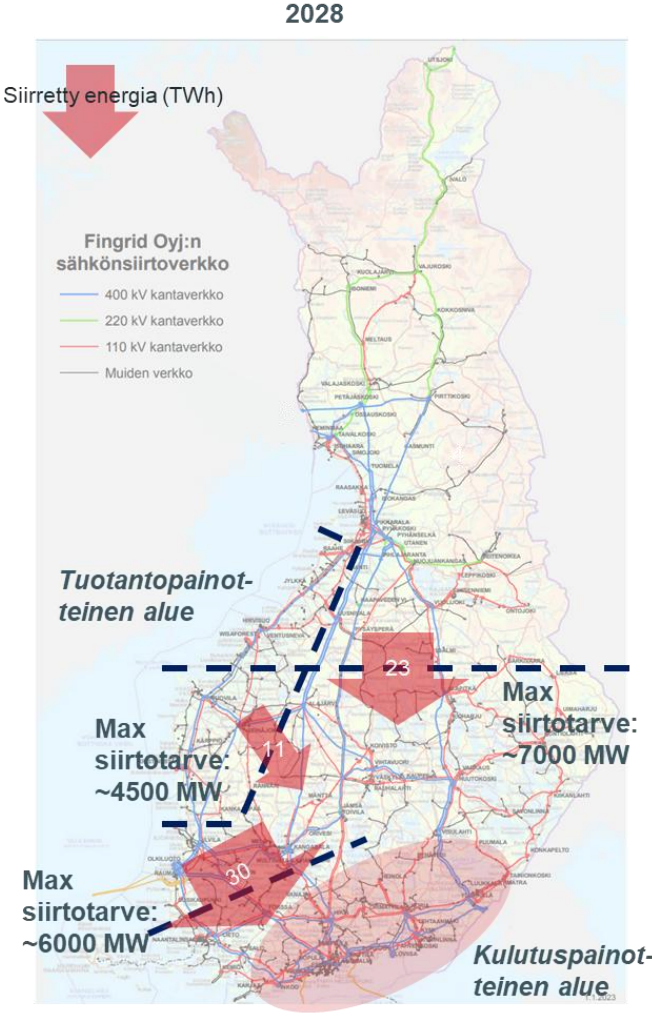
Lähde: [sahkon-tuotannon-ja-kulutuksen-kehitysnakymat-q3-2025-fingrid.pdf](#)

Kantaverkon kehittämissuunnitelma

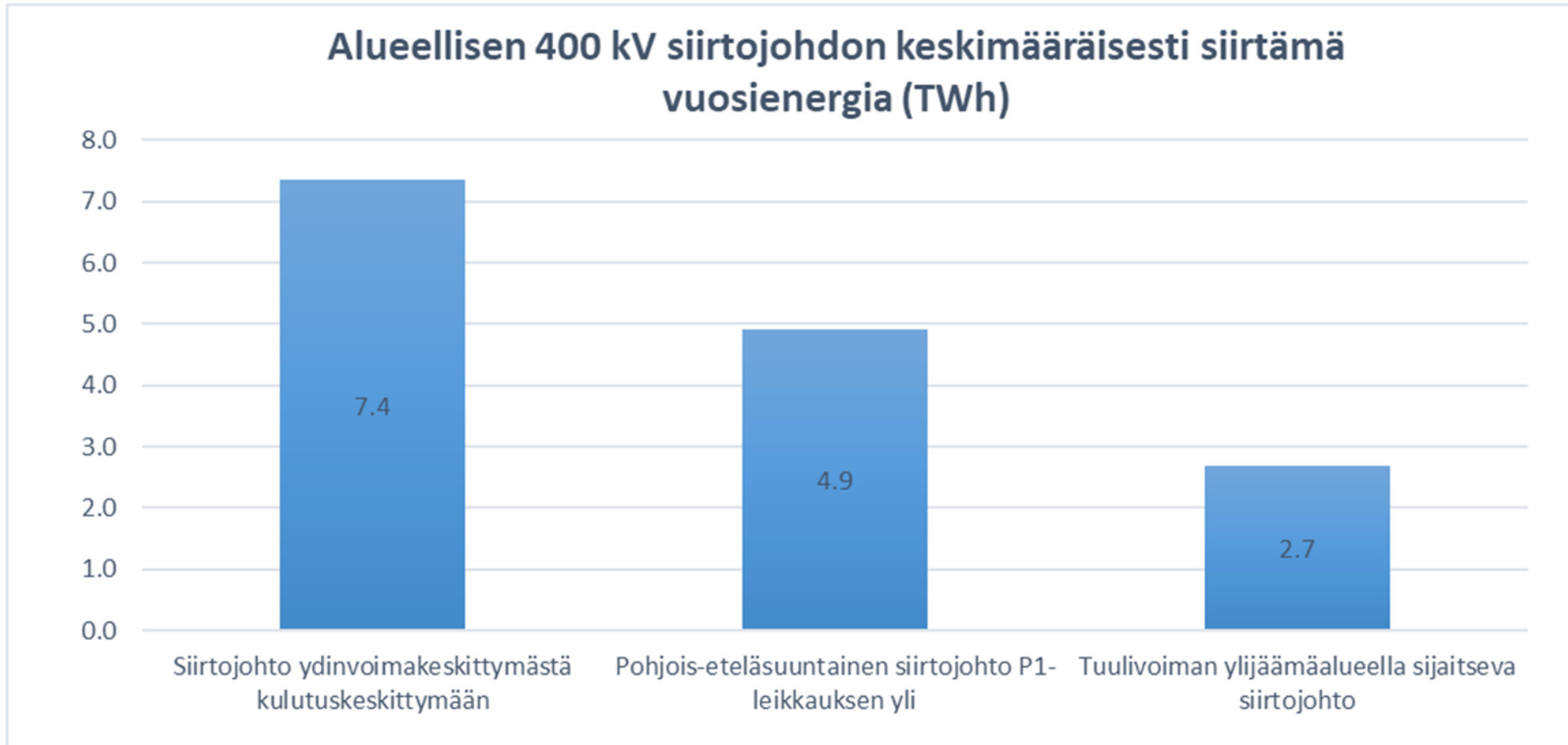
- Kehittämissuunnitelmassa keskitytään tunnistamaan pääsiirtoverkon keskeiset kehitystarpeet, jotta ne eivät rajoittaisi liitettävyyttä.
- Kasvatavat siirtotarpeet ja epävarmuudet haastavat sähköjärjestelmän kehittämistä – kehittämissuunnitelma on joustava ja **sitä päivitetään jatkuvasti toteutuvien tarpeiden mukaan** asiakashankkeiden edetessä.
- Ennusteet vaativat pohjois-eteläsuuntaisten ja länsi-eteläsuuntaisten siirtoyhteyksien merkittävää vahvistamista. Näitä vahvistetaan uusilla voimajohdoilla ja kompensointiratkaisuilla.
- **Fingrid investoi enemmän kuin koskaan aiemmin:** vuosina 2025–2028 investointeja 2 miljardia euroa ja vuoteen 2035 mennessä 5,2 miljardia euroa.
- Mikäli sähkönkulutus kehittyy ennusteiden mukaisesti, kantaverkkoa on kehitettävä edelleen nykyisellä tai jopa kiihtyvällä vauhdilla.



Siirtotarpeen kehittyminen pääsiirtoleikkausten yli vuosina 2025-2031



3-finch siirtojohtojen potentiaalinen siirtokapasiteetti silmukoidussa kantaverkossa on ~9 TWh vuodessa

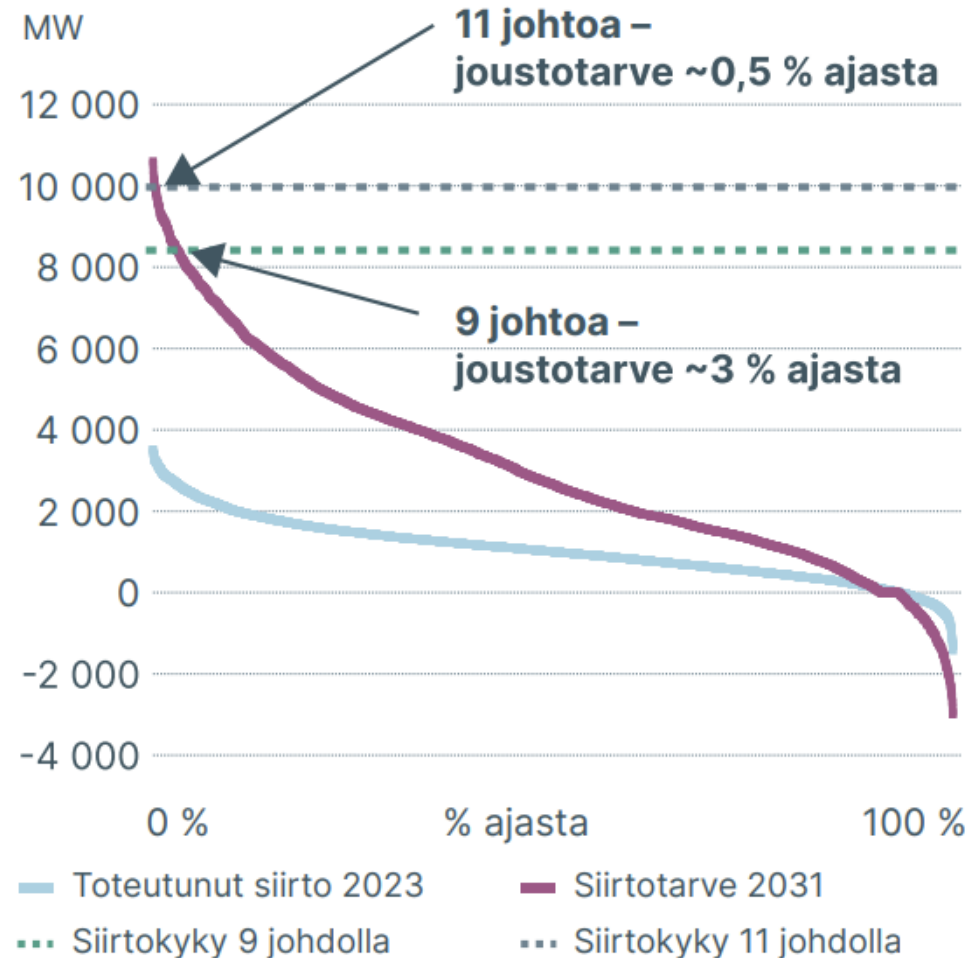


Tuulivoimavaltaisella alueella kantaverkon käyttöaste (TWh/a) on noin kolmasosan ydinvoimavaltaisen alueen käyttöasteesta

Siirtotarpeen huipputehojen kasvun ennustetaan kiihtyvän

- Huippusiirtotarpeet pääsiirtoleikkauksissa ovat nopeassa kasvussa
- Sähköjärjestelmän perinteinen tehomitoitus kattaa kaikki siirtohuiput, infrastruktuurin käyttöaste matala ilman joustoresursseja
- Joustoresursseilla voidaan mahdollistaa nopeammat liittynät asiakkaille, sekä kustannustehokas sähkönsiirtojärjestelmä – kaikki hyötyvät!

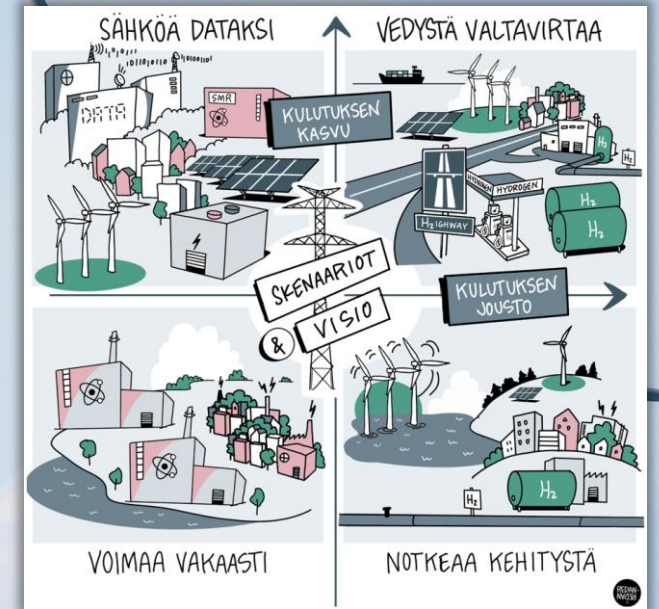
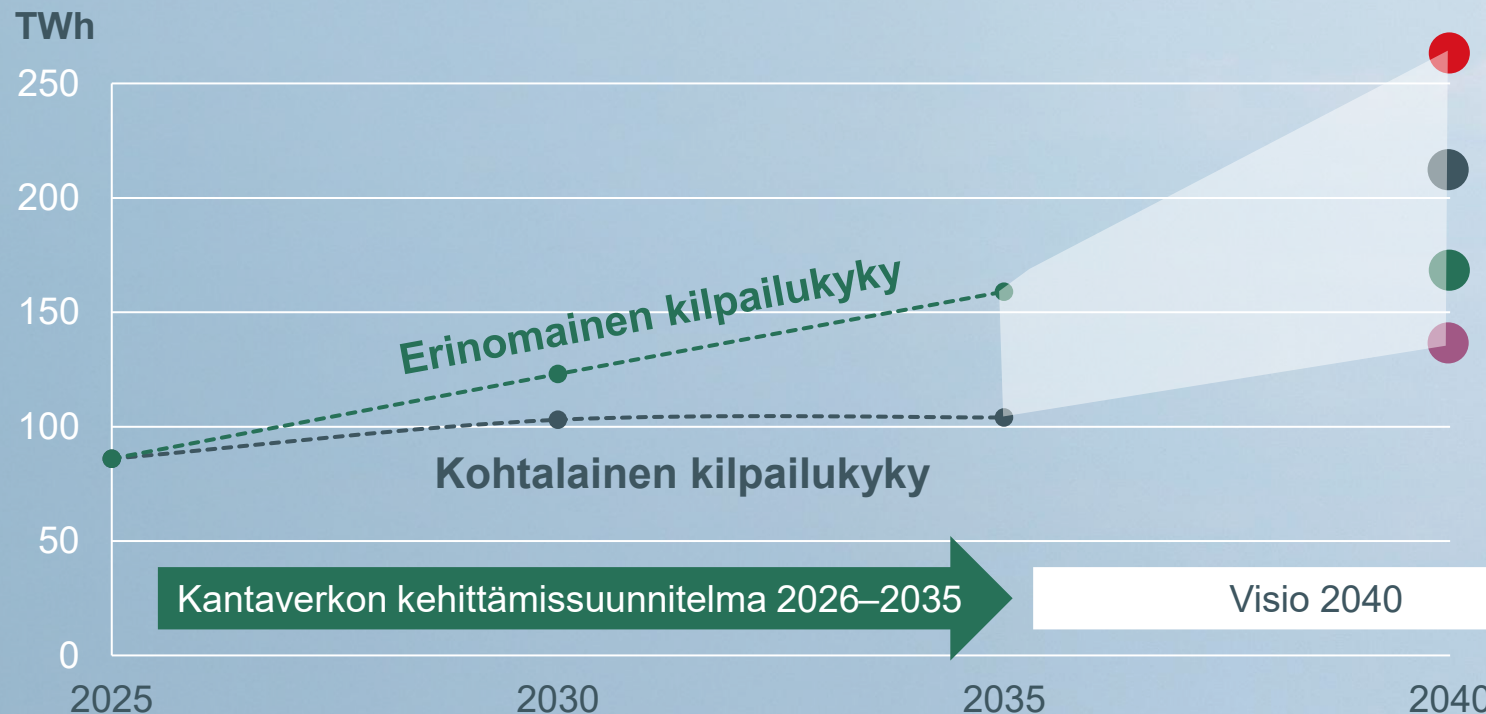
Siirtotarpeen pysyvyys



Entä jos katsotaan vielä pidemmälle?

Fingrid varautuu sähkön kulutuksen merkittävään kasvuun

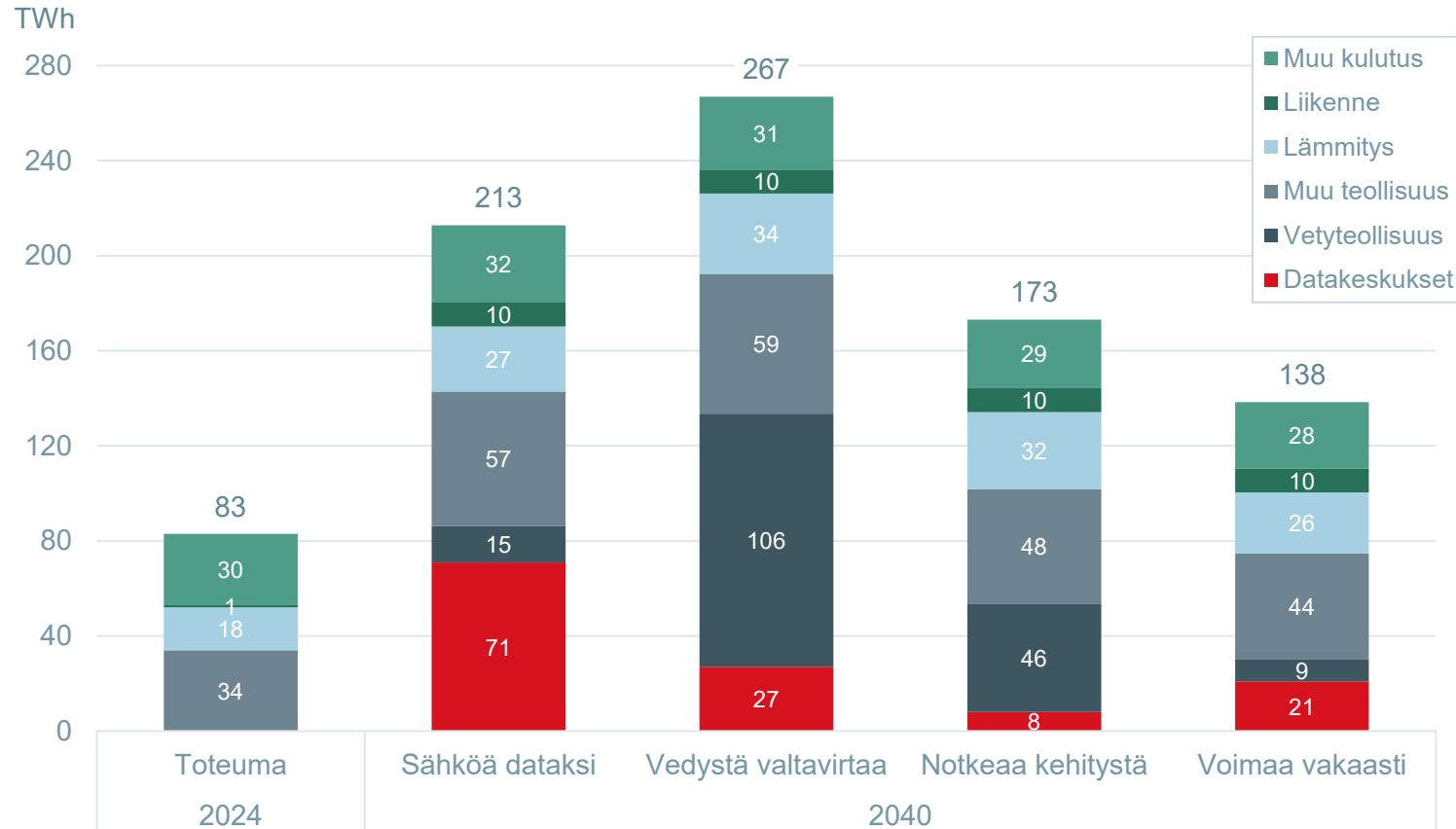
Suurin kasvupotentiaali teollisessa sähkönkulutuksessa – kyky houkutella investointeja ratkaisevaa kasvun kannalta



Visio pidemmälle aikavälille erilaisista kehityskuluista – keskeisimpänä kaikille skenaarioille yhteiset vahvistukset!

Sähkön kulutus kasvaa merkittävästi uuden teollisuuden ja sähköistymisen ajamana

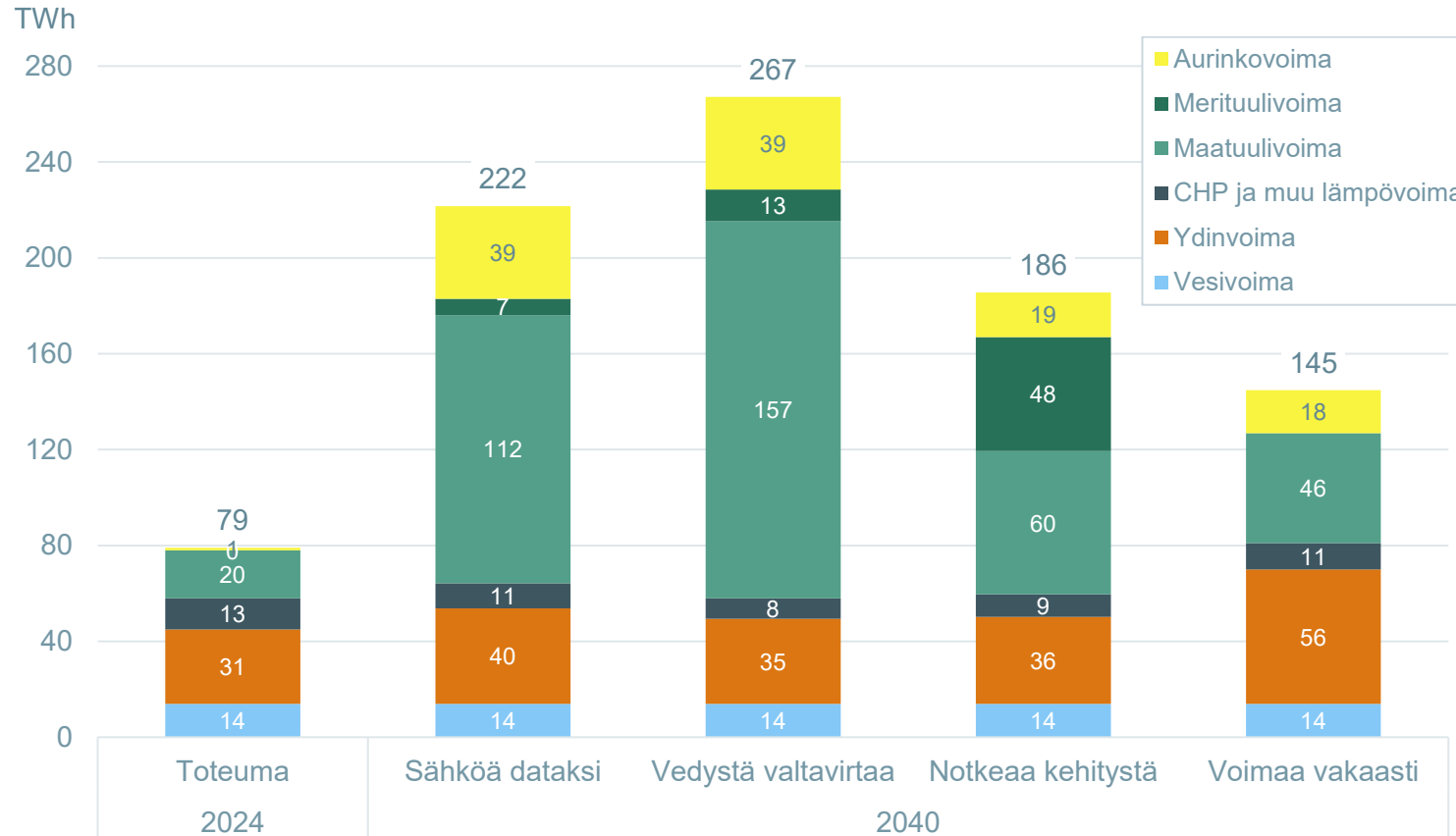
Sähkön kulutus – vuoden 2024 toteuma ja 2040 skenaariot



- Uusi energiantensiivinen teollisuus on merkittävin ajuri kasvulle, skenaariosta riippuen suurin kasvu datakeskuksista, vetyteollisuudesta tai muusta uudesta teollisuudesta
- Lisäksi sähköistäminen nykyisessä teollisuudessa, lämmityksessä ja liikenteessä

Kasvua sähkön tuotannossa etenkin kilpailukykyisistä tuuli- ja aurinkovoimasta

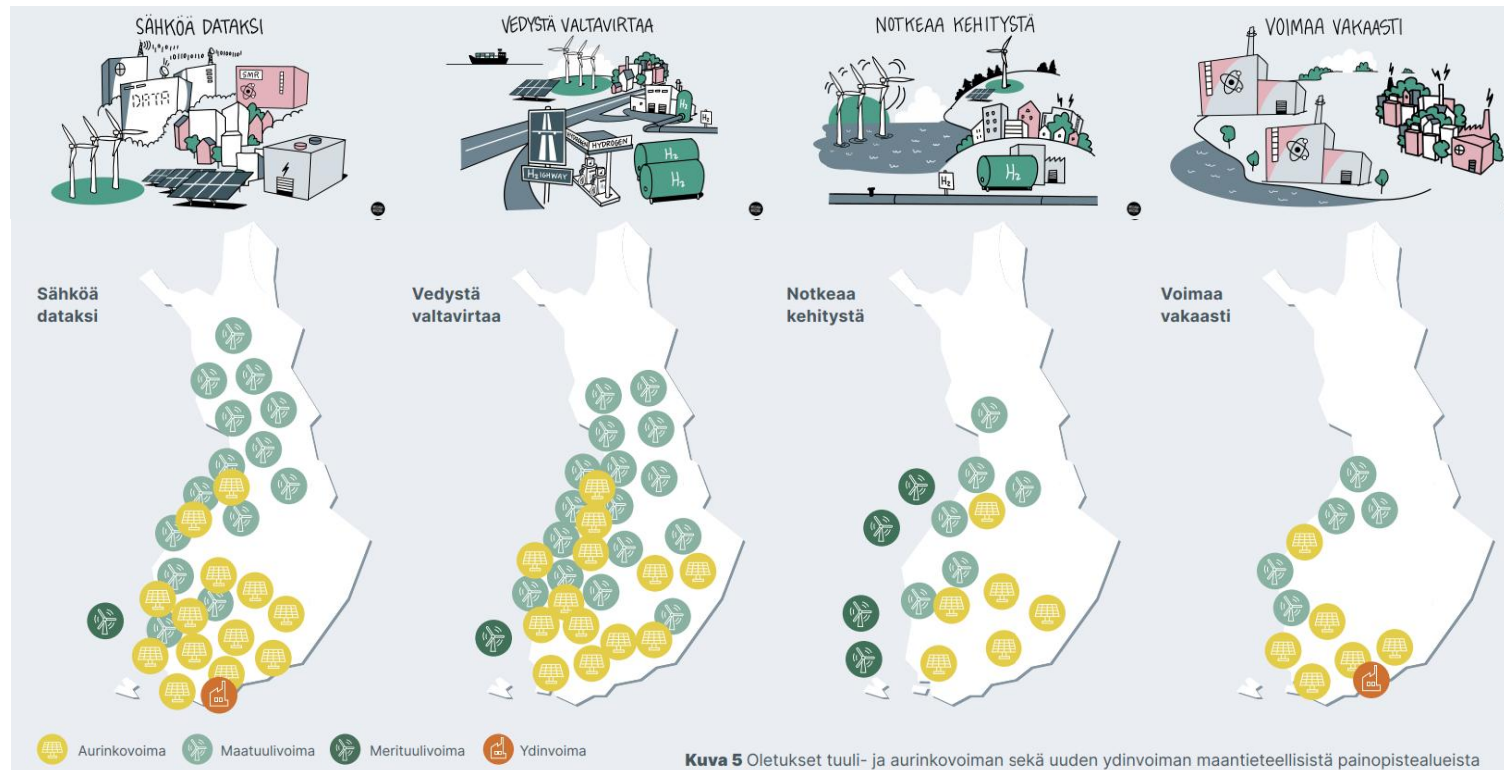
Sähkön tuotanto – vuoden 2024 toteuma ja 2040 skenaariot



- Suurin kasvu maatuulivoimassa ja aurinkovoimassa, joissa alhaisin tuotantokustannus, lisäksi merituulivoimaa
- Ydinvoimassa kasvua tehonkorotusten vuoksi, lisäksi uutta perinteistä ja pienydinvoimaa
- Perinteinen CHP supistuu, mutta joustoa saadaan uudesta huippuvoimasta ja myös pumppuvoimaloista

Skenaariot ajavat kantaverkon kehittämistä eri tavoin – erityisesti vaikuttaa tuotannon sijainti

Tuuli-, aurinko- ja ydinvoiman maantieteelliset painopistealueet*

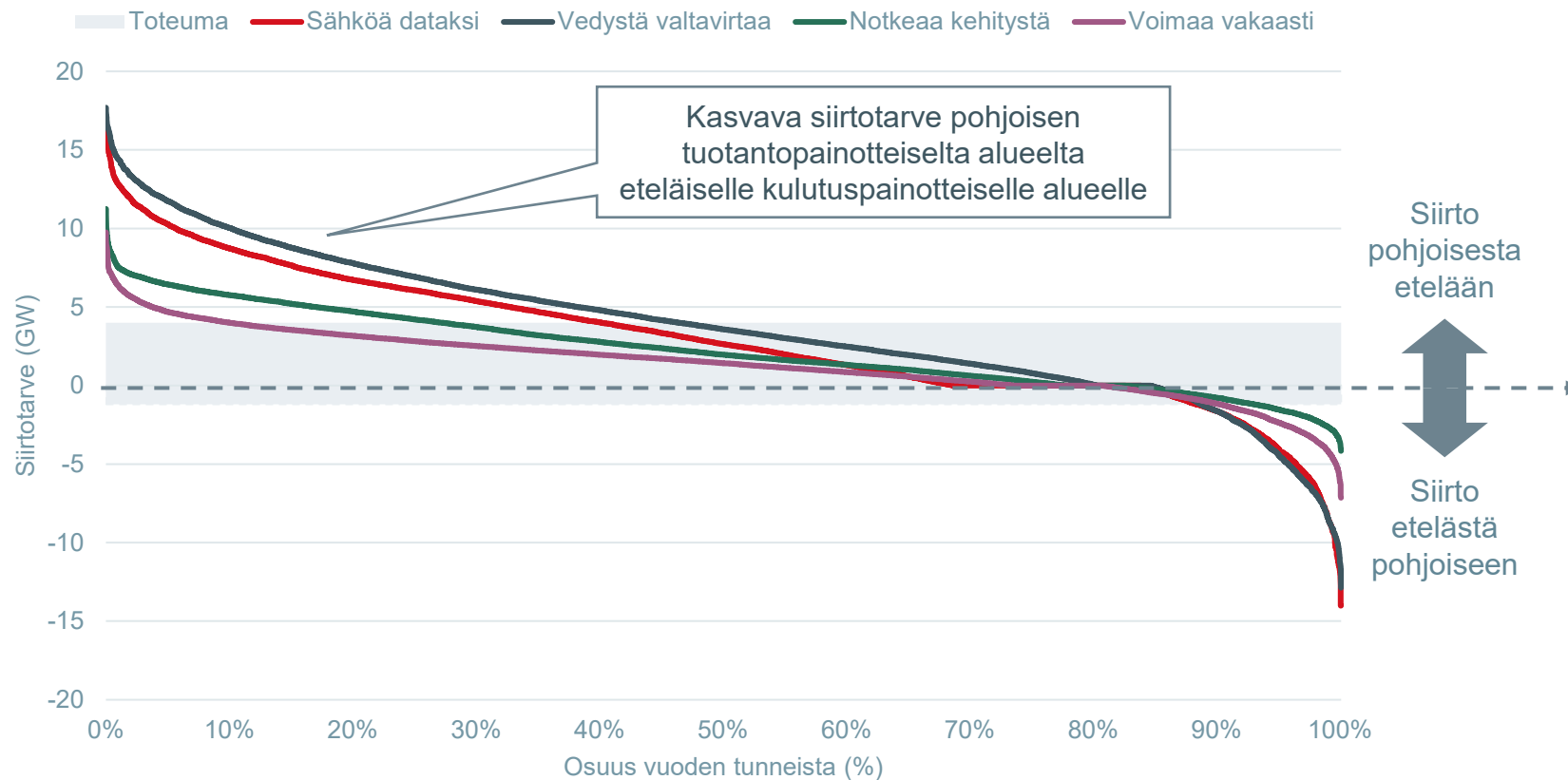


- Maatuulivoima painottuu länsirannikolle: lisäksi *Sähköä dataksi* painotus Pohjois-Suomeen ja *Vedystä valtavirtaa* Itä-Suomeen
- Aurinkovoima painottuu Etelä-Suomeen
- Merituulivoimaa *Notkeaa kehitystä* länsirannikolla
- Ydinvoimaa *Voimaa vakaasti* Loviisan alueella ja *Sähköä dataksi* pääkaupunkiseudulla

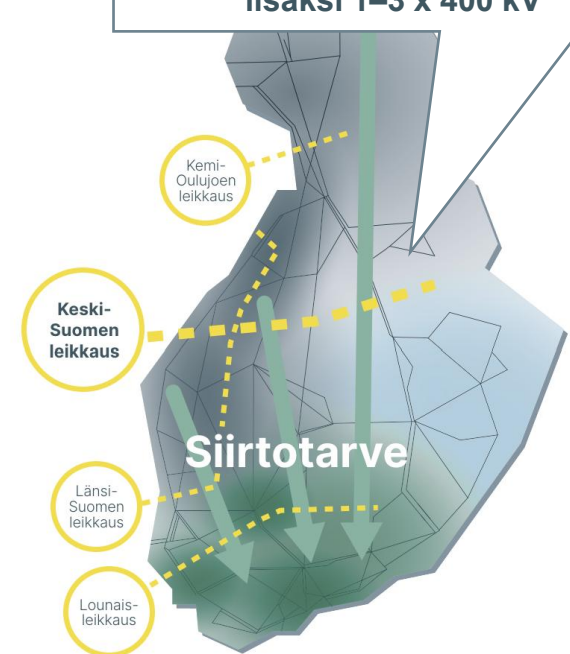
*Kartalle merkityt sijainnit merkitsevät tuuli- ja aurinkovoiman osalta noin 3 GW tehoa ja havainnollistavat tuotantoa laajemmilla maantieteellisillä alueilla eri skenaarioissa, eivätkä viittaa yksittäisiin hankkeisiin.

Korkea kasvu haastaa kantaverkon kehittämistä – siirtohuiput 3-5 x nykyisiin toteumiin nähden

Sähkön siirron pysyvyyskäyrä Keski-Suomen poikkileikkauksen yli



Keski-Suomen leikkaus nyt:
5 x 400 kV
Kehittämissuunnitelma (alla):
+ 6 x 400 kV
Vision korkeimmat kasvuskenaariot:
lisäksi 1–3 x 400 kV



Järjestelmätason poikkileikkauksella tarkoitetaan sähkötekniisesti määritettyä useamman siirtojohton muodostamaa siirtoreittiä, joka on tunnistettu pullonkaulaksi sähköjärjestelmässä. Tunnistettujen poikkileikkauksien siirtokyvyn kasvattaminen johtoinvestointien avulla on yksi tärkeimmistä keinoista kehittää järjestelmätason siirtokykyä ja liitettävyyttä.

Kantaverkkovahvistusten analysointi sähköjärjestelmävisiossa

1. Skenaarioiden markkinamallinnus

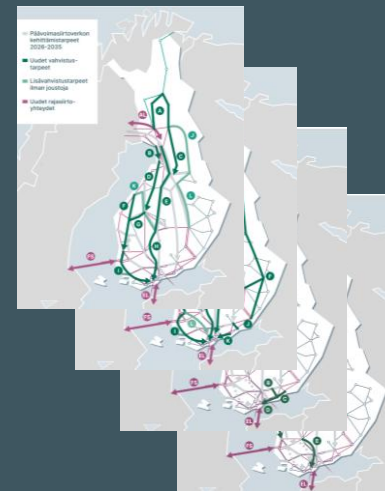
2. Kantaverkon siirtotarpeet

Kehittämissuunnitelman 2026–2035 mukainen pohjaverkko

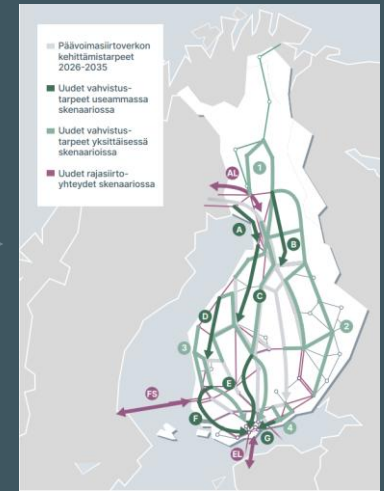
Sähköverkon toiminnan ja vikatilanteiden simulointi

Kehittämistarpeiden tunnistaminen & verkon vahvistustarpeiden mallintaminen

3. Verkon vahvistustarpeet

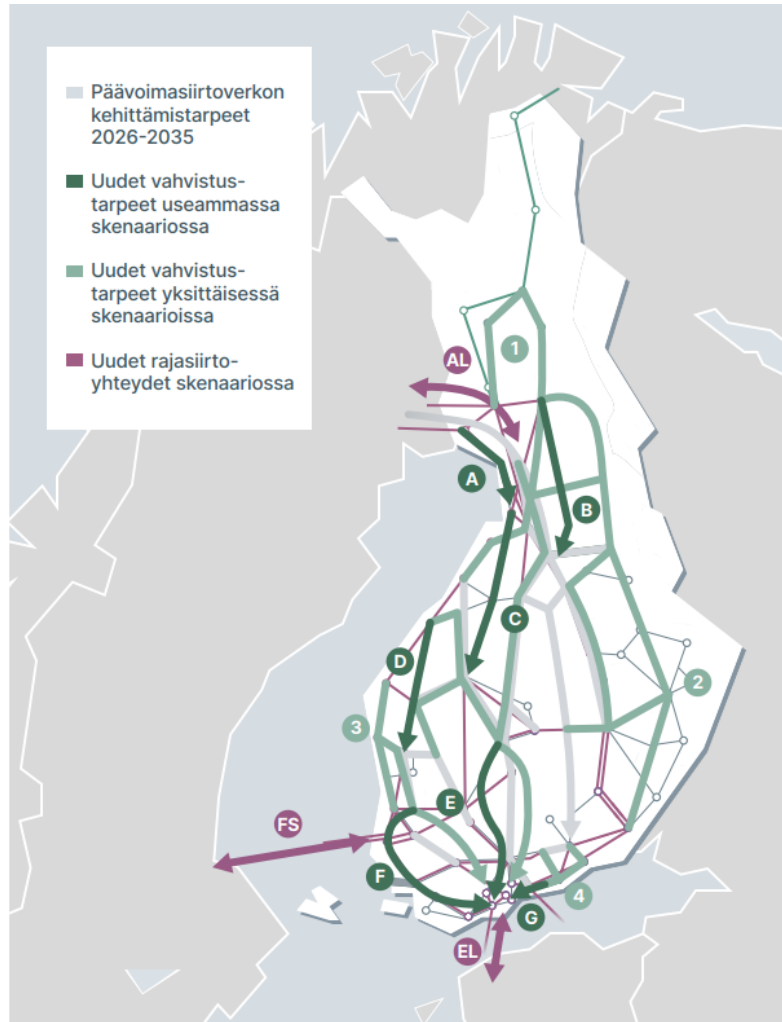


Vision neljässä skenaariossa tunnistetut vahvistustarpeet



Useammassa skenaariossa tunnistetut vahvistustarpeet

Skenaarioille yhteiset vahvistukset tärkeitä, sillä tarve toteutuu useammassa kehityskulussa



Skenaarioiden verkkovahvistukset 2040

Tunnistetut päävoimasiirtoverkon lisävahvistukset

- A** Yhteys Keminmaalta Ouluun
- B** Yhteys Pirttikoskelta etelään
- C** Jokilinjojen uusinta
- D** Yhteys Kokkolasta Satakuntaan
- E** Yhteys Keski-Suomesta pääkaupunkiseudulle
- F** Lounaisleikkauksen vahvistus
- G** Pääkaupunkiseudun vahvistus
- 1** Lisävahvistukset Pohjois-Suomeen (Sähköä dataksi)
- 2** Lisävahvistukset Itä-Suomeen (Vedystä valtavirtaa)
- 3** Lisävahvistukset Länsi-Suomeen (Notkeaa kehitystä)
- 4** Lisävahvistukset Etelä-Suomeen (Voimaa vakaasti)
- FS** Fenno-Skan 3 yhteys Keski-Ruotsiin
- EL** Estlink 3 yhteys Viroon
- AL** Aurora Line 2 yhteys Pohjois-Ruotsiin

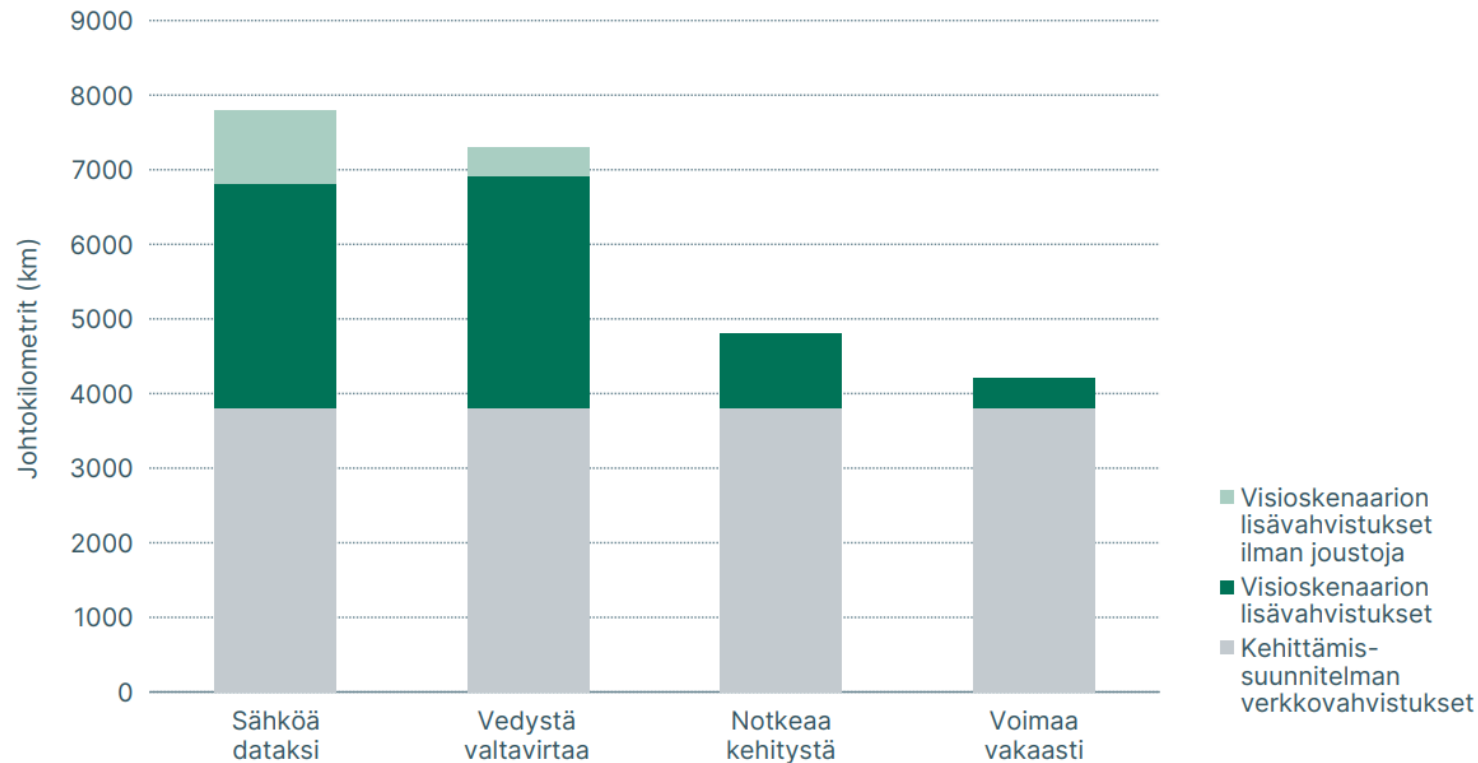
Uudet vahvistustarpeet useammassa skenaariossa
800-1300 km

Uudet vahvistustarpeet yksittäisessä skenaariossa
300-4000 km

Kuva 9 Yhteenveto skenaarioissa tunnistetuista kantaverkon vahvistustarpeista

Kantaverkon lisävahvistustarpeet merkittäviä – joustoista apua korkeimmissa skenaarioissa

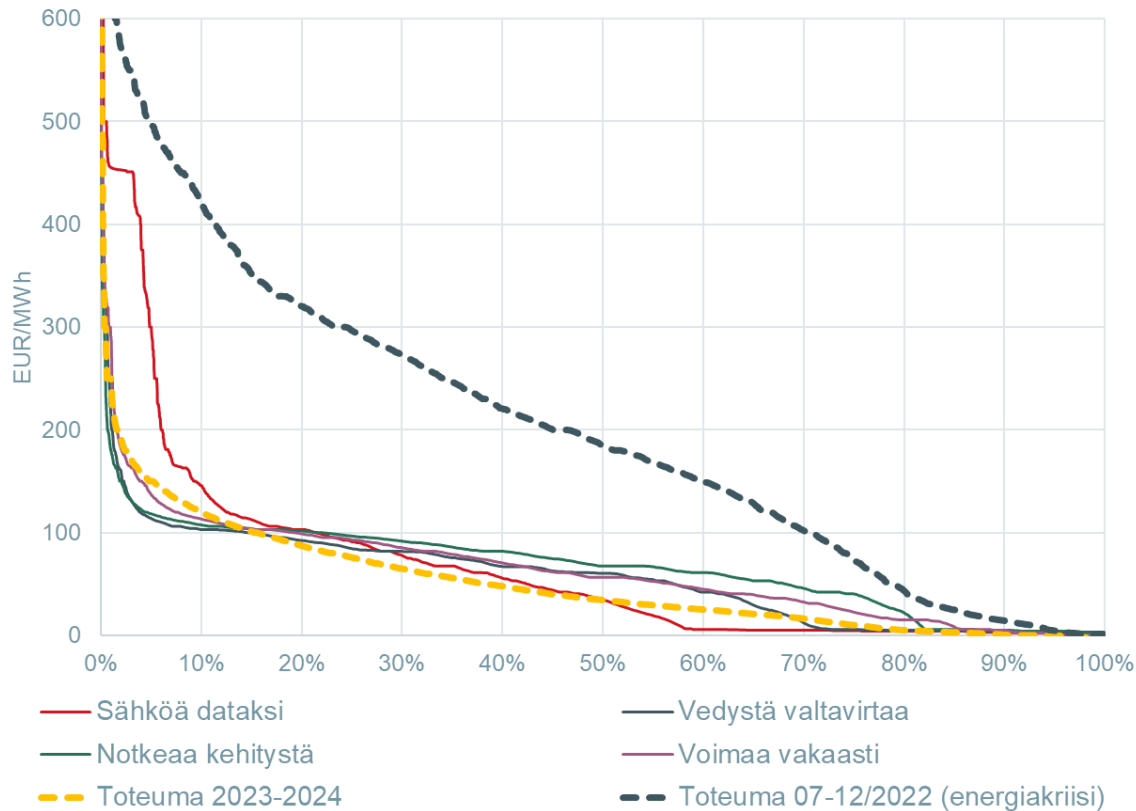
Skenaarioiden 400kV verkkovahvistusten yhteenlaskettu pituus



- Korkeimmissa skenaarioissa investointitahtia olisi kiihdytettävä nykyisestä
 - Mikäli korkeimmat siirtohuiput hoidettaisiin joustoilla, tarvittaisiin kantaverkon vahvistuksia huomattavasti vähemmän
- Maltillisemmissa skenaarioissa vahvistustarpeet paikallisempia, alueellisesta kehityksestä riippuvaisia
 - Ennakointi on tärkeää, mutta epävarmuudet ovat suuria!

Sähkön hintavaihtelu luo kannustimia joustavalle sähkönkäytölle ja sähkövarastoille

Skenaarioiden sähkön hintatason pysyvyyskäyrä



Suuri ja kilpailukykyinen tuuli- ja aurinkovoimapotentialiaali on Suomen kilpailuetu

Sähkön kulutus ja sääriippuva sähköntuotanto eivät luonnostaan toteudu samanaikaisesti

Kustannustehokkaita joustoresursseja tarvitaan tasapainottamaan tuotanto ja kulutus

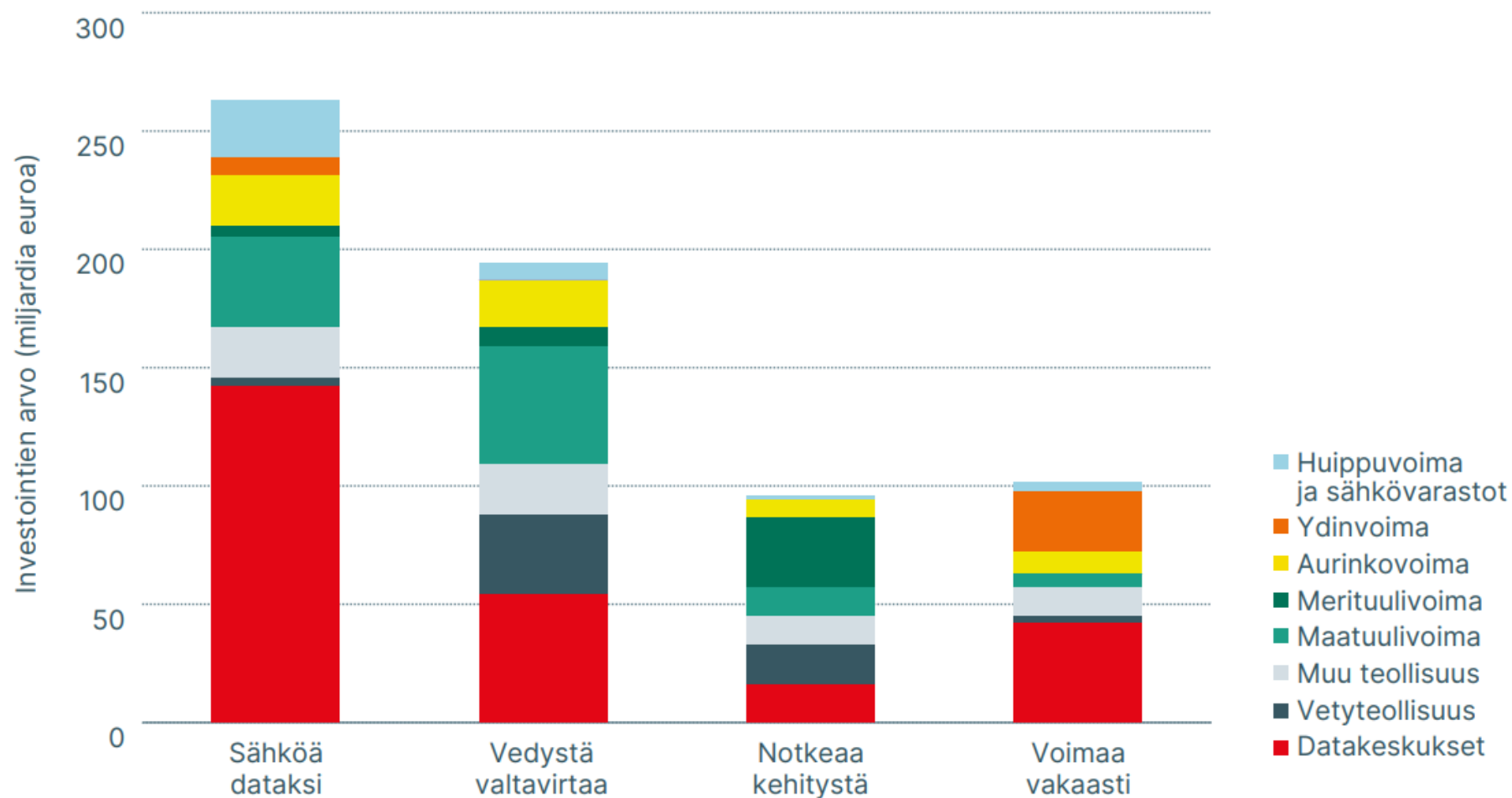
Kysyntäjousto

Energia-
varastot

Joustava
sähkön-
tuotanto

Rajasiirto-
yhteydet

Verkon kehittämisen mahdollistamat investoinnit



Kuva 20 Arvio skenaarioissa mahdollistettujen investointien arvosta

Miten järjestelmän ominaisuudet muuttuvat?

Transition into converter dominated power system



Source: <http://electrical-engineering-portal.com>

From synchronous machines to converter dominated power system

Inertia and system strength (short circuit power) decreases



The system becomes more sensitive to disturbances



Source: <http://media.treehugger.com>



Source: www.offshorewind.biz

From physical equations into programmed response

The system becomes more complex and non-linear



New phenomena & modelling and analysis becomes more challenging



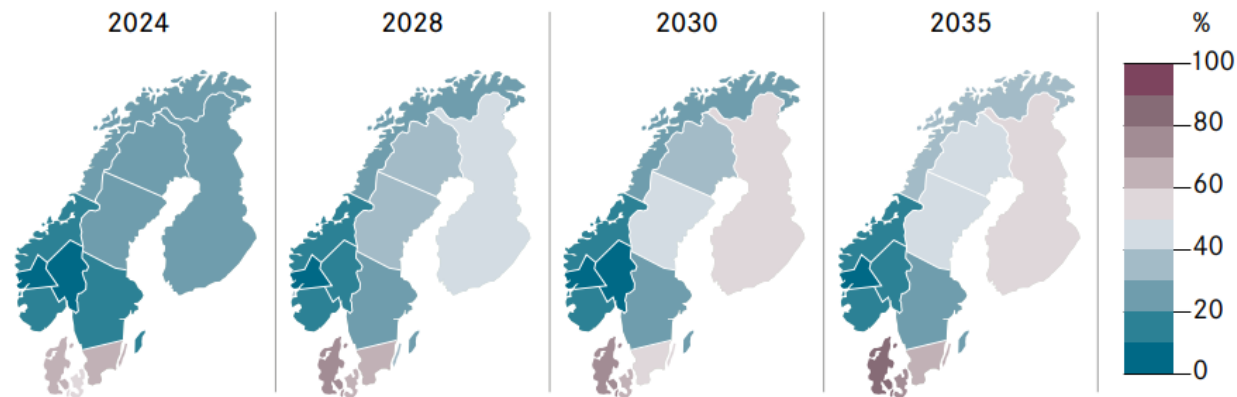
FINGRID



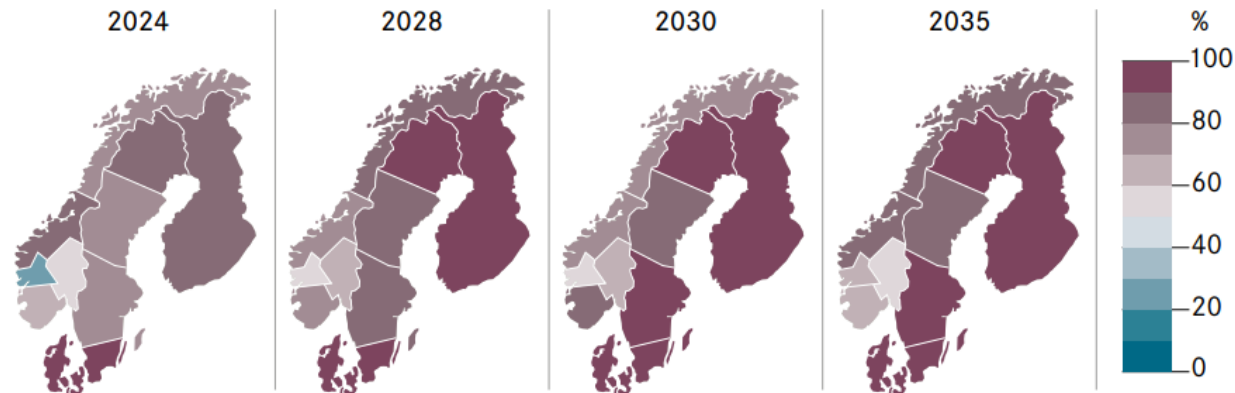
Source: <http://www.bbc.com>

Suuntaajakytketty tuotanto lisääntyy verkossa

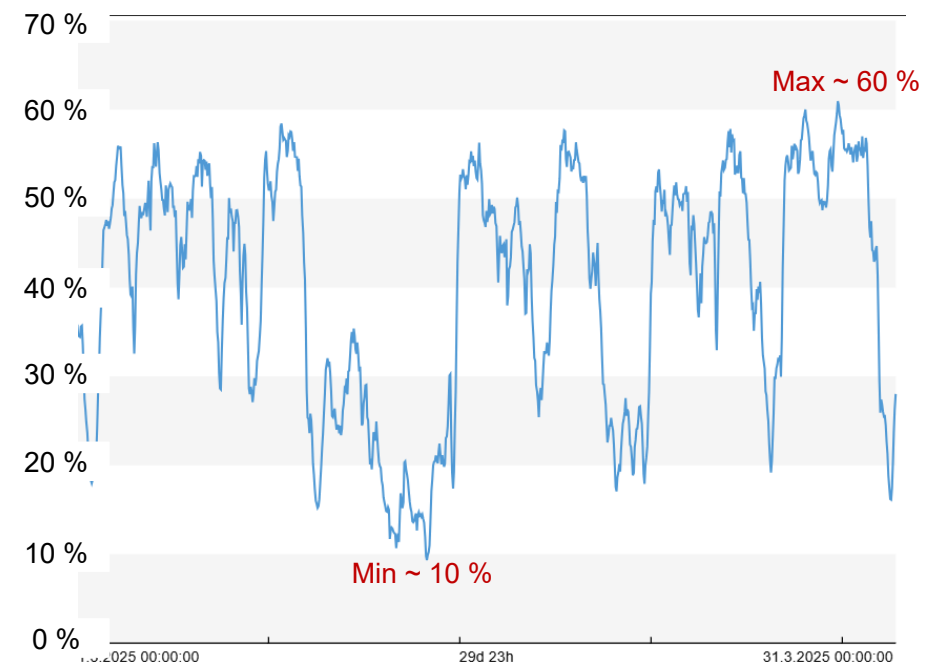
Keskimääräinen suuntaajakytketyn tuotannon (tuuli+aurinko) osuus alueittain



Maksimi suuntaajakytketyn tuotannon osuus alueittain

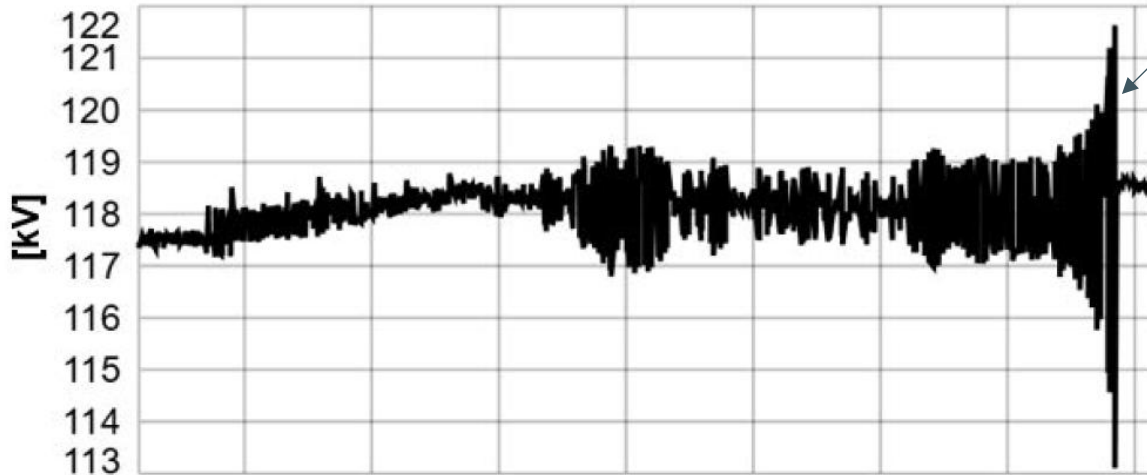


Suuntaajakytketyn tuotannon osuus Suomessa maaliskuussa 2025



Suuntaajien stabiilius

Jännite 110 kV verkossa

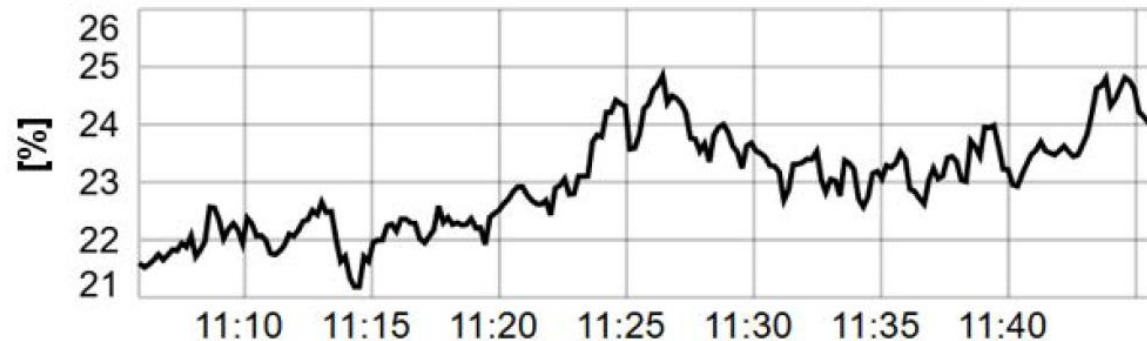


Auki olleen 400 kV johdon kytkentä takaisin verkkoon

Ratkaisuvaihtoehtoja

- Tuulivoimaloiden jännitteensäädön uudelleenviritys
- Synkronikompensaattorit
- STATCOMit (grid forming säädöllä)
- Grid forming säätöä vaaditaan akkuvarastoilta
- Tehorajoitukset, tarvittaessa vakioloistehosäätö
- Uudet monitorointikyvykkyydet (PMU ja WMU)

Tuulivoimatuotannon määrä (% per maksimituotanto) alueella

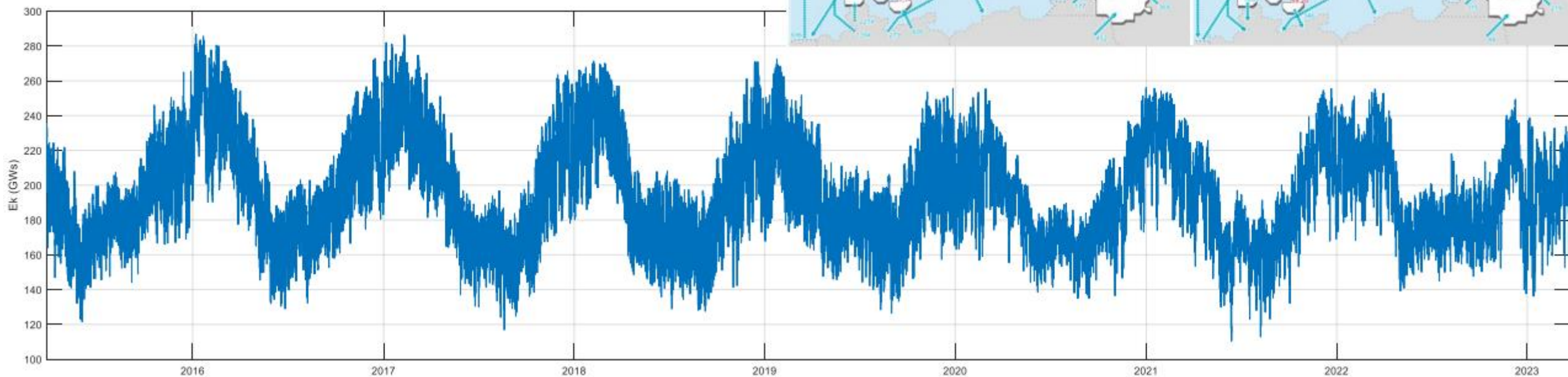
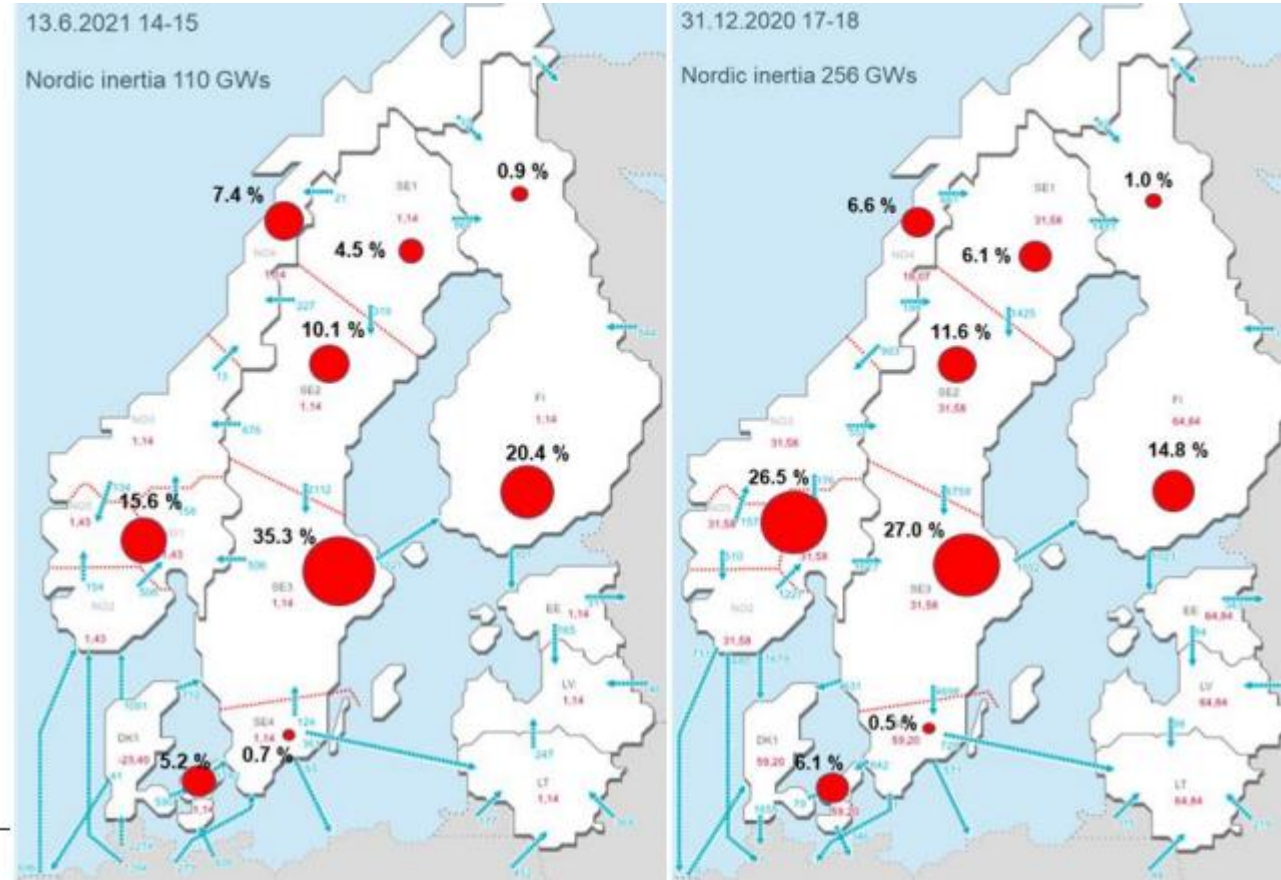


17.11.2025

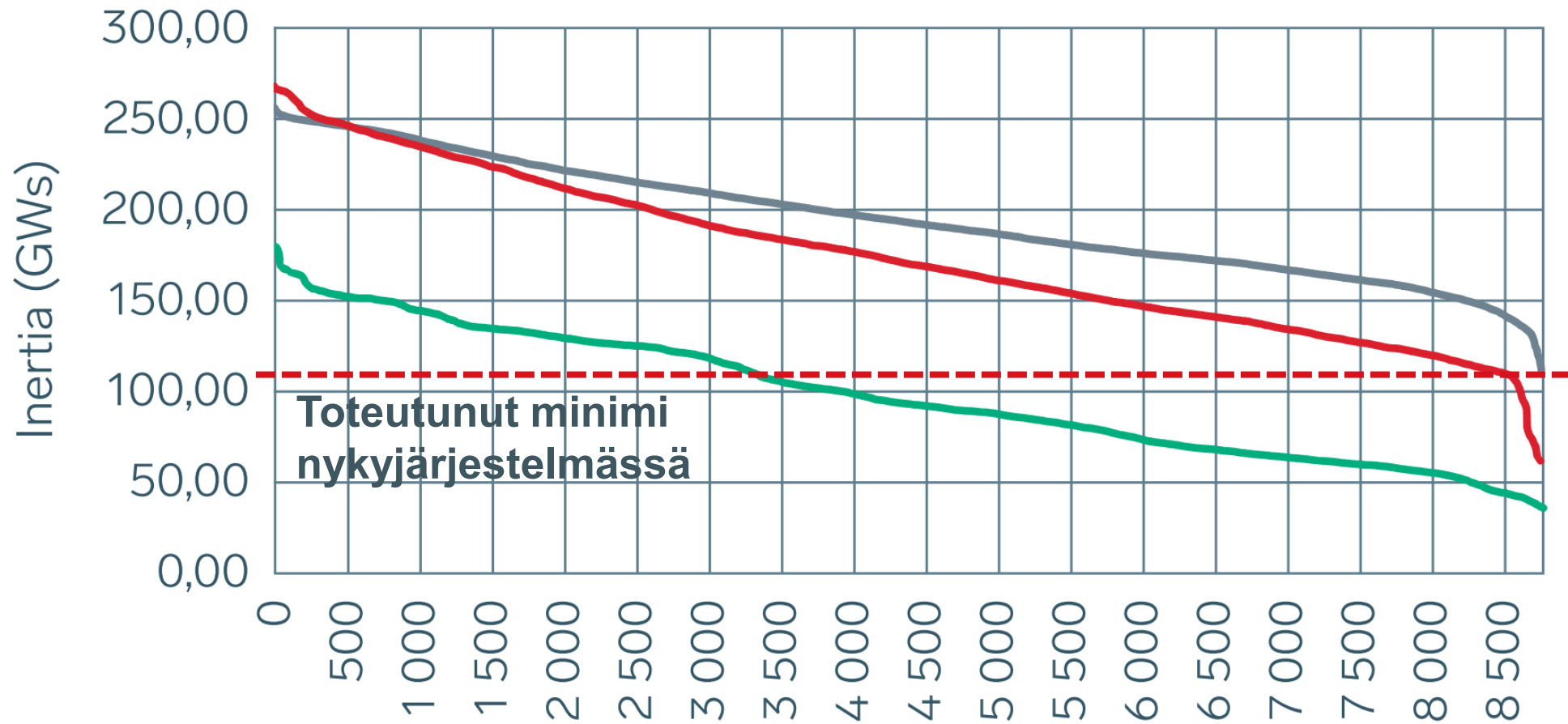
FINGRID

What is inertia?

- Inertia is the ability of a power system to oppose changes in frequency due to resistance provided by the kinetic energy of rotating masses connected to the system
- In practice, depends on how many and which generators and motors are connected to the power system

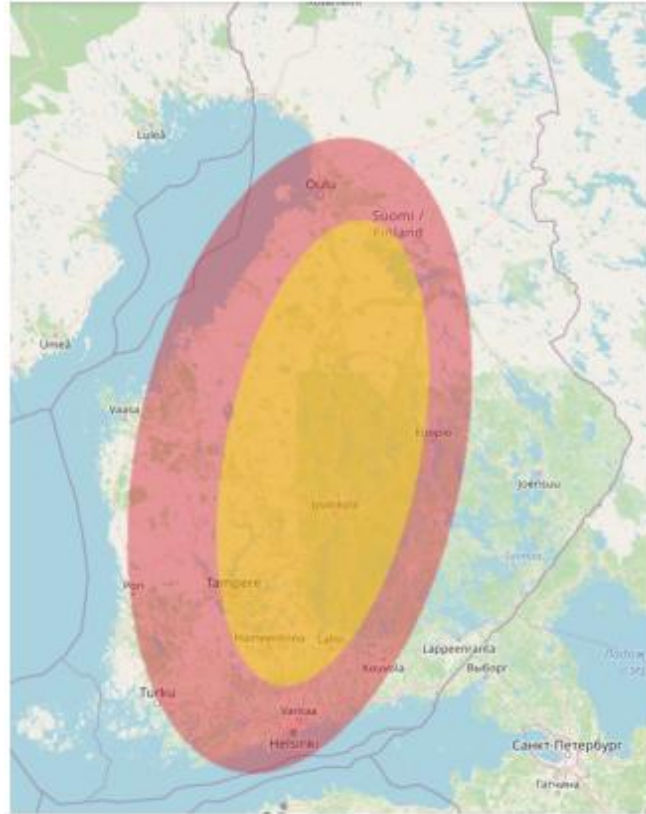


Pohjoismainen inertia aiemman verkkovision Tuulella vetyä -skenaariossa



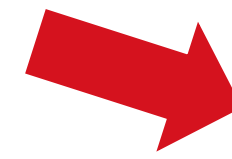
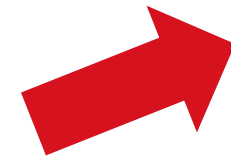
— 2021 — Tuulella vetyä 2035 — Tuulella vetyä 2045

Jännitekuopan leviäminen

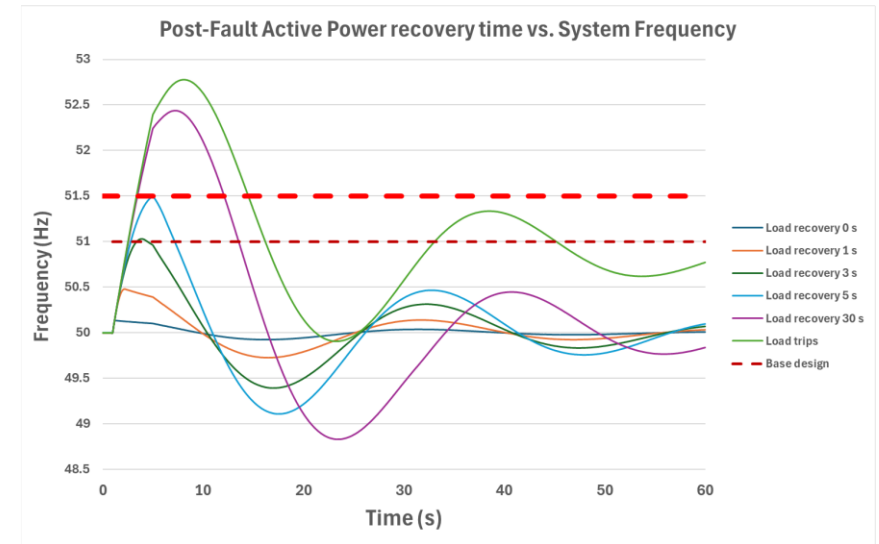


3v. Oikosulku 400 kV verkossa, jäännösjännite $U < 80\%$, 2025 keltainen, 2030 punainen

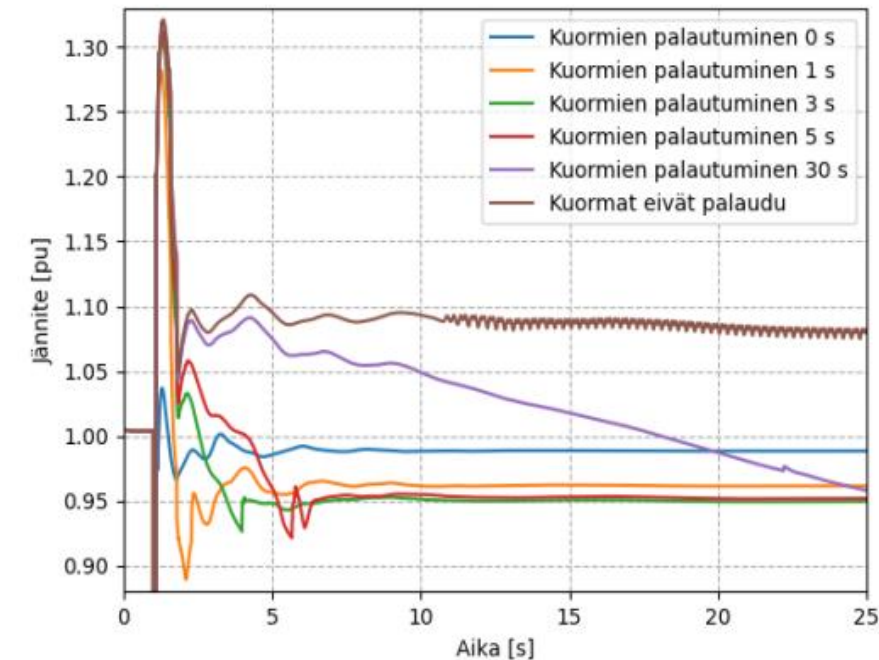
Uudentyyppisen kuorman vaikutukset



Taajuusstabiilius

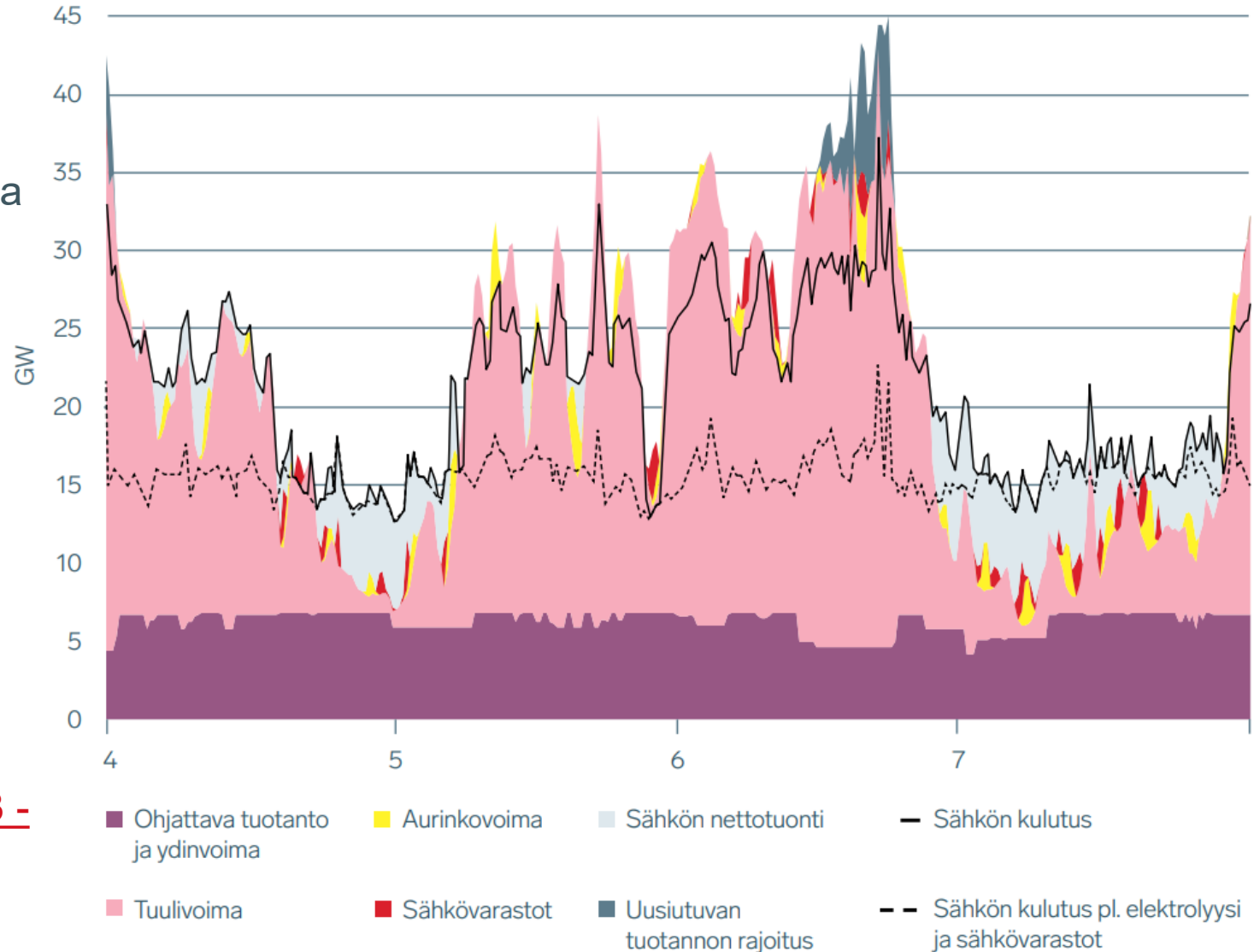


Jännitestabiilius



Esimerkki tulevaisuuden sähköjärjestelmän toiminnasta

Tuntikohtainen sähköntuotanto ja -kulutus Tuulella vetyä -skenaariossa tarkasteluvuoden 2035 neljällä talviviikolla



Lähde: [Sähköjärjestelmävisio 2023 - Fingrid](#)

Yhteenveto

Yhteenveto

- Suomen sähkönkulutuksen ja -tuotannon ja ennustetaan kasvavan voimakkaasti ja jopa moninkertaistuvan tulevina vuosikymmeninä – ennusteiden toteutuminen riippuu Suomen kilpailukyvästä
- Tulevina vuosina sähköverkkoihin on investoitava miljardien eurojen edestä -> Verkon kehittäminen mahdollistaa kymmenien miljardien investoinnit Suomeen
- Tulevaisuuden järjestelmän ominaisuudet poikkeavat voimakkaasti nykyjärjestelmästä – esim. suuret vaihtelut siirroissa, suuntaajavaltainen järjestelmä, uudentyyppinen kuorma. -> Tarvitaan uusia teknisiä ratkaisuja, joustoja sekä uusia markkinaratkaisuja.



Kiitos!