

WE ARE



LUT



— IKÄÄNTYVIEN YLIOPISTO

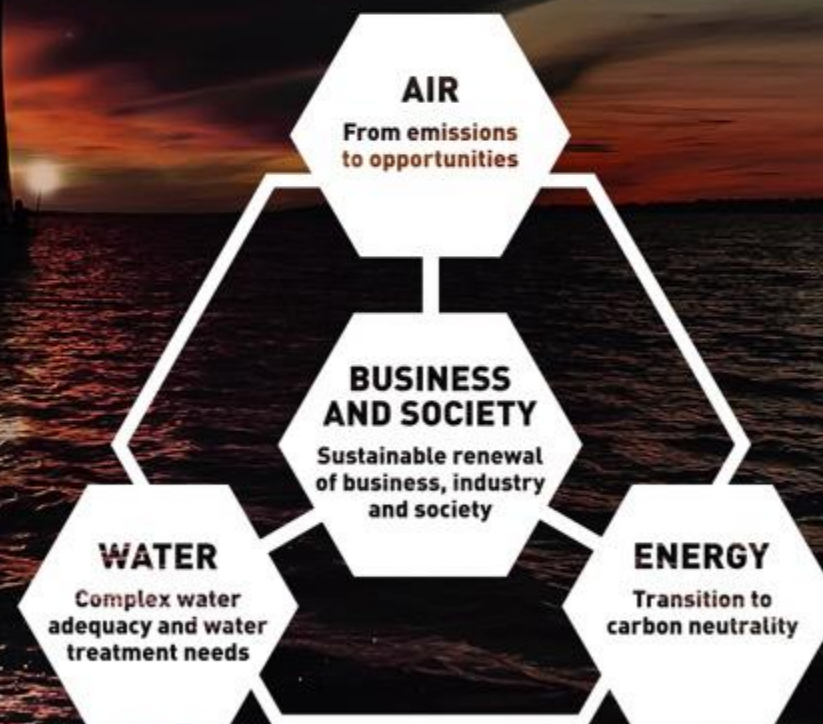
ENERGIAJÄRJESTELMÄ SUOMESSA JA POHJOISMAISSA

Ajat muuttuvat, tarpeet pysyvät

Juhani Hyvärinen, professori

LUT Yliopisto, Ydinvoimatekniikka

SYSTEM EARTH



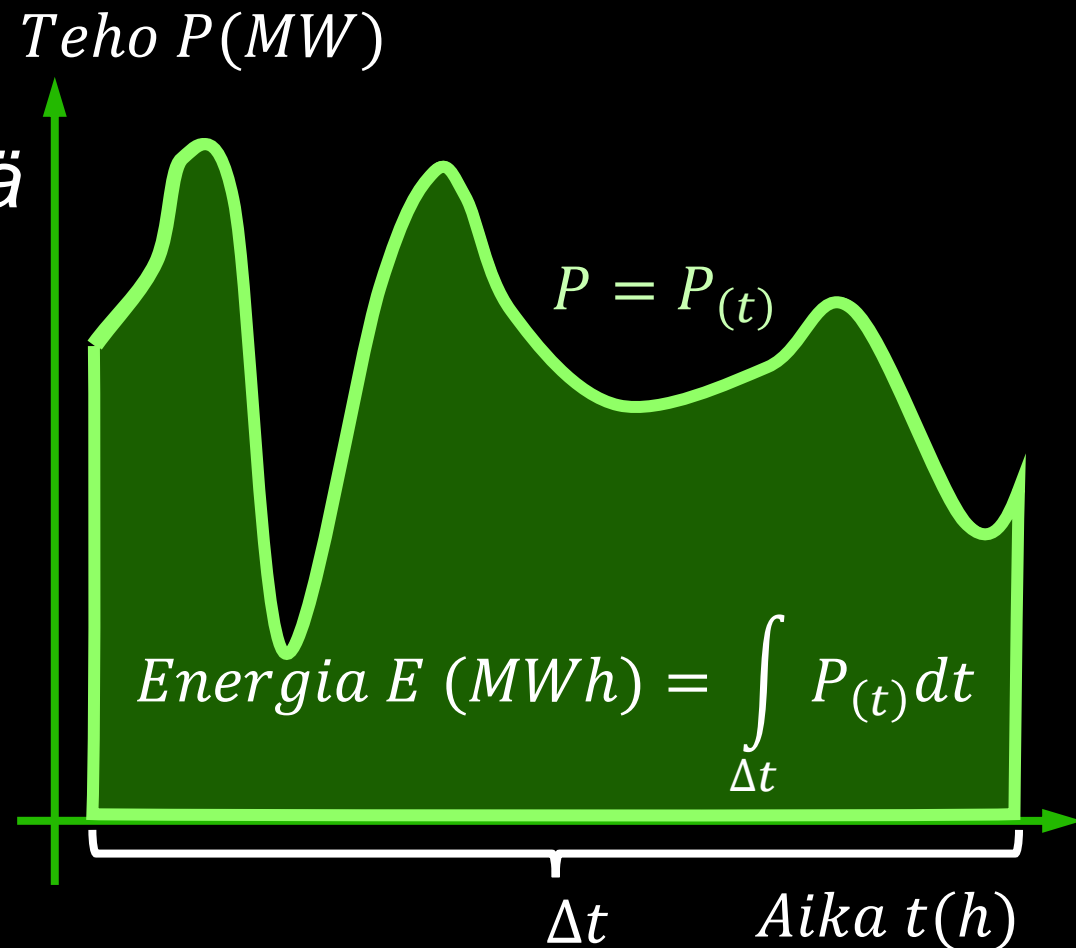


SISÄLTÖ

- »» Peruskäsitteet:
 - »» Energia ja teho
 - »» Lämpö, sähkö, liike
- »» Energiajärjestelmä
- »» Kulutus, tuotanto, jakelu
- »» Haasteita ja näkymiä
- »» Yhteenveto

ENERGIA JA TEHO

- »» Energia on *kykyä tehdä työtä*
 - »» Voi olla mekaanista, kemiallista, ydinfysikaalista, sähköistä
 - »» Työ on liikuttamista, lämmittämistä, valaisemista, koneen pitämistä käynnissä
- »» Teho on *energian* kulutus tai tuotanto *aikayksikköä kohti*

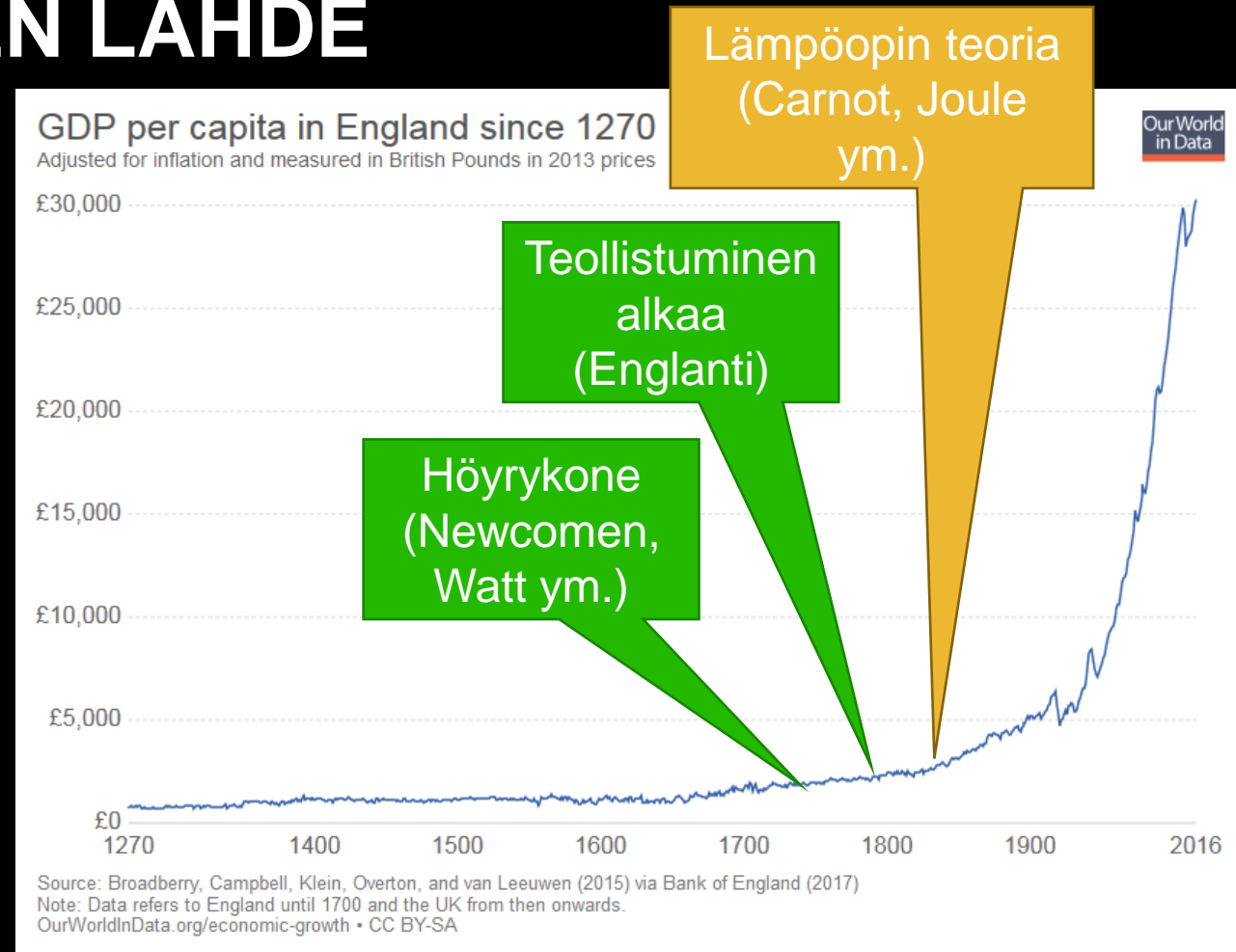


TÄRKEÄT ENERGIAMUODOT SUOMESSA

- » Sähkö – noin 80 TWh/vuosi
 - » Lämpö – noin 36 TWh/vuosi
 - » Liikennepolttoaineet – noin 42 TWh/vuosi
- » TWh = terawattitunti = 1 000 000 000 000
- T G M k Wh

ENERGIA ON VAURAUDEN LÄHDE

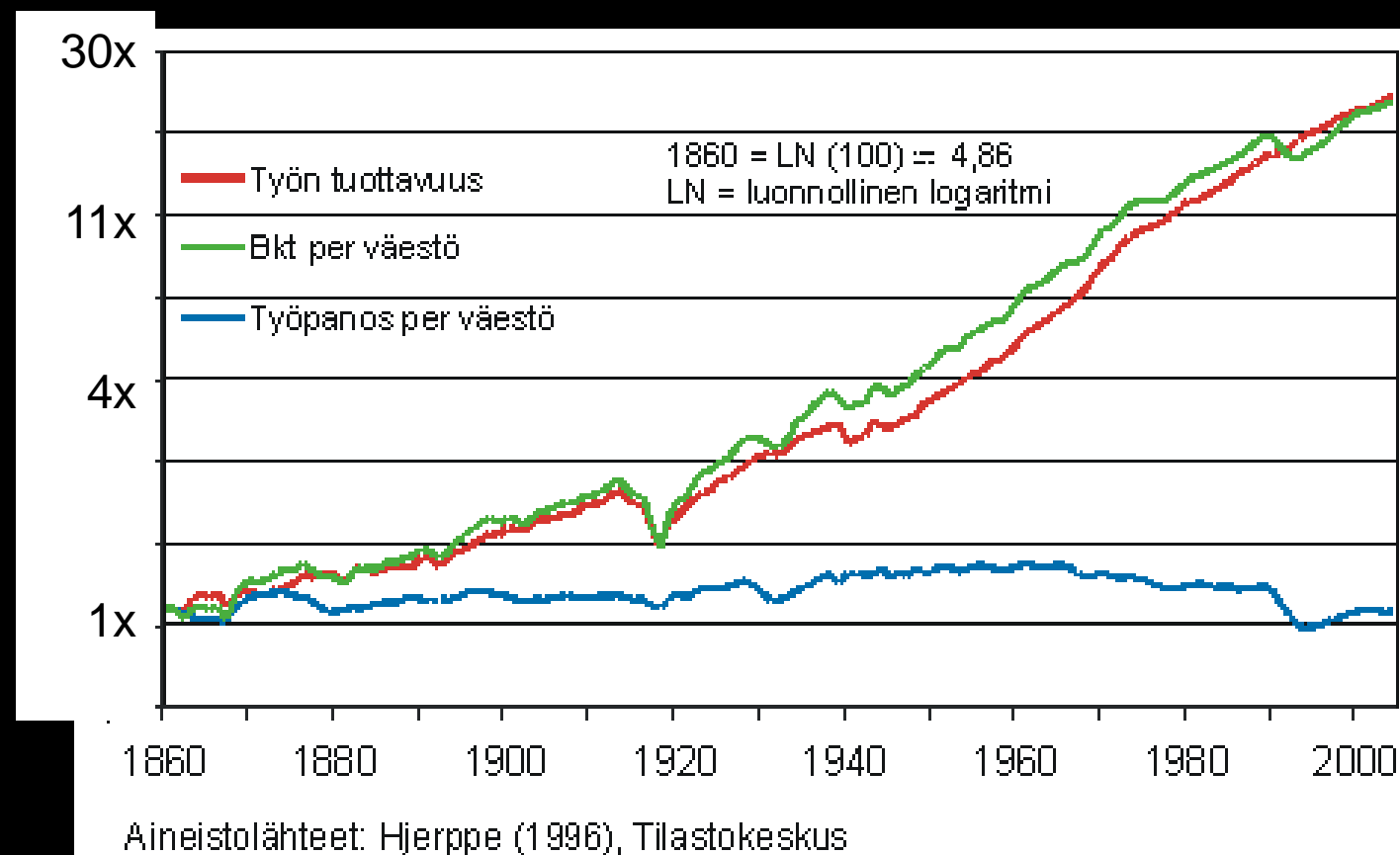
- » Teollisuusmaiden elintaso lepää ”voimakoneiden” varassa
- » Jokainen suomalainen työllistää n. 35 ”energiaorjaa” 24/7



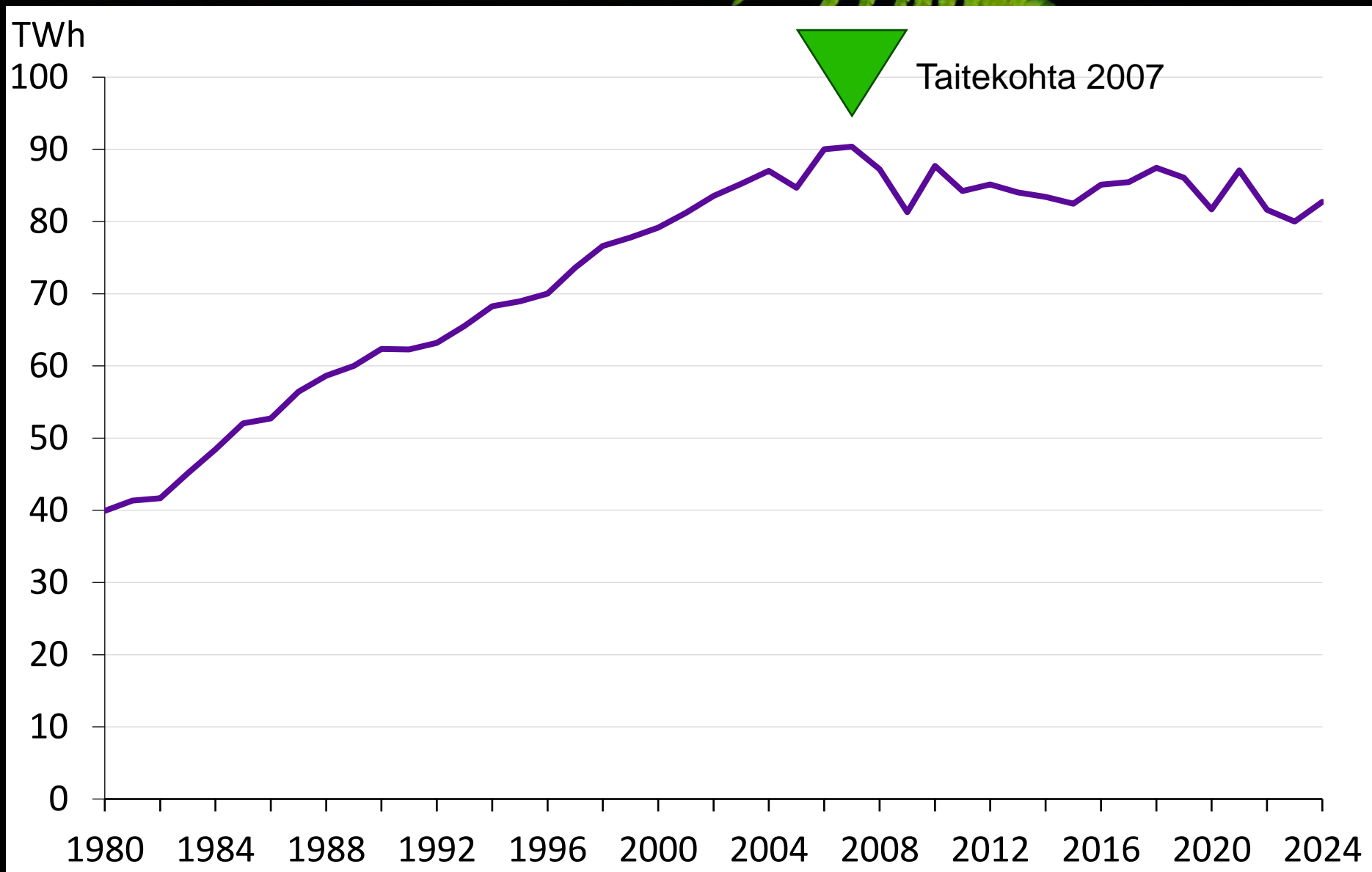
ENERGIA ON VAURAUDEN LÄHDE

Työn tuottavuuden kasvu (ja elintaso) seuraa energian kulutusta suoraan

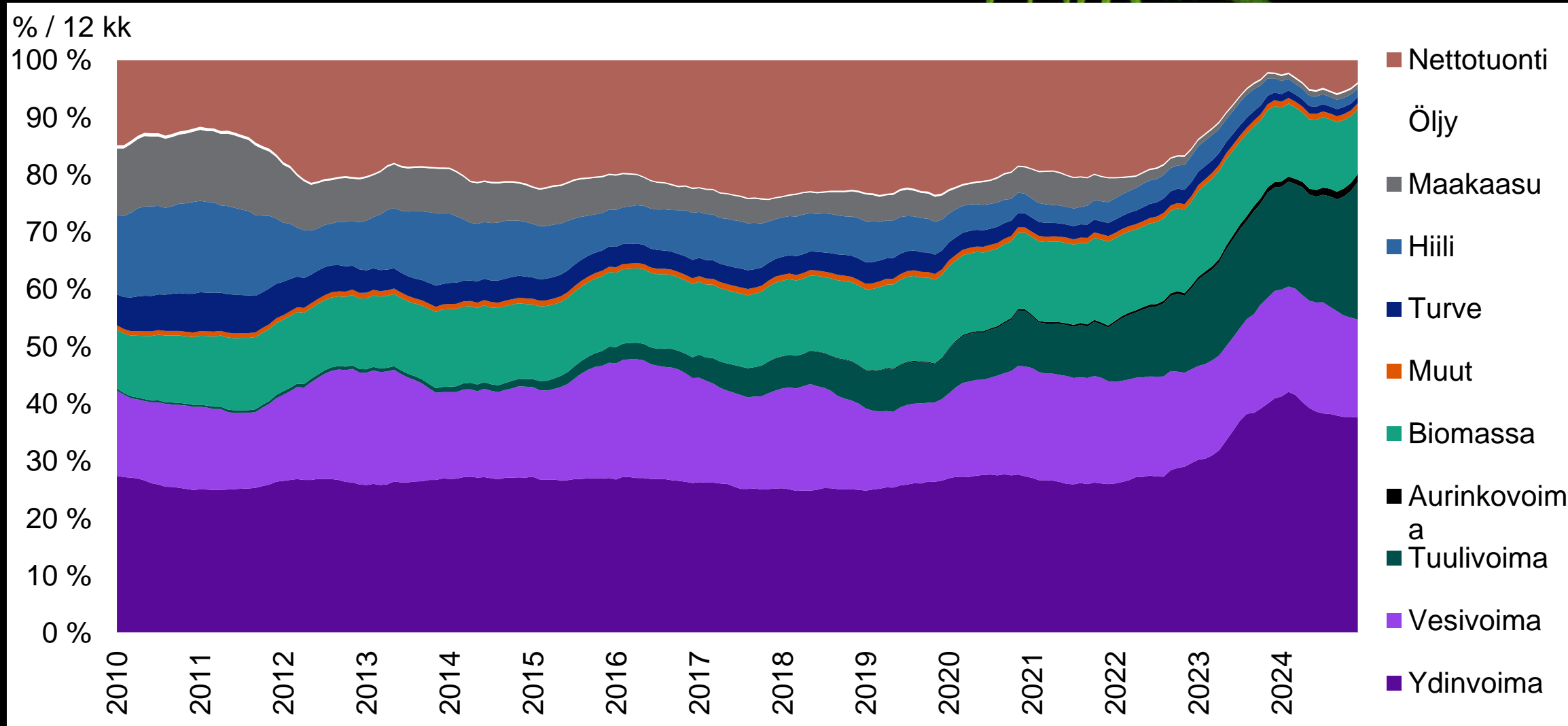
Energiajärjestelmän pitää kattaa kulutus



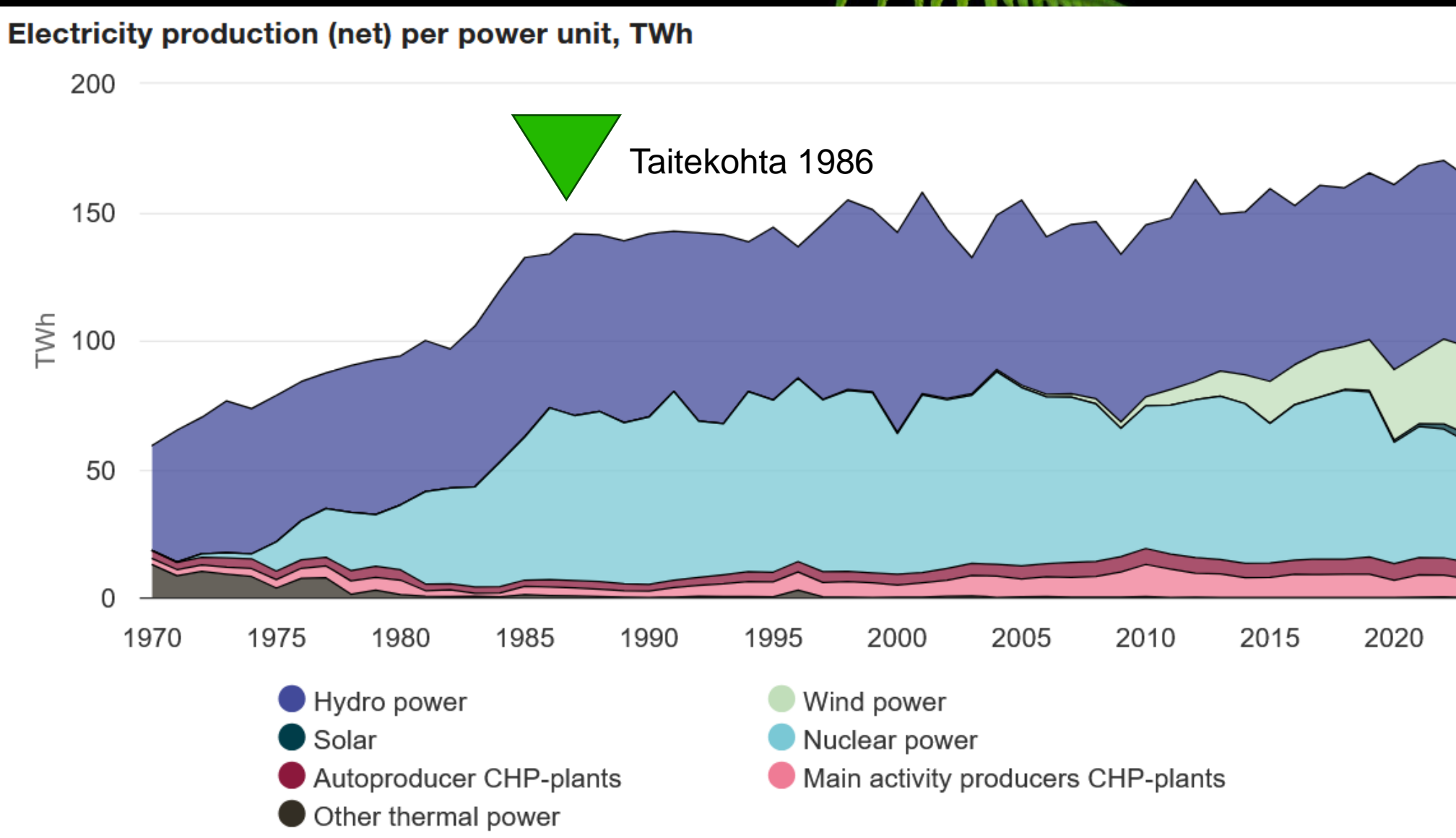
SÄHKÖNKULUTUS SUOMESSA 1980-2024



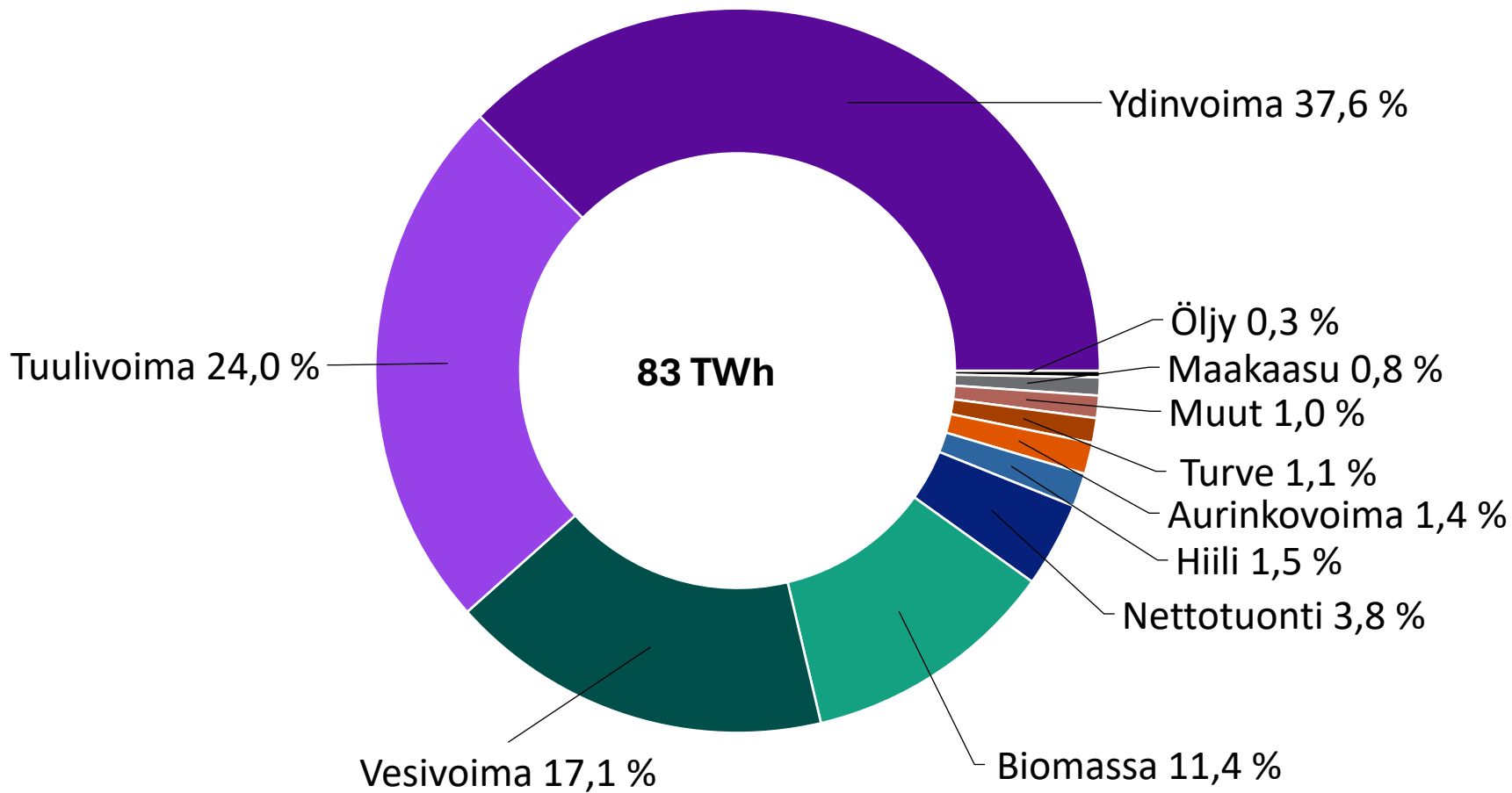
SÄHKÖN TUOTANTORAKENTTEEN MUUTOS SUOMESSA



SÄHKÖNTUOTANTO RUOTSISSA 1970-2024

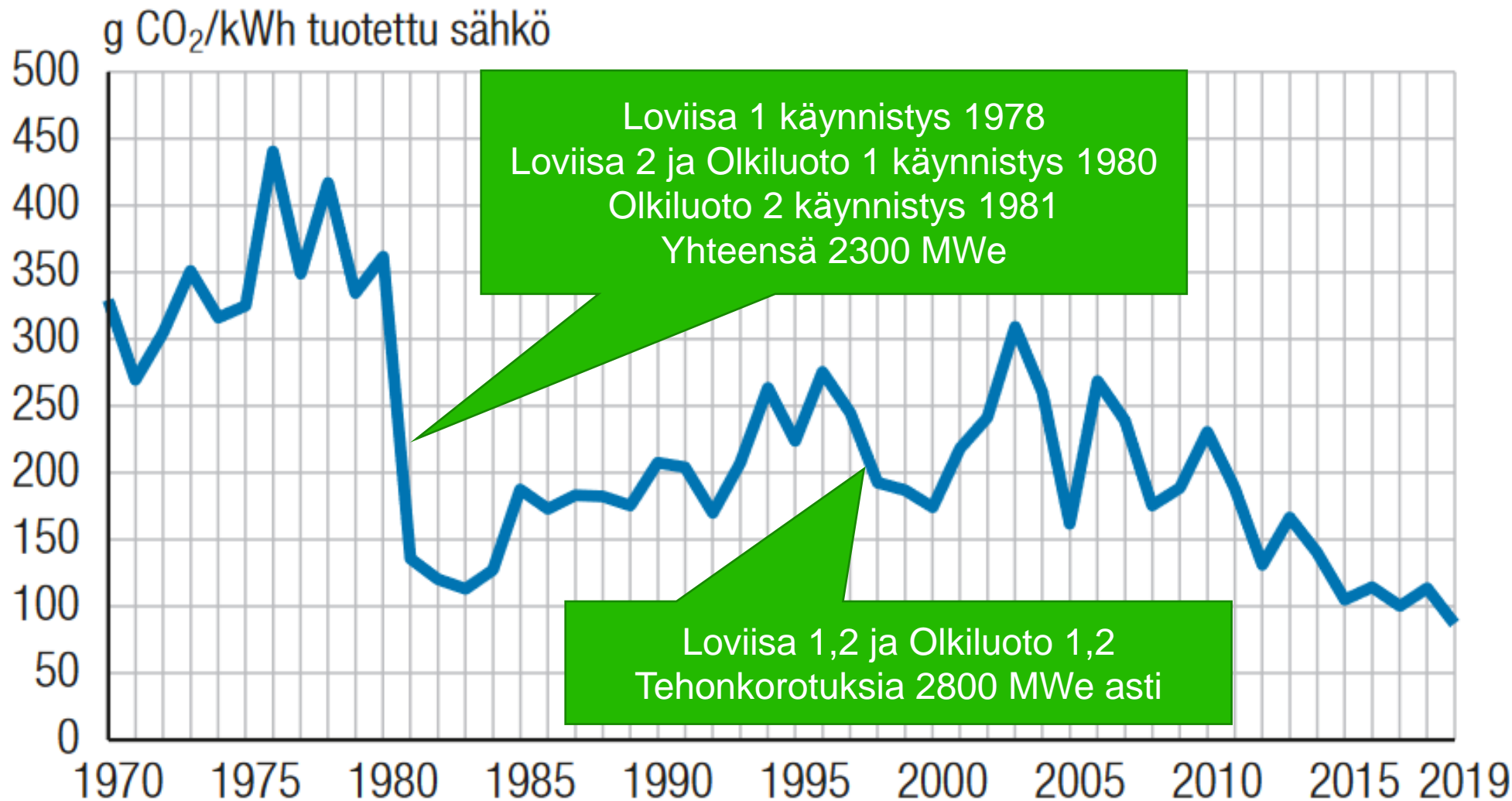


SÄHKÖNTUOTANTO SUOMESSA 2024



SUOMEN SÄHKÖ ON PUHDASTA

Ydinvoimalla tuotettu kasvihuonekaasupäästöjen vähennys on yhteensä noin 350 gCO₂/kWh,e



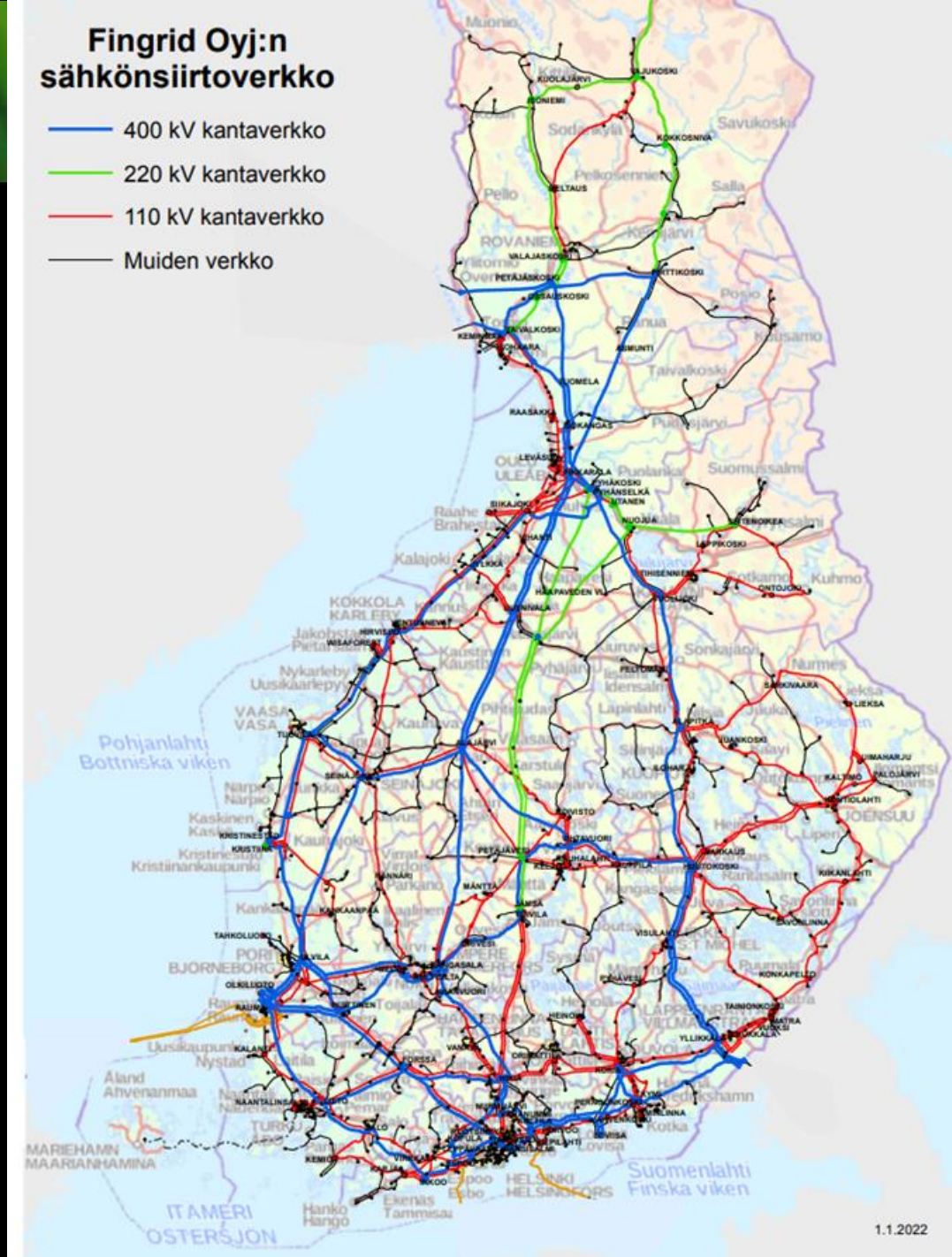
SÄHKÖN SIIRTO

Pelkkä tuotanto ei riitä.
Sähkö myös pitää tuoda
kuluttajille

Valtakunnanverkossa yksi
400 kV johto siirtää
enintään 1000 MW tehon

Fingrid Oyj:n sähkönsiirtoverkko

- 400 kV kantaverkko
- 220 kV kantaverkko
- 110 kV kantaverkko
- Muiden verkko



Ylä-Satakunta –
lehti,
Energieateollisuus

SÄHKÖN PAIKALLISSIIRTO

Valtakunnanverkosta sähkö siirtyy paikallisverkkoihin (20 kV) ja lopulta pienkuluttajille 230 V jännitteellä

Siirtoverkot ovat ”luonnollinen monopoli” ja se näkyy

<https://lappeenrannanenergiaverkot.kehittamissuunnitelma.fi/>

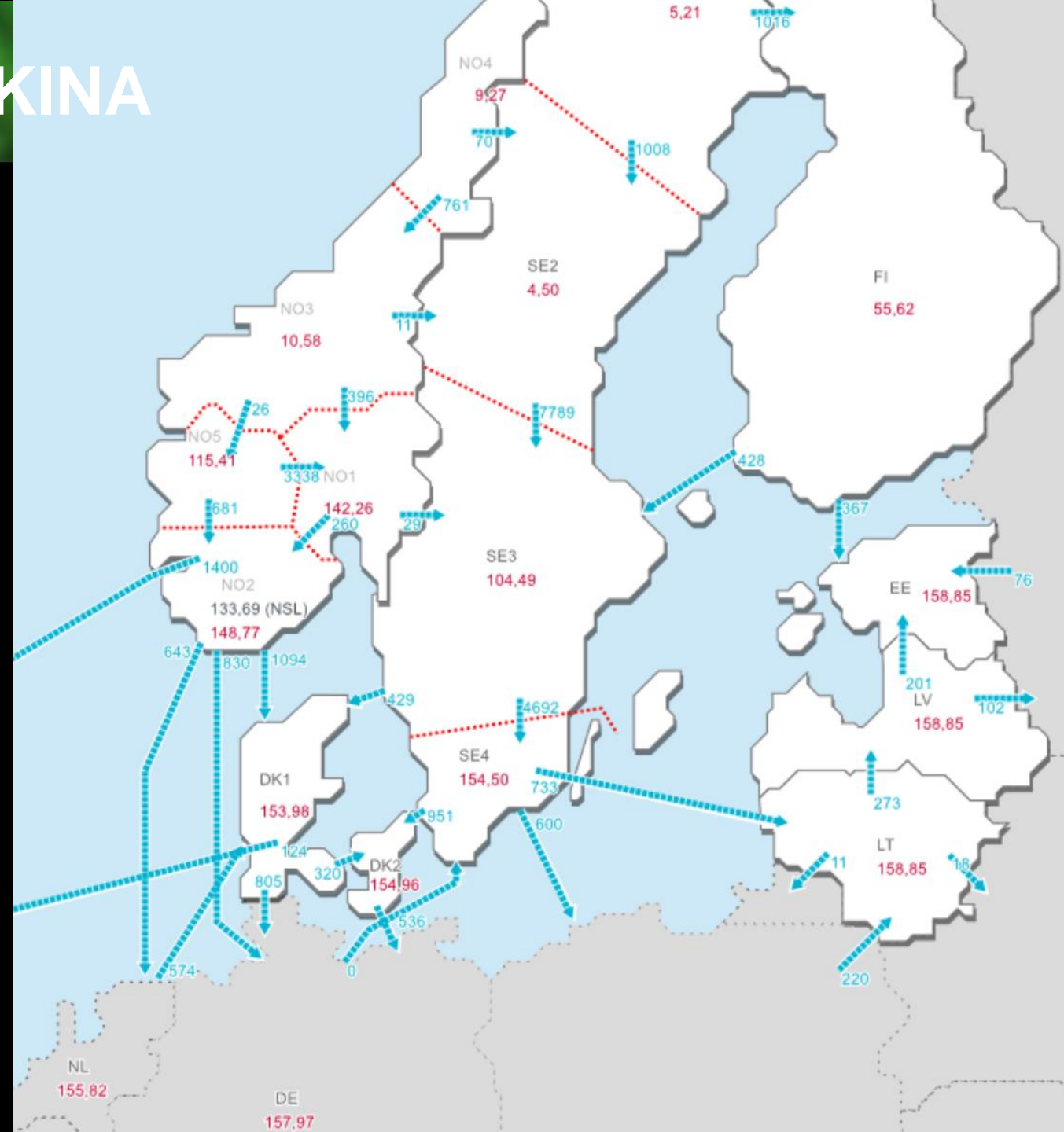
POHJOISMAINEN MARKKINA

— Euroopan sähkömarkkinoilla on noin 50 hinta-aluetta

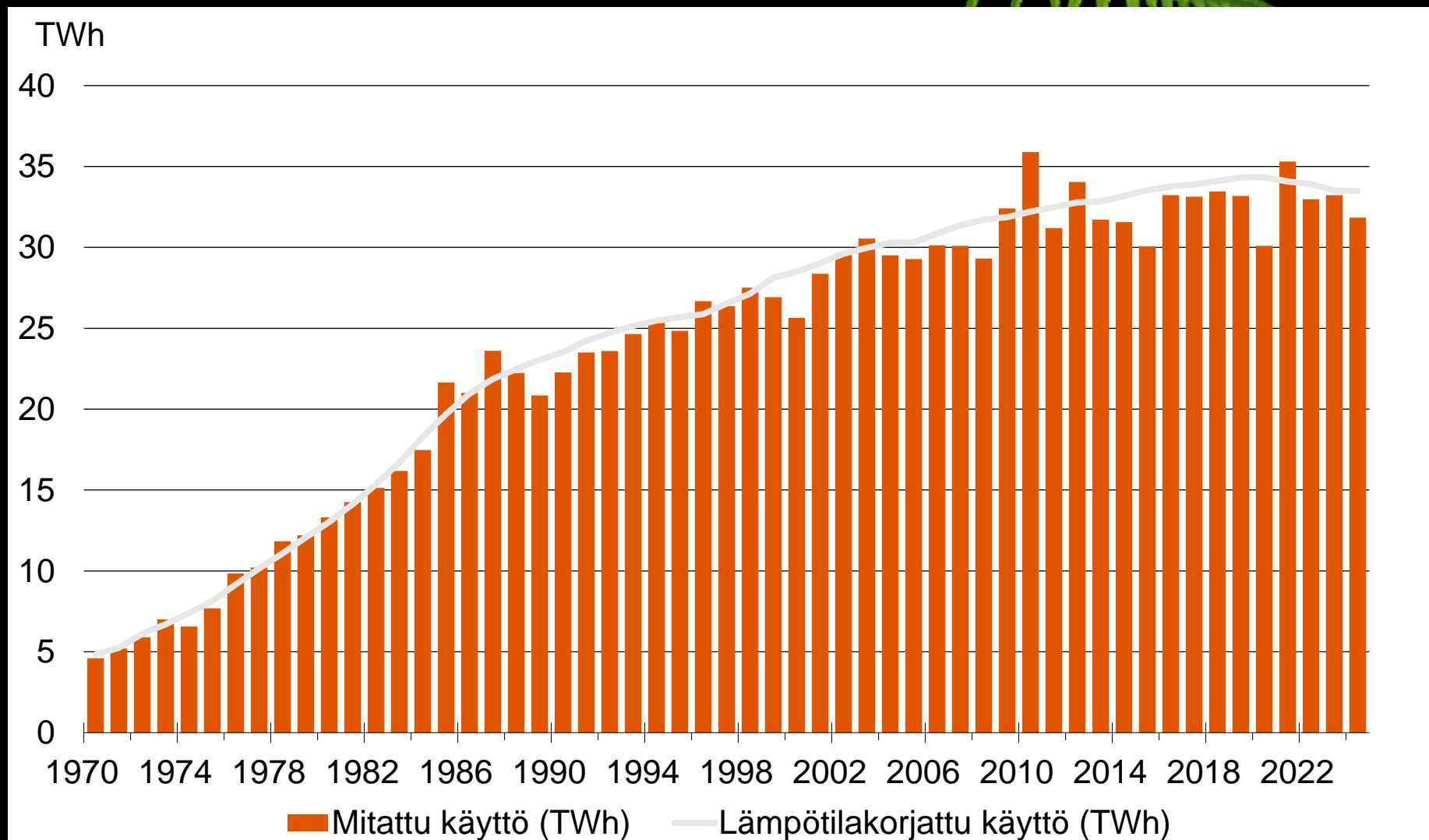
- » Suomi, 1 alue
- » Ruotsi, 4
- » Norja, 5
- » Tanska, 2

Sähkö siirtyy yleensä korkean hinnan suuntaan; siirtokapasiteetti rajoitettua

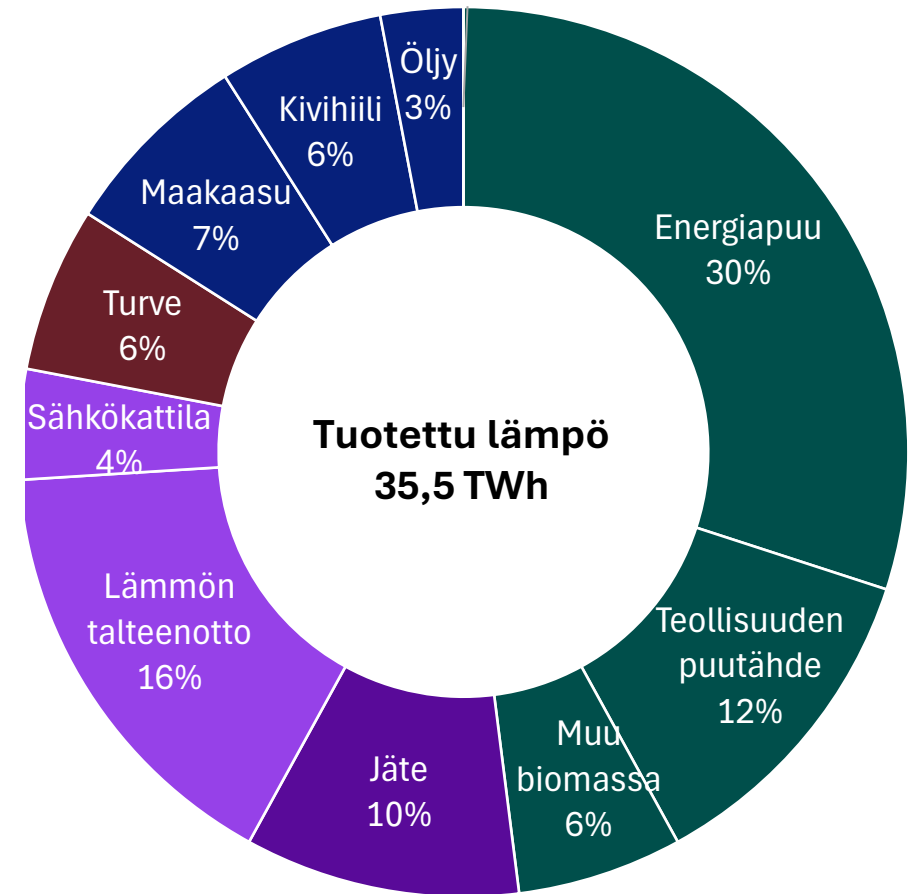
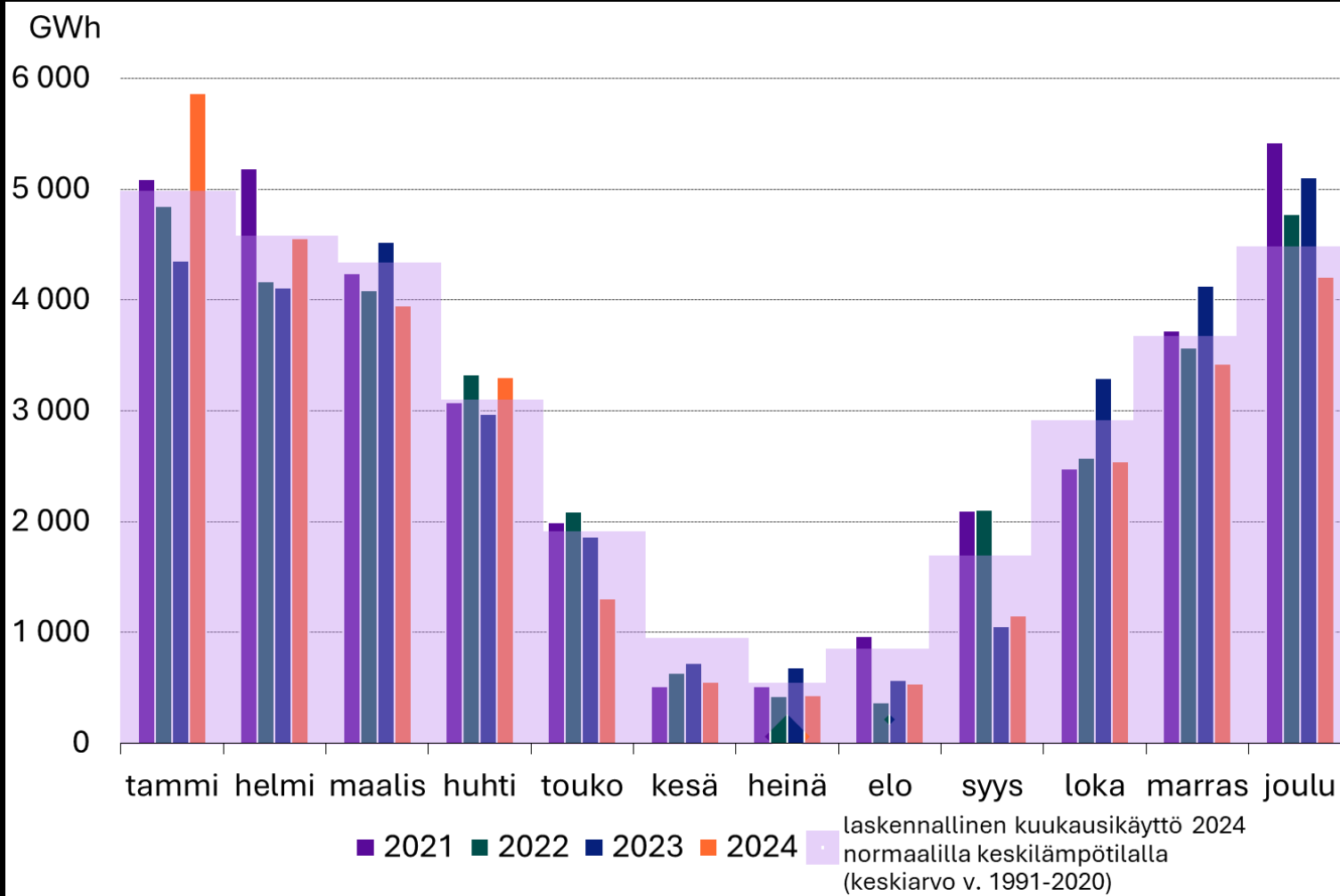
<https://www.statnett.no/en/for-stakeholders-in-the-power-industry/data-from-the-power-system/>



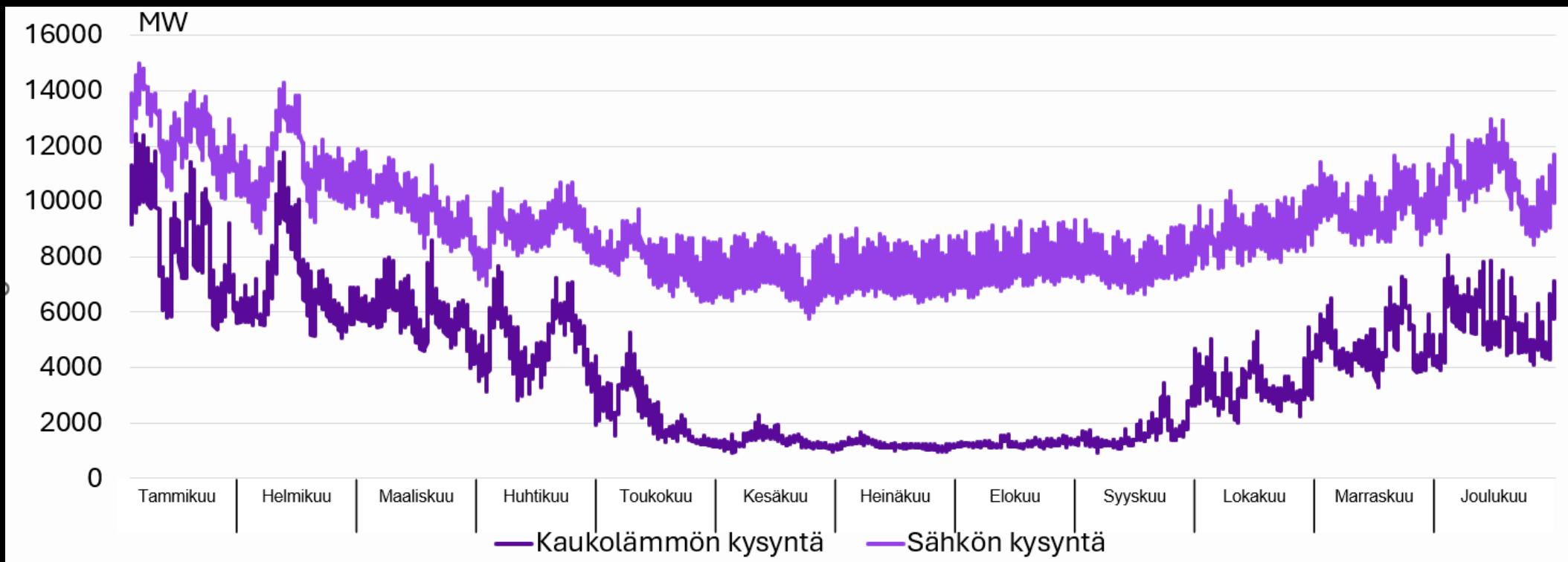
KAUKOLÄMMÖN TUOTANTO SUOMESSA 1970-



KAUKOLÄMMÖN TUOTANTO SUOMESSA 2024

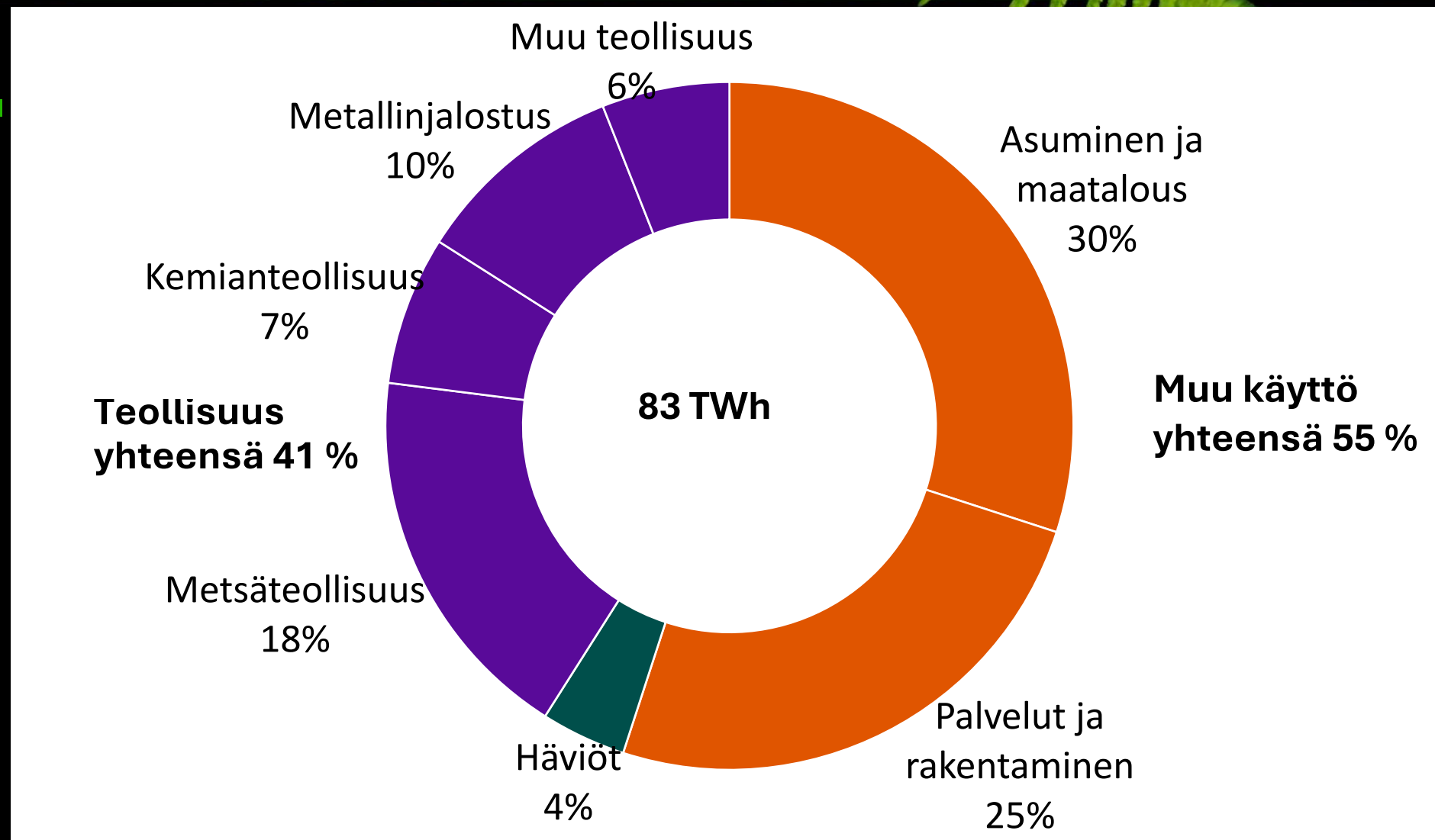


LÄMPÖ JA SÄHKÖ KULKEVAT YHDESSÄ



- Sähkön ja lämmön yhteistuotannossa (CHP) oli järkeä
- Kylminä aikoina molempia tarvitaan paljon

SÄHKÖNKULUTUS SUOMESSA 2024

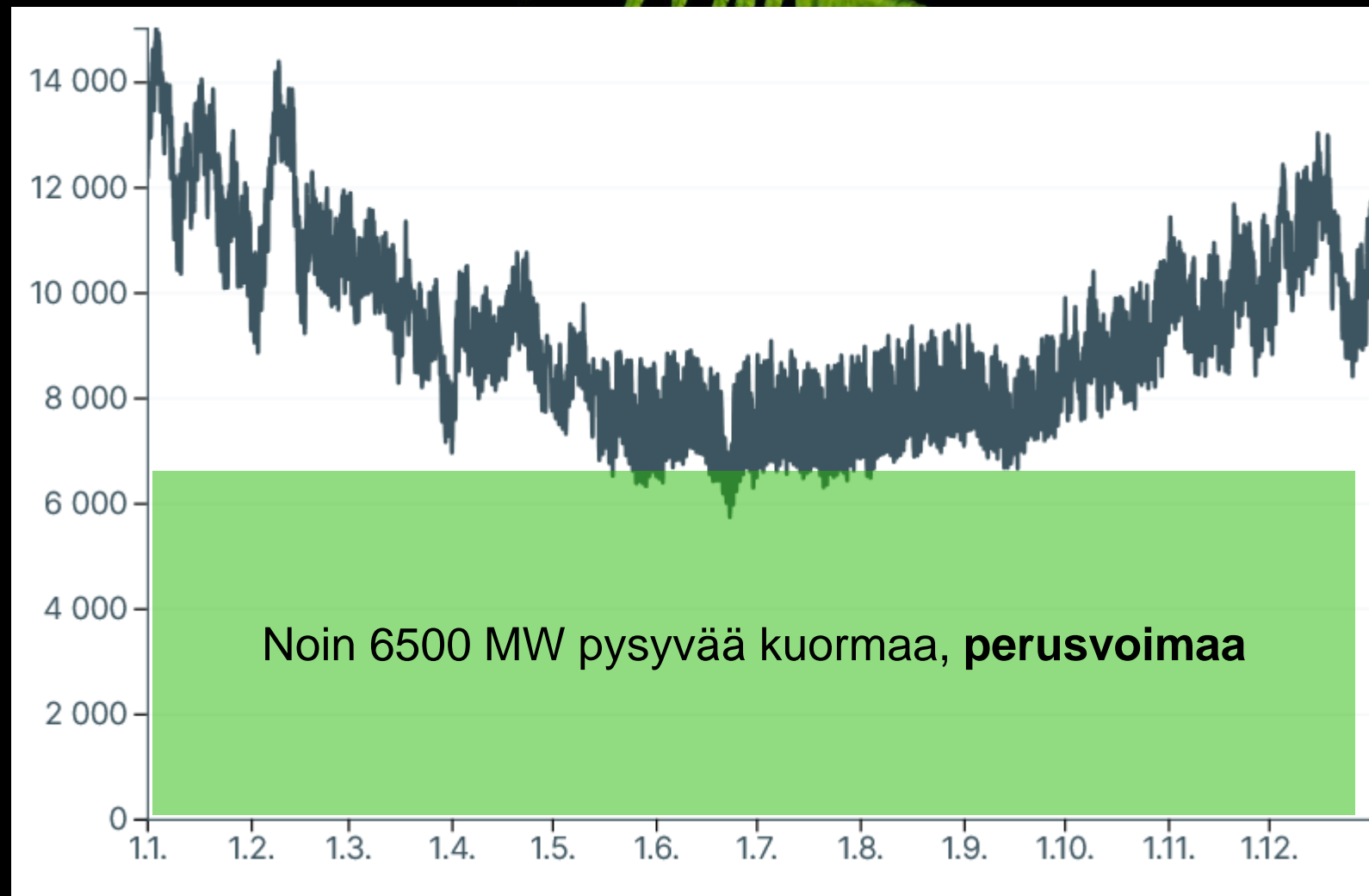


SÄHKÖNTEHON TARVE SUOMESSA 2024

Taso seuraa
ulkoilman
lämpötilaa

Yö-päivä –vaihtelu
on vakio 2000 MW

Kulutus ja tuotanto
tasapainotettava
joka hetki

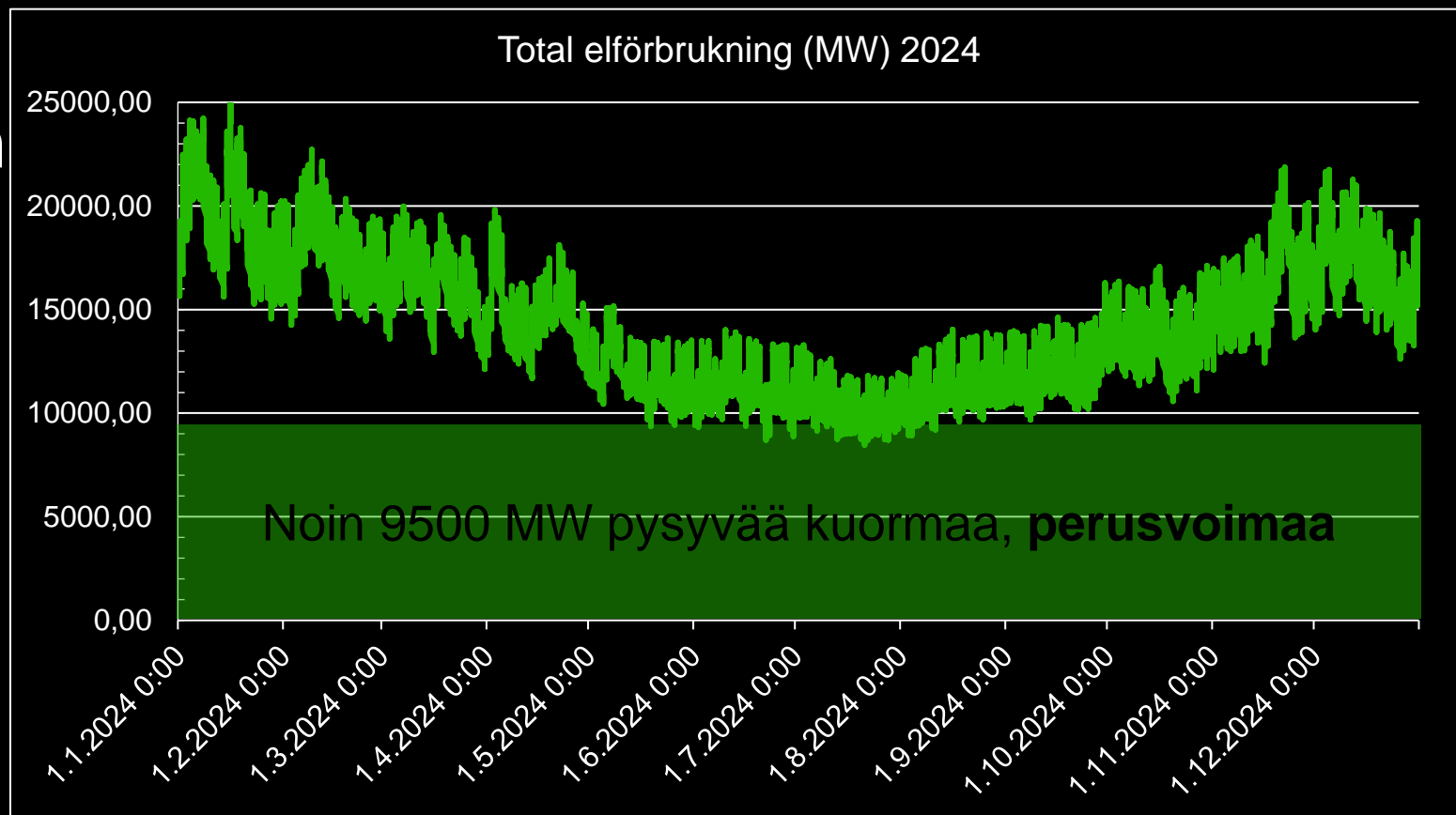


SÄHKÖNTEHON TARVE RUOTSISSA 2024

Taso seuraa ulkoilman
lämpötilaa sielläkin

Yö-päivä –vaihtelu on
~vakio 4000 MW

Talvi/kesä –suhde
sama kuin meillä

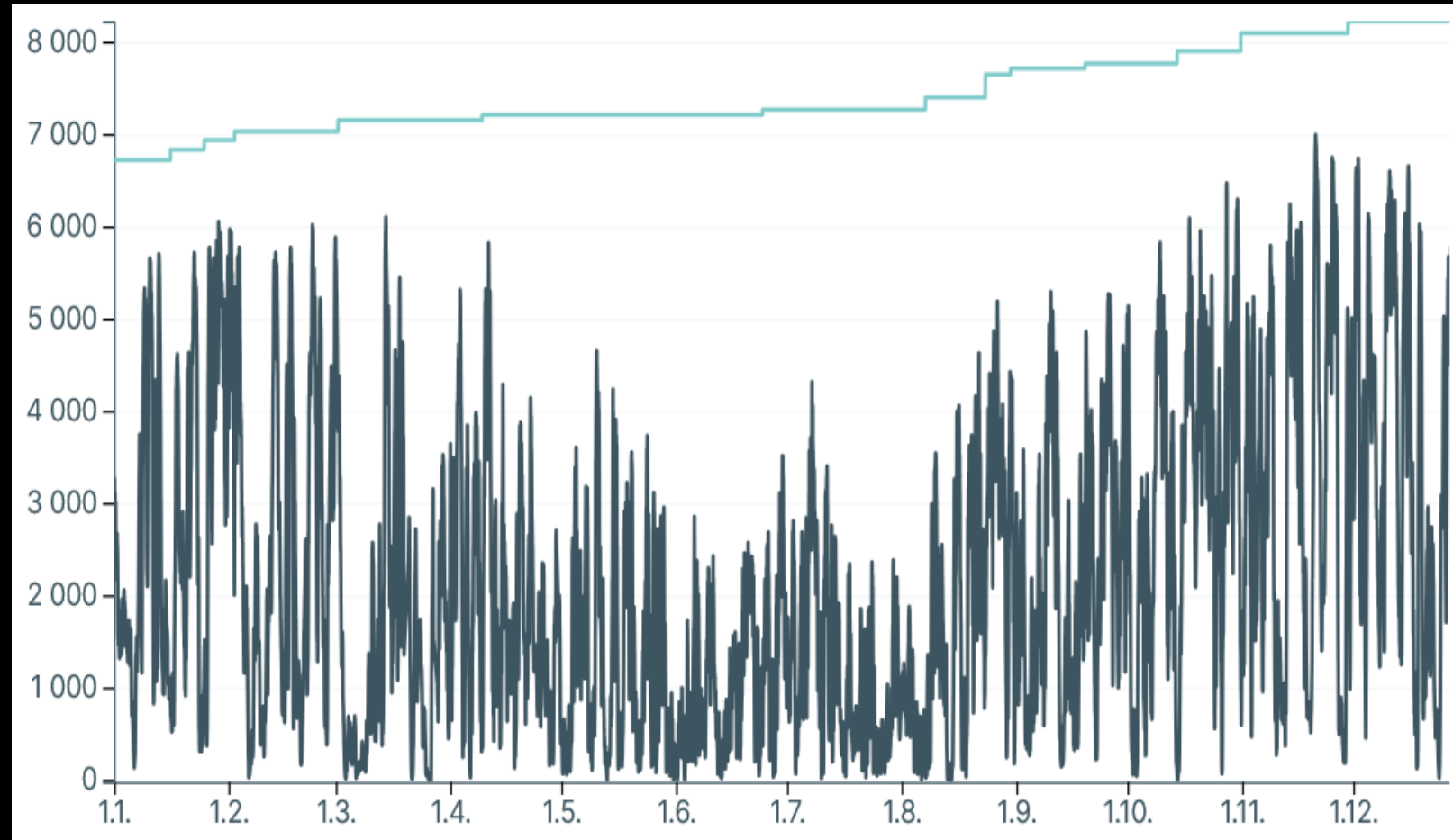


Raakadata <https://www.svk.se/om-kraftsystemet/kraftsystemdata/elstatistik/>

Norja <https://www.statnett.no/en/for-stakeholders-in-the-power-industry/data-from-the-power-system/#production-and-consumption>

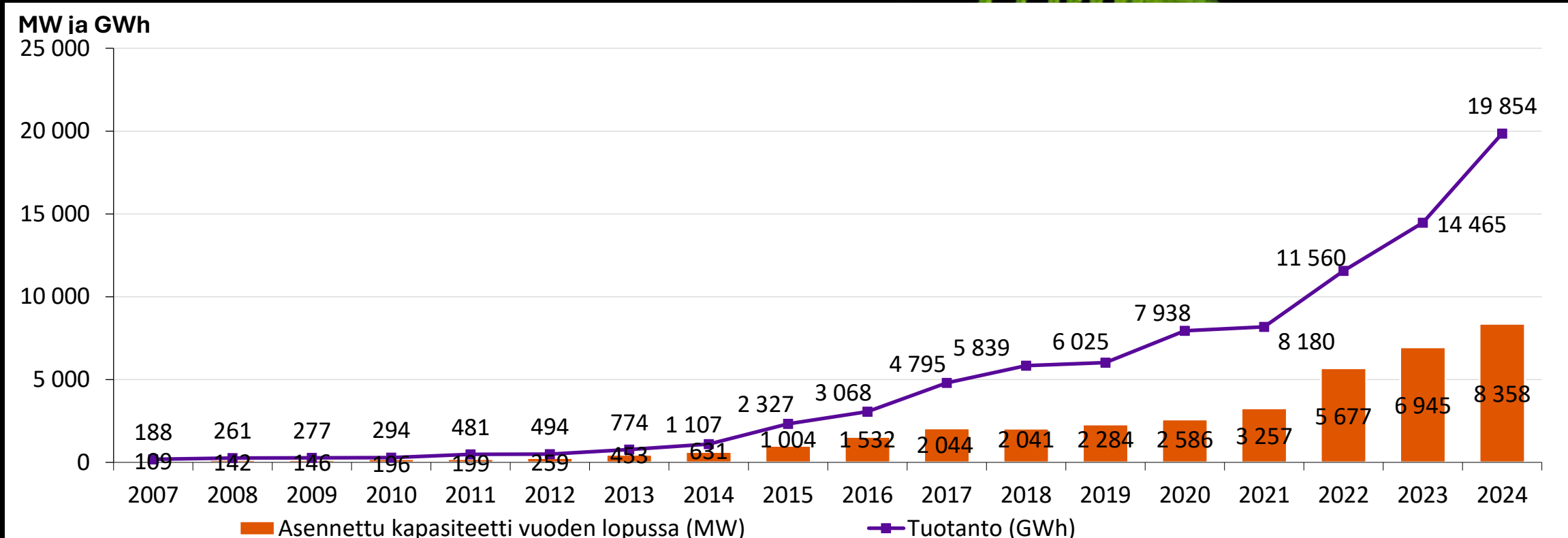
TUULISÄHKÖN TUOTANTO (MW) SUOMESSA 2024

Kapasiteettia
keskim. 7400 MW
Tuotantomaksimi
7000 MW
Keskimääräinen
tuotanto 2200 MW



<https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinainformaatio/tuulivoiman-tuotanto/>

TUULISÄHKÖN HISTORIA SUOMESSA 2024



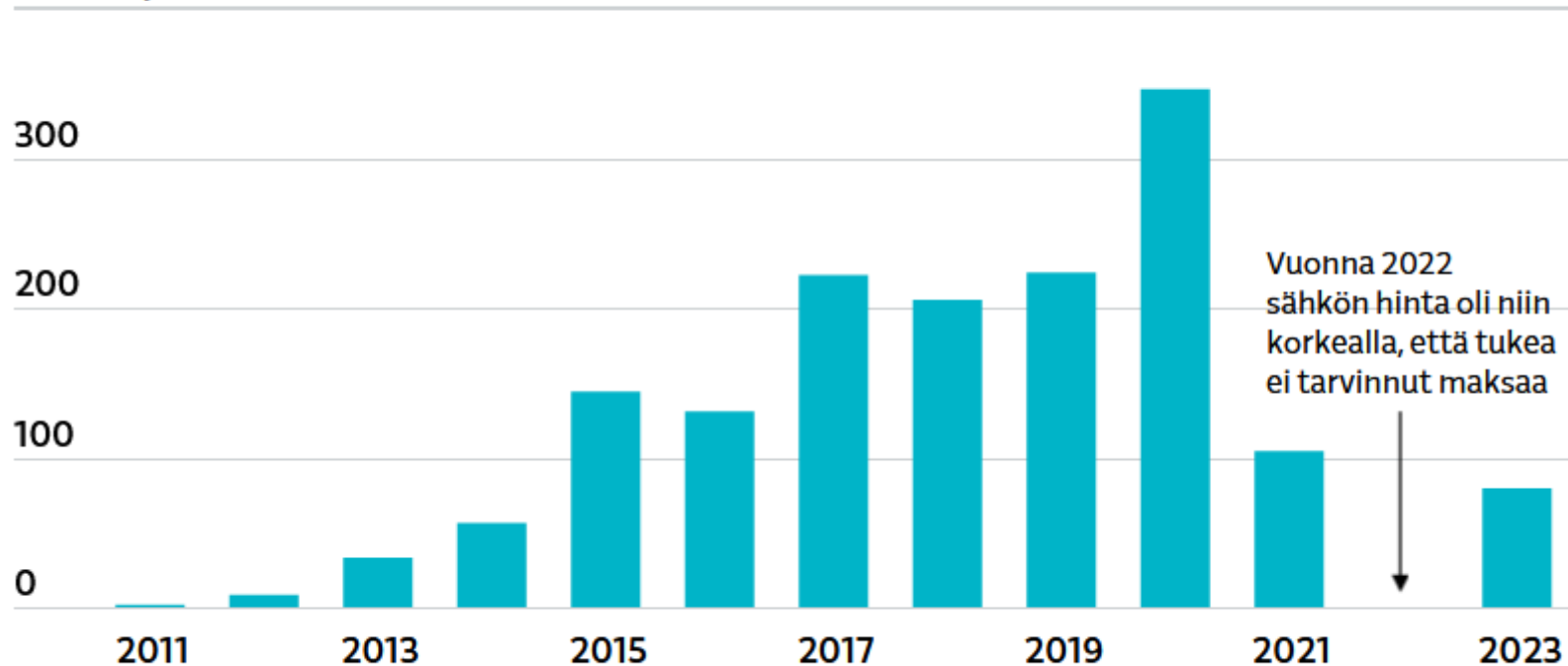
Ensimmäiset 2500 MW tuulivoimaan saivat tuotantotukea 83 €/MWh 12 vuoden ajan. Loppujen noin 6000 MW:n rakentaminen maksetaan tuotoilla, järjestelmävaikutuksia ei.

Tuulivoiman rakentaminen on osaltaan vähentänyt sähköntuotannon kasvihuonekaasupäästöjä noin 50 gCO₂/kWh,e.

Energiateollisuus, Sähkövuosi 2024

Tuulivoimalle maksetut syöttötariffit vuosittain

400 milj. €



Vuonna 2022
sähkön hinta oli niin
korkealla, että tukea
ei tarvinnut maksaa

Lähde: Energiavirasto, grafiikka: Samuli Huttunen / Yle

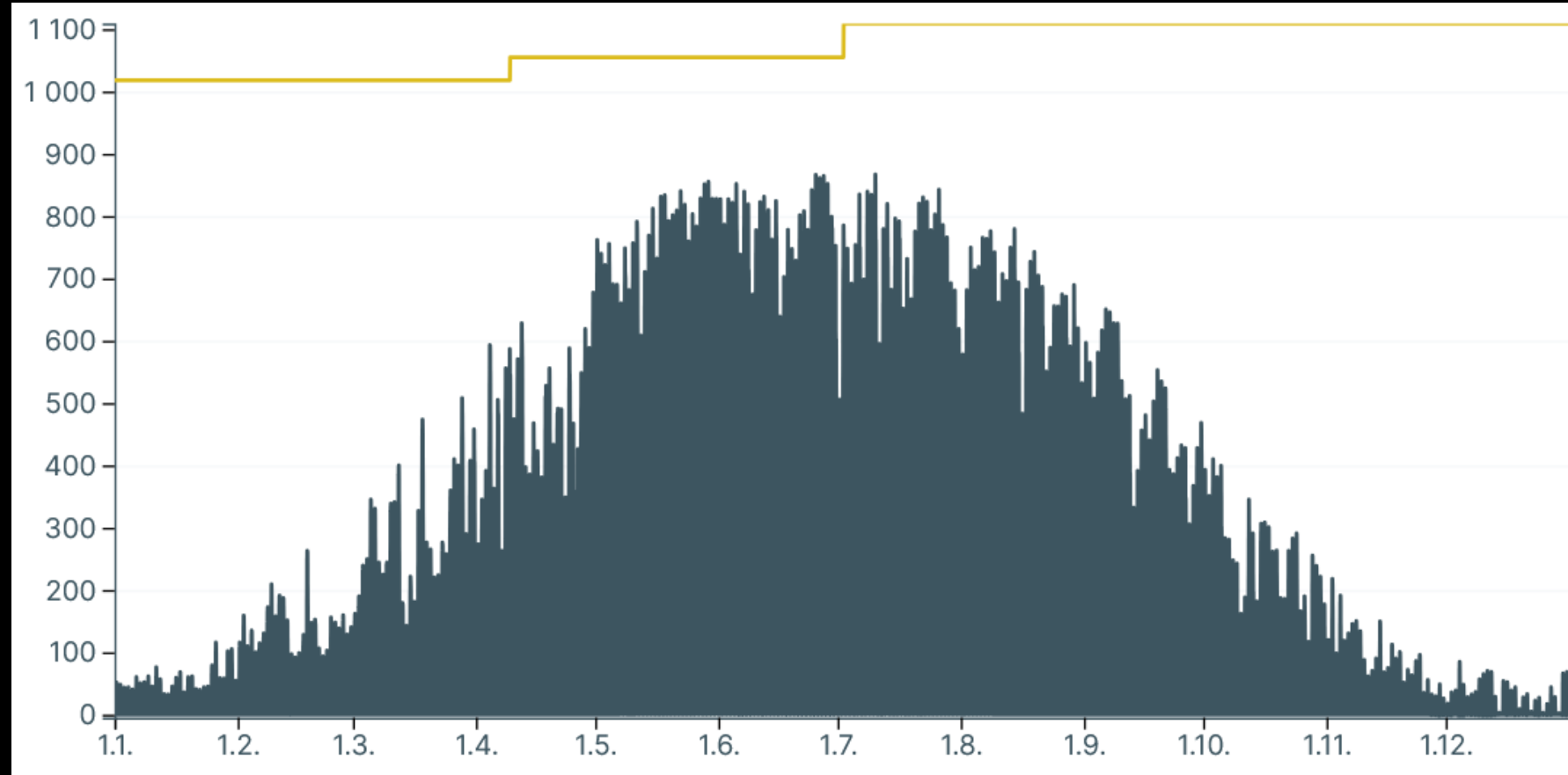
<https://yle.fi/a/74-20072141>

AURINKOSÄHKÖN TUOTANTO (MW), SUOMI 2024

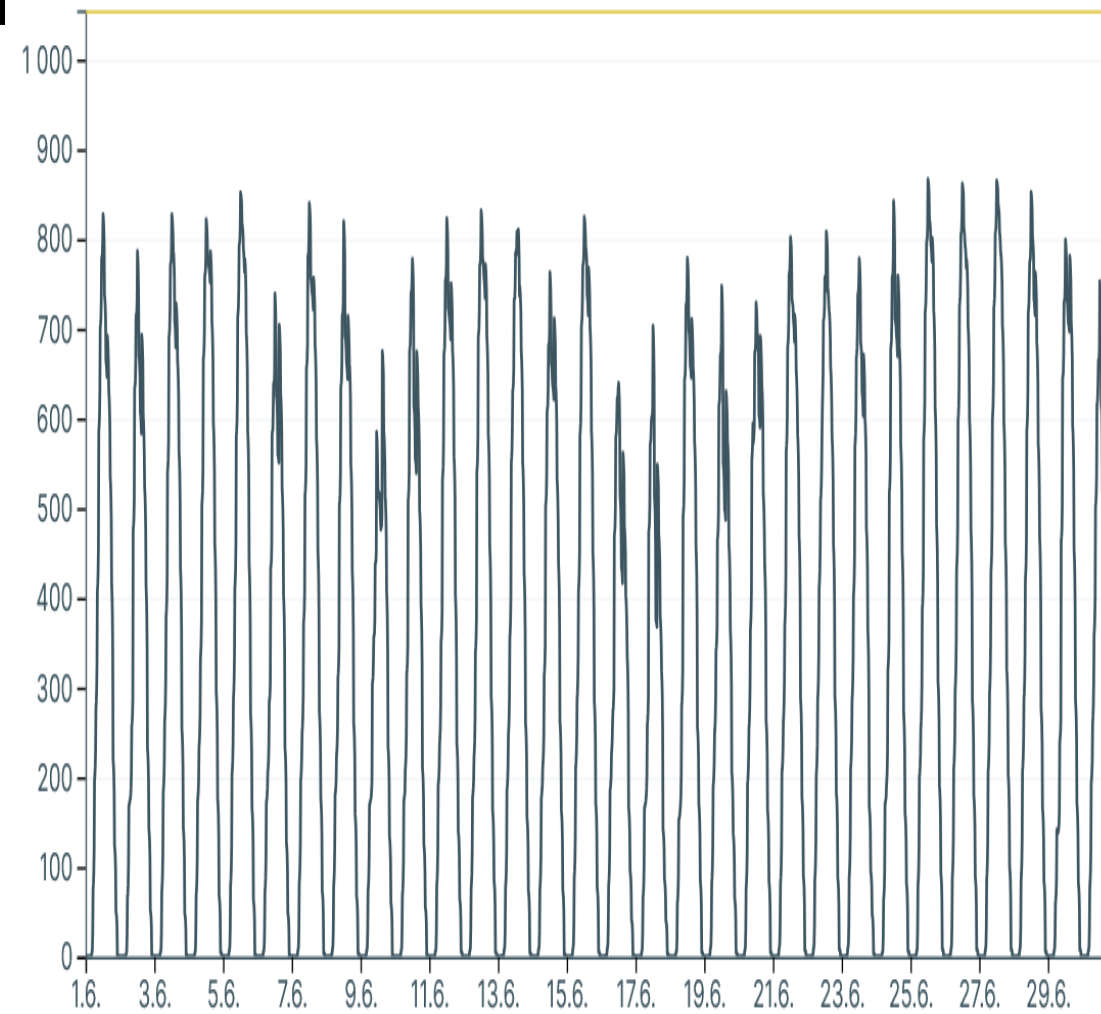
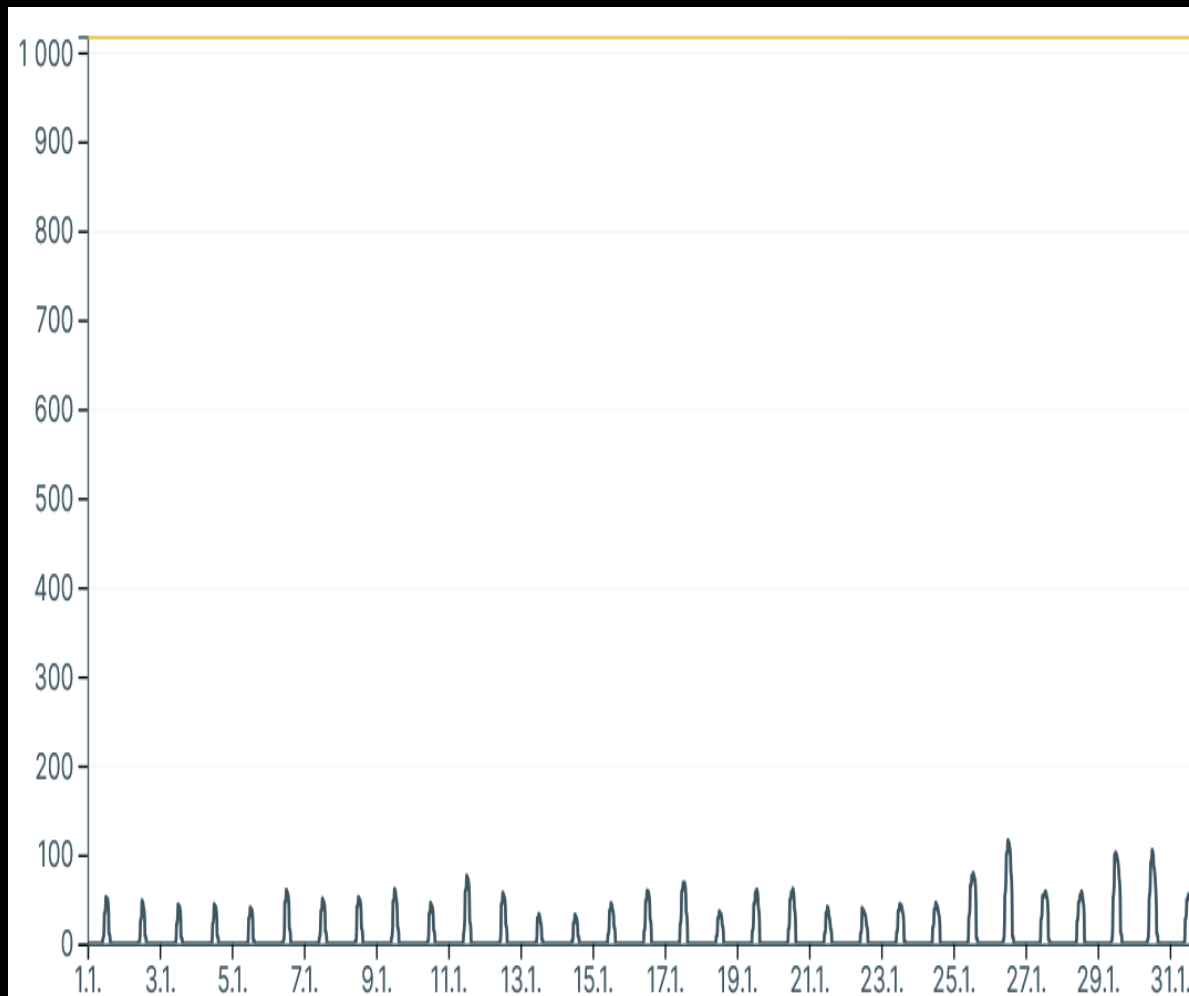
Kapasiteettia
noin 1100 MW

Tuotanto-
maksimi
867 MW

Keskiarvo
137 MW

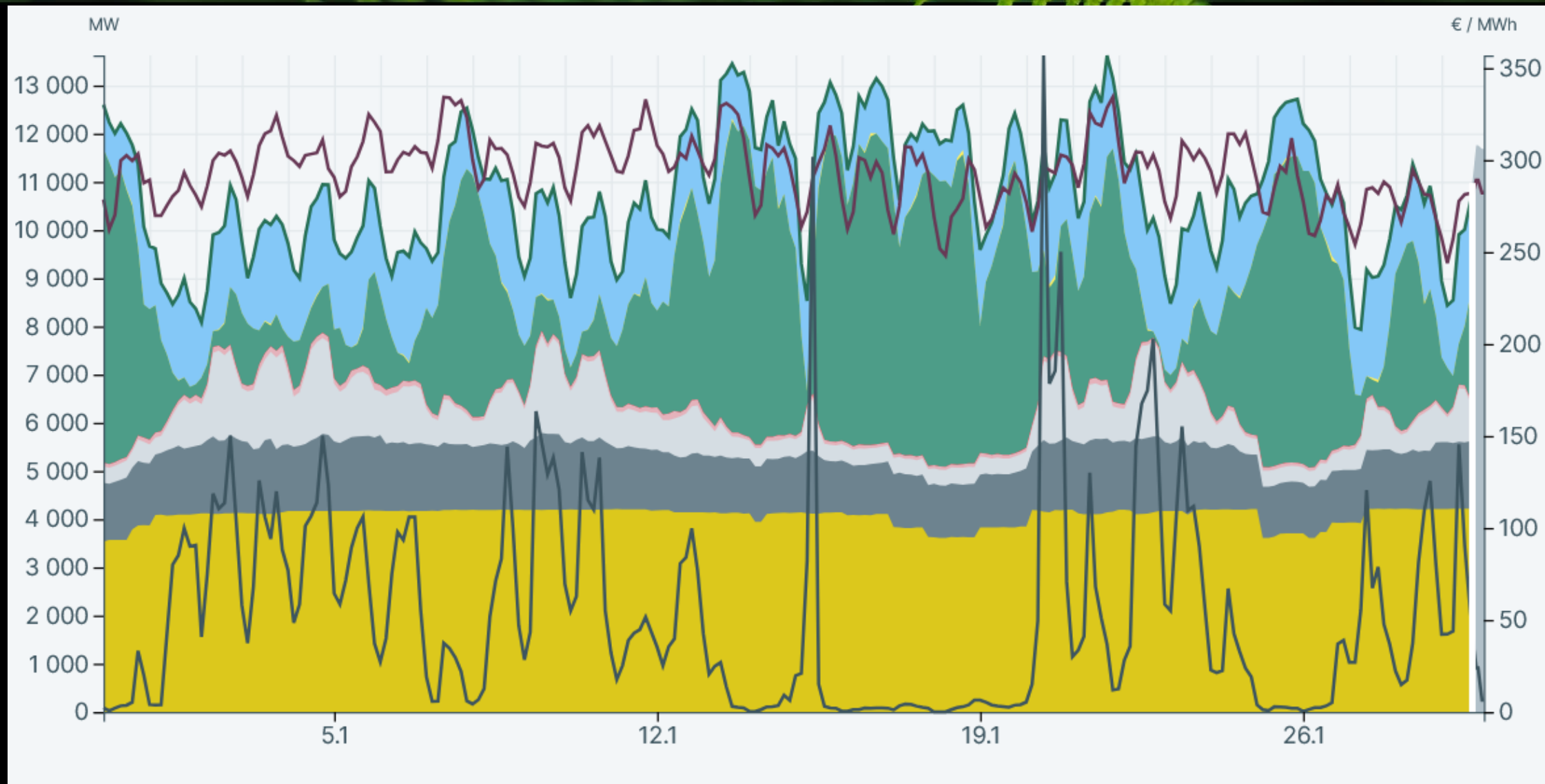


AURINKOSÄHKÖ, TAMMI VS. KESÄKUU 2024



<https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinainformaatio/aurinkovoima/>

SÄHKÖN TUOTANTO SUOMESSA, TAMMI-2025



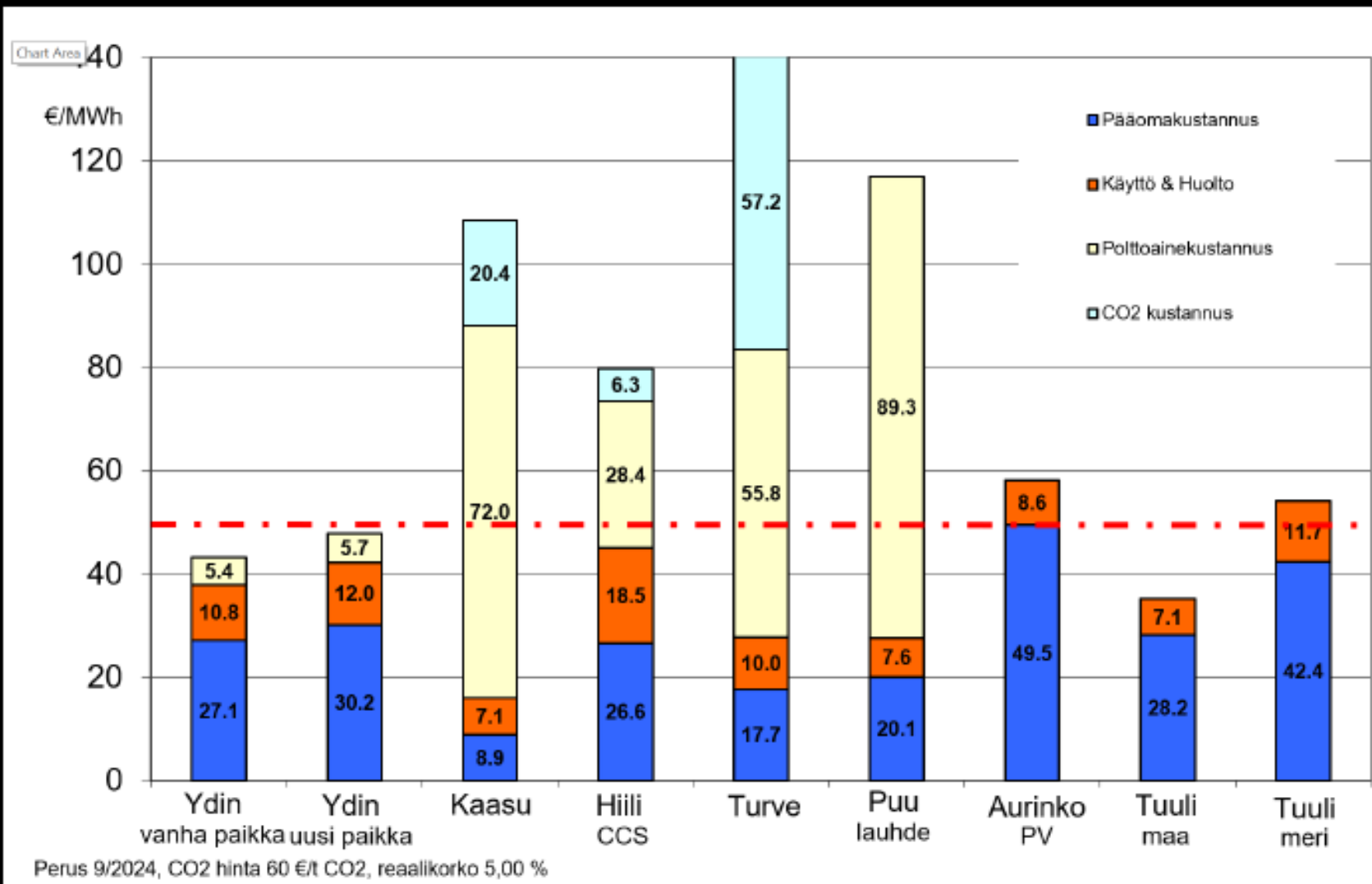
MIKSI SÄHKÖN HINTA VAIHTELEE VILLISTI?

Sähkömarkkina vapautettiin Euroopassa 1990-luvun puolivälissä

- Silloin kaikkia tuotantomuotoja oli mahdollistaa säätää ylös tai alas; sääriippuvaa tuotantoa oli hyvin vähän
- Eri tuotantomuodoilla oli erilainen omakustannushinta
- *Markkinamekanismi ohjasi kulutusta edullisimpiin tuotantomuotoihin*
- Järjestelmä, ja hinnoittelu, oli *kulutusohjautuvaa*:
 - Verkkö siirsi sähkön tuottajilta kuluttajille maantieteellisesti
 - Voimalaitokset pitivät verkon tasapainossa säätämällä tehoa ja taajuutta
 - Vesivoima toimi tarvittaessa puskurina

TASOITETTU SÄHKÖN HINTA (LCOE) NYKYÄÄN

[Kuva & tekstit prof. Esa Vakkilainen, LUT Energia]



- Fossiiliset kalliita
- Biomassasähkö ei kannata, Suomi erityisen kallis
- Fossiilittomat kannattaa
- PPA ajaa uusiutuvia

MIKSI SÄHKÖN HINTA VAIHTELEE VILLISTI?

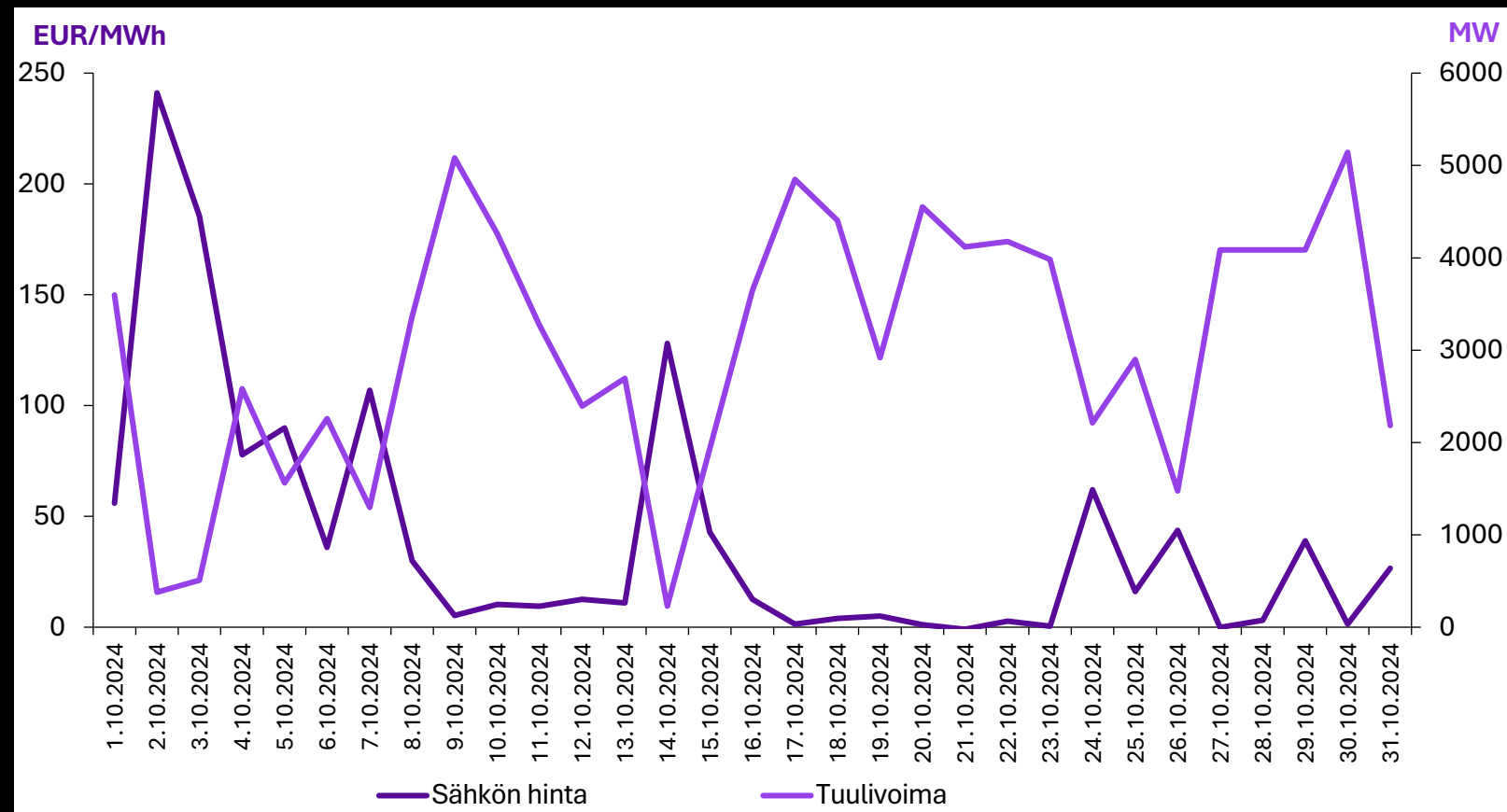
Sääriippuvan uusiutuvan tuominen markkinoille poliittisilla päätöksillä ja avokätisillä tuilla on aiheuttanut energiamurroksen

- » Tuulta tai aurinkoa *ei voi säätää ylös tai alas*, vaan teho nousee ja laskee sään ja vuorokauden ajan mukana → kysyntä ja tarjonta eivät kohta
- » Kun on tuulinen ja/tai aurinkoinen päivä, tuotantoa on paljon → hinta matala tai negatiivinen. Suomessa sähkön markkinahinta vuonna 2024 oli *negatiivinen noin kuukauden ajan* (730 tuntia)
- » Suomessa aurinkoa on eniten kesällä, kun kysyntää on vähiten
- » Tuulen ja auringon huipputehot ovat noin 3 ja 8 kertaa suuremmat kuin keskiteho; verkon siirtokapasiteetti täytyy mitoittaa huipun mukaan
- » Järjestelmä, ja hinnoittelu, on nyt *tuotanto-ohjautuvaa*:
 - » Nyt tarvitaan *entistä enemmän* maantieteellistä siirtoa, ja *sen lisäksi ajallista siirtoa*: ”kysyntäjoustoa” ja ”energiavarastoja” → vetytalous, pumppuvoimalat, akkuvarastot
 - » Verkkoa tasapainottava voimalaitoskapasiteetti on vähentynyt kun lauhdevoimaa ja yhteistuotannon (CHP:n) sähköntuotantoa on purettu, sekä tehotasapainon että taajuuden hallinta on vaikeutunut
 - » Vesivoiman puskurikykyä ei voi kasvattaa, mutta joidenkin satojen megawattien pumppuvoimalaitos on mahdollinen

TUULIVOIMAN VAIKUTUS SÄHKÖN HINTAAN

Kun tuulee, sähkö on halpaa, jopa miinushintaista → ”kannibalisaatio”
Tuulituotanto ei ole markkinahintaista, vaan myydään etukäteen kiinteällä hinnalla (PPA, Power Purchase Agreement)

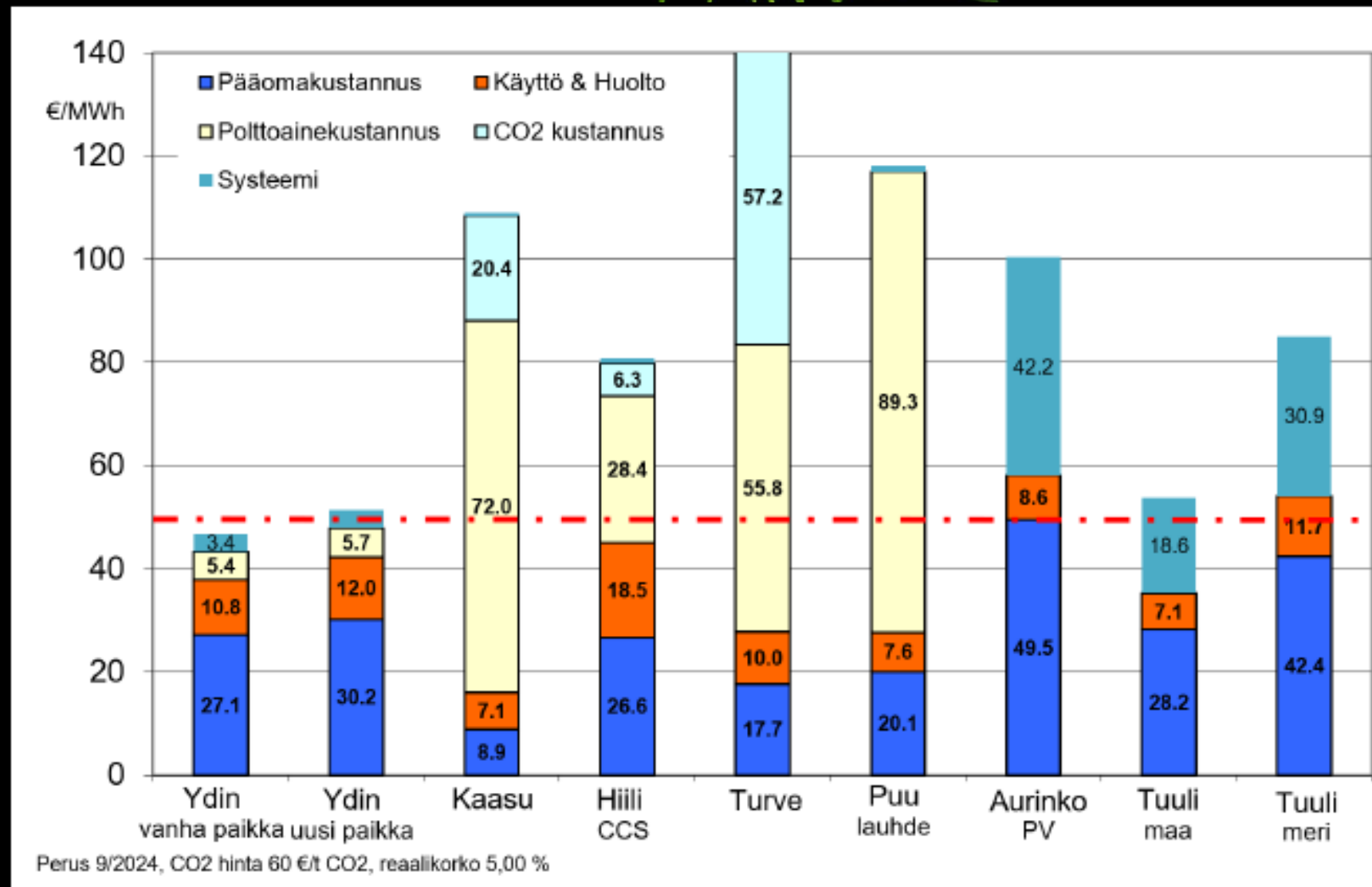
Lokakuun 2024 tuulivoimatuotanto & sähkön tukkuhinta (päiväkeskiarvot)



UNOHDETUT SYSTEEMIKUSTANNUKSET

[Kuva prof. Esa Vakkilainen, LUT Energia]

- Kaikki uudet laitokset tarvitsevat verkko-investointeja
- Auringon ja tuulen systeemi-kustannus on suuri, pienen keskitehon takia



HINNANMUODOSTUS SÄHKÖMARKKINOILLA

Markkinoille osallistuvat (isot) sähkön tuottajat ja kuluttajat tekevät päivittäin myynti- ja ostotarjoukset

- Jokaiselle hinta-alueelle, jossa toimivat
- Seuraavan päivän jokaiselle tunnille
- Siitä määrästä sähköä, jonka ovat valmiita myymään tai ostamaan

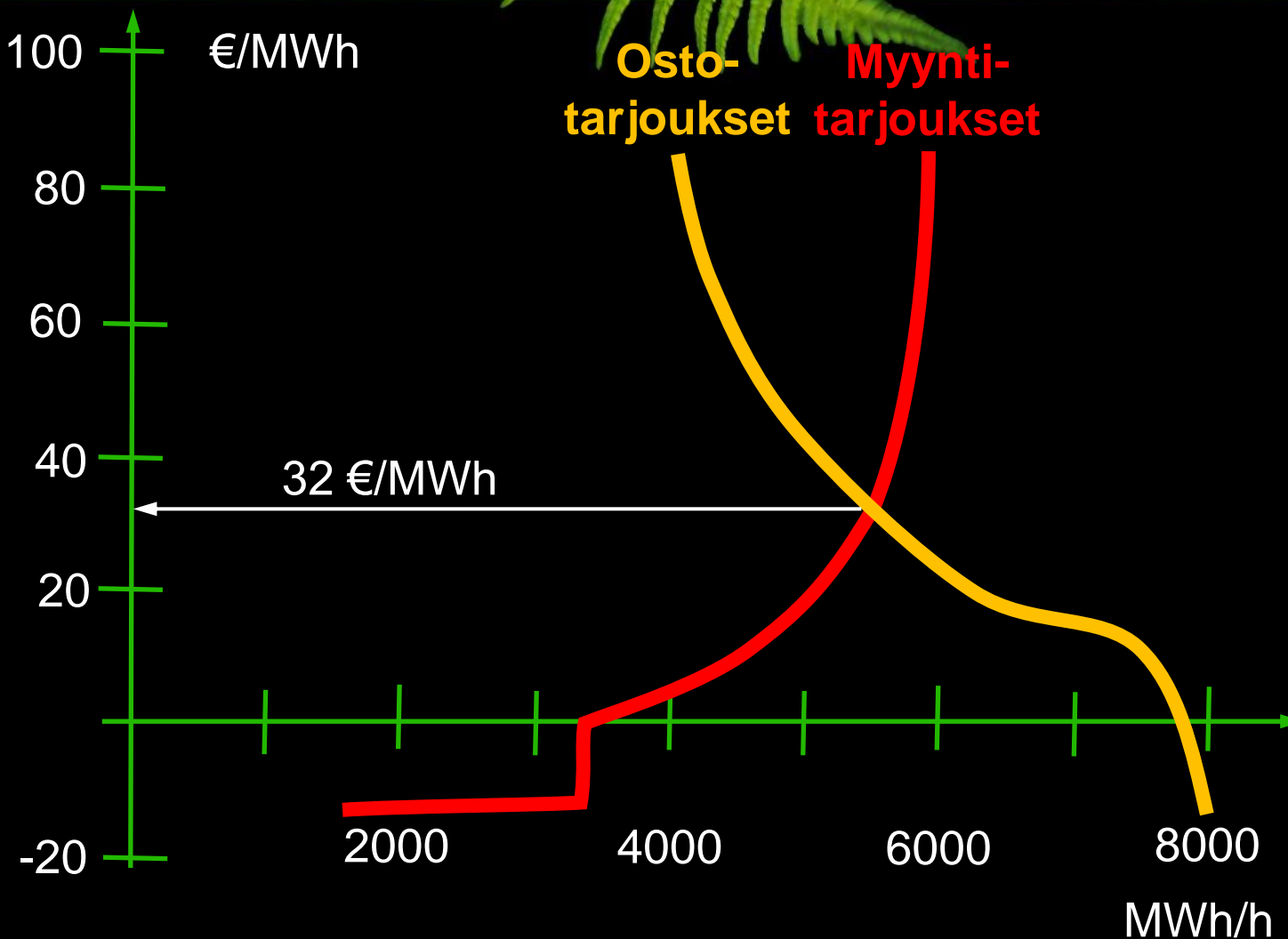
Tarjousten perusteella lasketaan kullekin tunnille sähkön markkinahinta jokaisella hinta-alueella

Hinta-alueiden välinen siirto huomioidaan – jos siirtorajoituksia ei olisi, koko Euroopassa olisi sama sähkön hinta

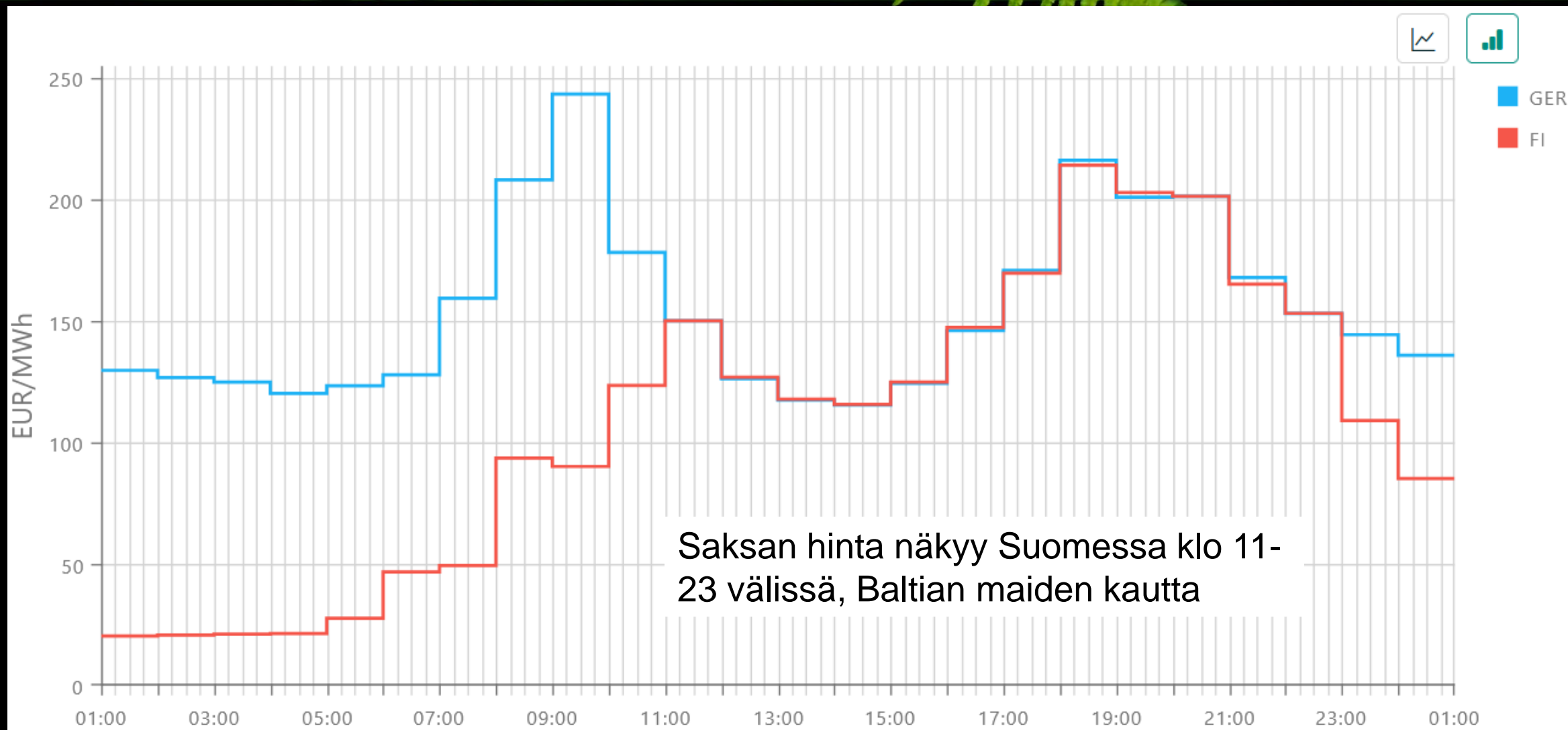
HINNANMUODOSTUS SÄHKÖMARKKINOILLA

Jokaisen alueen
jokaisen tunnin
kohdalla *kysynnän ja
tarjonnan kohtaaminen*
määrää hinnan

Rajasiirrot voivat näkyä
myyntinä tai ostona



MA 3.2.2025 TUNTIHINNAT SUOMI, SAKSA



HINTAJOUSTO SÄHKÖMARKKINOILLA - ALAS

Ukrainan sodan aiheuttama energian hinnan nousu johti vapaaehtoiseen sähkön säästämisen syksyllä 2022, **enimmillään -10 %**.

Kulutus Suomessa ei jousta alaspäin tämän enempää.

Ajankohta	kulutus edell. vuosi GWh	kulutus 8/2022 - 2/2023, GWh	Muutos, %
Elokuu 2022	6 074	5 905	-3 %
Syyskuu 2022	6 245	5 788	-7 %
Lokakuu 2022	6 866	6 358	-7 %
Marraskuu 2022	7 527	6 860	-9 %
Joulukuu 2022	8 867	7 578 (7 978 *)	-10 %
Tammikuu 2023	8 251	7 615 (7 862 *)	-5 %
Helmikuu 2023	7 185	6 814 (6 833 *)	-5 %

<https://www.fingrid.fi/ajankohtaista/tiedotteet/2023/sahkonkulutus-laski-helmikuussakin-viisi-prosenttia/>

Virheellinen tarjous sähköpörssissä uhkasi Suomen sähköjärjestelmää – näin siitä selvittiin

19.1.2024 ETUSIVU » SÄHKÖMARKKINAT » VIRHEELLINEN TARJOUS SÄHKÖPÖRSSISSÄ UHKASI SUOMEN SÄHKÖJÄRJESTELMÄÄ – NÄIN SIITÄ SELVITTIIN

Norjalainen sähköyhtiö syötti sähköpörssiin virheellisen ja roimasti alihintaisen tarjouksen, minkä takia Suomen sähköjärjestelmän vakaus oli vaarantua 24. marraskuuta 2023. Fingridin nopeiden toimien ansiosta päivästä muodostui kuitenkin sähköntuotannon kannalta vain yksi päivä muiden joukossa.

Tarjousvirheen takia sähkön tuntihinta oli -500 €/MWh useiden tuntien ajan. Sähkönkulutus nousi vastaavaan ajankohtaan nähden 600-1000 MW, eli noin +10 %.

<https://www.fingridlehti.fi/virheellinen-tarjous-sahkoporssissa-uhkasi-suomen-sahkojarjestelmaa-nain-siita-selvittiin/>

- Tähänastisen kokemuksen perustella sähkön kulutus joustaa vapaaehtoisesti ± 10 % eli noin 1000 MW suuntaansa
- Vrt. yö-päivä –vaihtelu 2000 MW (Suomi), 4000 MW (Ruotsi)
- Halpa sähkö on houkuttellut kunnallisia energiayhtiöitä rakentamaan sähkökattiloita kaukolämpöjärjestelmiin. Kattiloita on noin 2000 MW edestä; suunnitelmia lisätä kattiloita tästä ei ole [Energiateollisuus, Sähkövuosi 2024]
- Kulutusjousto ei ratkaise tuuli- ja aurinkosähkön aiheuttamaa tehoepätasapainoa... mutta voisi vaikuttaa hintatasapainoon

KYSYNNÄN JA TARJONNAN LAKI

Marraskuu 2022: päivähinta
luokkaa 400 €/MWh

1000 MW jousto alaspäin olisi
tuonut hinnan < 100 €/MWh

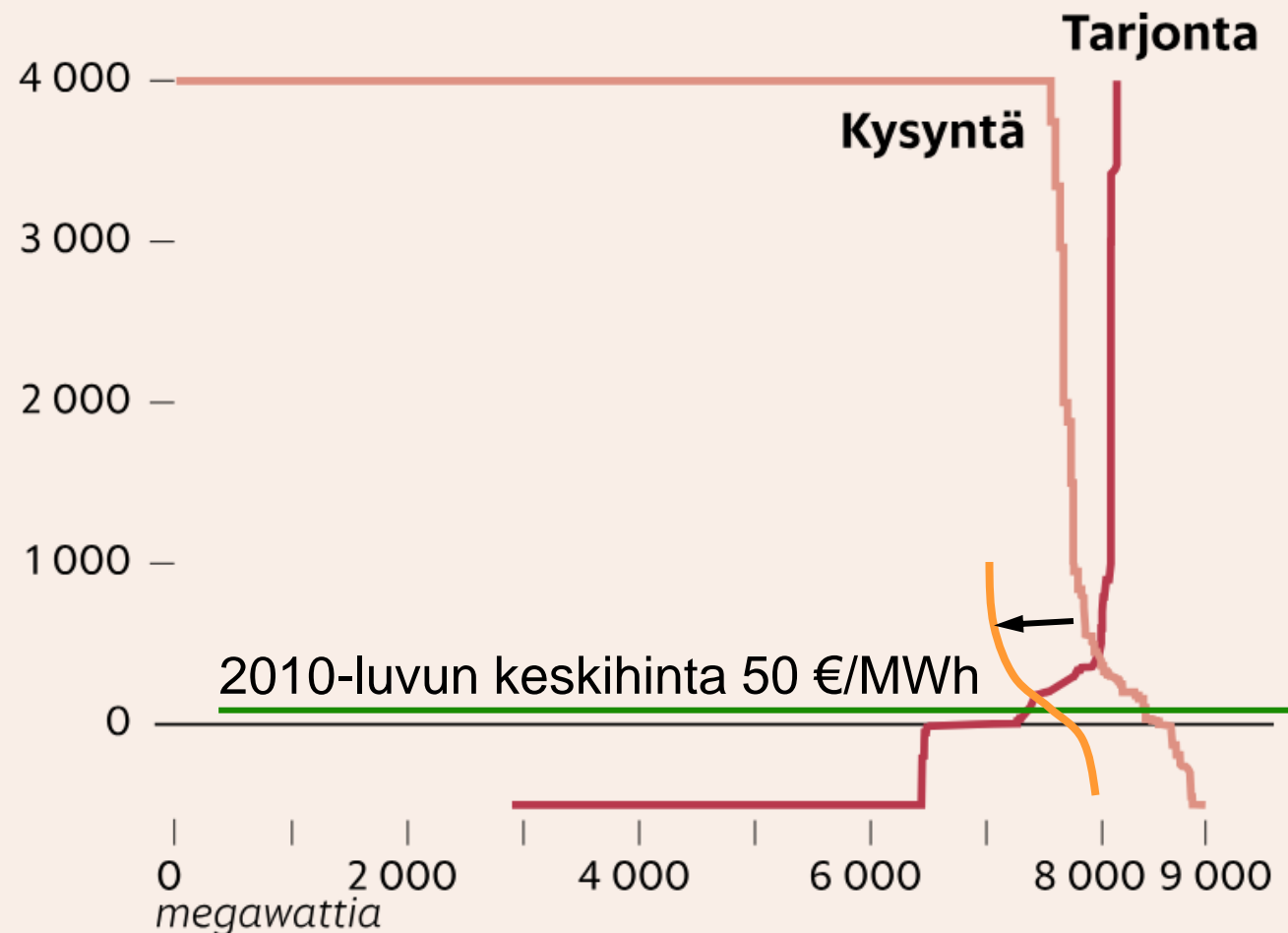
Nordpoolissa liikkunut koko
volyyymi oli noin 40 000 MW

Sähkötarkkinoilla noin 80 %
energiasta myydään vuosi(a)
etukäteen sovitulla hinnalla
(futuurit, PPA:t)

HS 29.11.2022

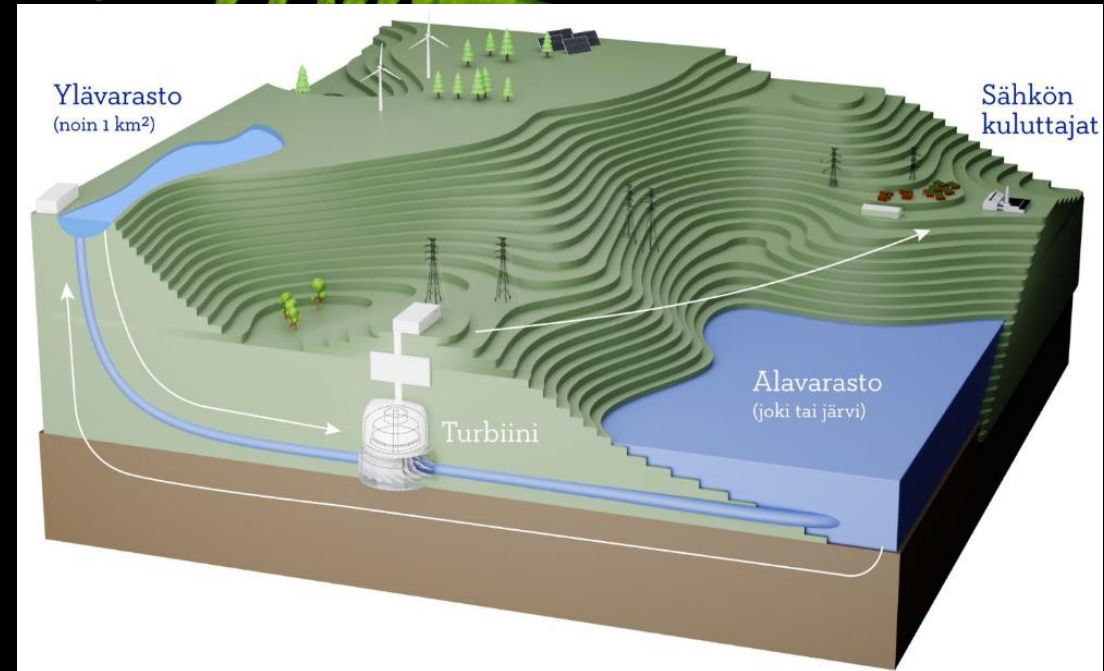
Sähkön kysyntä- ja tarjontakäyrät sähköpörssi
Nord Poolissa tiistaina klo 10-11

5 000 – euroa/megawattitunti

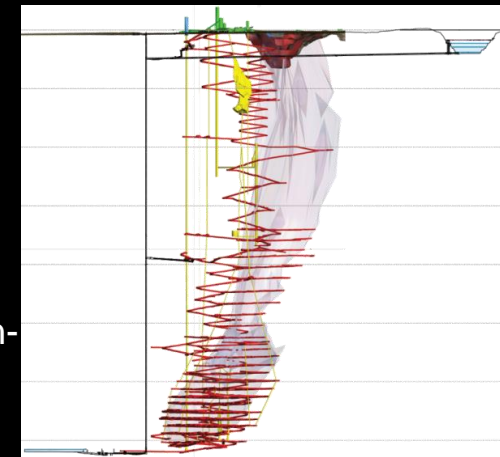


ENTÄS SÄHKÖVARASTOT?

- » Suurin toimiva sähkövarasto olisi pumppuvoimalaitos: vesivoimalaitos, jossa
 - » pumpataan vettä ylämäkeen halvalla sähköllä
 - » lasketaan vesivoimalan läpi kalliin sähkön aikaan
- » Kemijoki Oy suunnittelee Kemijärvelle pumppuvoimalaitosta, jonka teho olisi 500 MW, ja toiminta-aika jopa 7 vrk; pudotuskorkeus olisi 150 m ja altaan pinta-ala 300 hehtaaria
 - » Pyhäsalmen kaivoksessa pudotuskorkeutta olisi 1400 m mutta tilaa on vähemmän, siellä optimiteho olisi 75 MW ja toiminta-aika noin 7 tuntia. Varaston energiasisältö 530 MWh, maksimiteho voisi olla jopa 400 MW
- » Varastointi pienentää kalliin ja halvan sähkön hintaeroa; myös varastot kannibalisoivat itseään



https://www.ymparisto.fi/sites/default/files/documents/Ailangatunturin_YVA-ohjelma.pdf



<https://callio.info/fi/energia-ja-kiertotalous/pphes-pumppuvoimala/maailman-suurin-pudotuskorkeus/>

»» Suomen suurin akkuvarasto
on TVO:n ydinvoimalaitoksella
Eurajoen Olkiluodossa

»» 100 MW / 95 MWh, eli täydellä
purkuteholla tyhjenee vajaassa
tunnissa

»» Toiseksi suurin tulee
Lappeenrannan Ylikkälään

»» 56,4 MW / 112,9 MWh, eli täydellä
purkuteholla tyhjenee alle 2 tunnissa

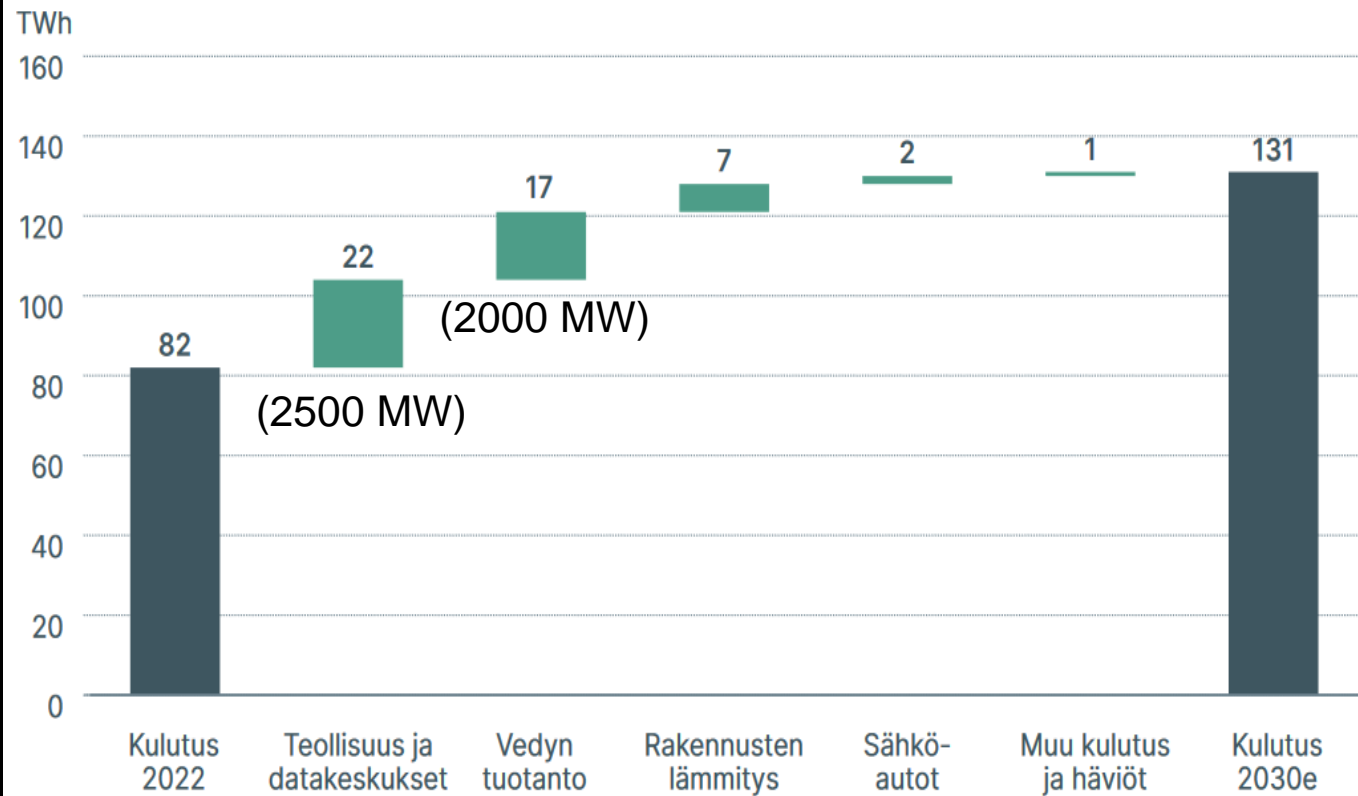
VOISIKO SÄHKÖN KULUTUS KASVAA?

- Fingrid arvioi Suomen vuotuisen sähkönkulutuksen kasvavan 82 → 131 TWh:iin (60 %) vuoteen 2030 mennessä
- Teollisuus ja datakeskukset todennäköisimmin suht joustamatonta kuormaa

Sähkön kulutus (TWh)

Fingridin ennuste, tammikuu 2024.

FINGRID



<https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/kantaverkko/kantaverkon-kehittaminen/sahkon-tuotannon-ja-kulutuksen-kehitysnakymat-q1-2024-fingrid.pdf>

- ▶▶ Onko energiajärjestelmä yhteiskuntaa varten vai yhteiskunta energiajärjestelmää varten?
- ▶▶ Energiamurros, eli sääriippuvien uusiutuvien lisääminen järjestelmään poliittisin päätöksin, näkyy hintaheilahteluna
 - ▶▶ Niistä saatu päästövähennys on vähäinen, noin 1/7 ydinvoiman vaikutuksesta Suomessa
 - ▶▶ Tuotantoheilahtelut ylittävät yö-päivä-vaihtelun (2000 MW) moninkertaisesti
- ▶▶ Suurta joustoa sähkömarkkinaan ei tule – mutta pienikin jousto voisi tiukoissa paikoissa vaikuttaa hintaa tasoittavasti
 - ▶▶ Pumppuvoimaloita suunniteltu luokassa 75 – 500 MW, käyttöaika tunneista päiviin; paikkoja vähän
 - ▶▶ Akkuvarastoja tehty tai tekeillä luokkaa < 100 MW ja 1-2 tuntia, näitä voi tulla useita
- ▶▶ Pohjoismainen sähkönkulutus voi lähivuosina kasvaa 60 %, jos syntyy uutta sähköintensiivistä teollisuutta: datakeskuksia, vedyntuotantoa yms.
- ▶▶ Vakaan ja hallittavan perusvoiman kysyntä on ja pysyy, saattaa jopa kasvaa.

 YHTEYSTIEDOT

JUHANI HYVÄRINEN

Professori

juhani.hyvarinen@lut.fi



LUT
University