



Sähköjärjestelmän joustotarve Suomen hiilidioksidineutraalissa energiajärjestelmässä

Energia-alan tutkimusseminaari

Tero Koivunen - Postdoctoral researcher – Energia- ja konetekniikan laitos

28.1.2025

Crowne Plaza Helsinki

Huomautus

Esitys perustuu pääasiassa väitöskirjaani “Flexibility and resilience in the transition to a carbon-neutral Finnish energy system” (2024) sekä väitöskirjan artikkeleihin. Kaikki esitetyt tulokset on julkaistu vertaisarvoituissa artikkeleissa tai väitöskirjassani. Olen maininnut artikkelit dioissa sekä esitykseni lopussa.

Pidän esitykseni roolissani Aalto-yliopiston tutkijana. Toimin edelleen osa-aikaisesti Aalto-yliopistossa, mutta päätoiminen työni on vaihtunut. Nykyään päätoimisesti toimin Helen Oy:ssä sähkömarkkina-analytikkona. Esitys ei kuvasta millään tavalla Helen Oy:n kantoja.



Koivunen, Tero. Flexibility and resilience in the transition to a carbon-neutral Finnish energy system. Aalto University. School of Engineering | Doctoral thesis (article based). 2024.
<https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-64-2087-5>

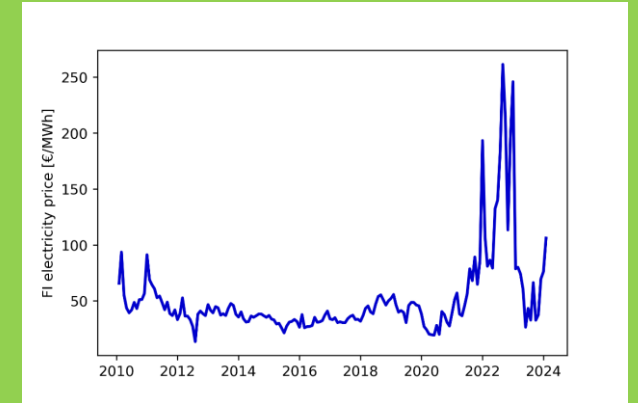
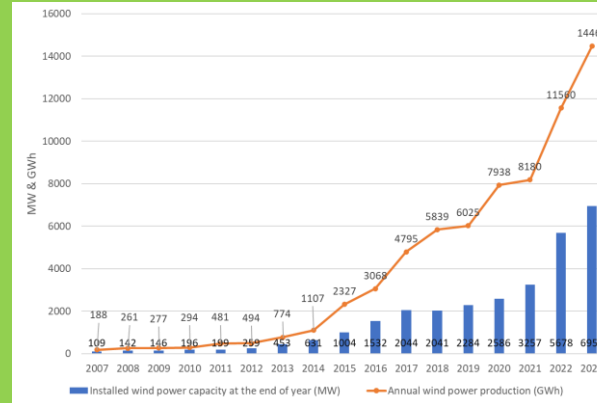
Tausta

Suomi on asettanut hiilineutraalisuustavoitteita pohjautuen Pariisin ilmastopöytäkirjaan.

Ilmastolain mukaan Suomen pitäisi olla hiilineutraali vuonna 2035.

Seuraukset sähköjärjestelmälle?

Sähköjärjestelmän tasapaino



Tuulivoimatuotannon ja sähkön hinnan kehitys Suomessa (lähde: Väitöskirja)



Sähköjärjestelmän pitää olla jatkuvasti tasapainossa. Uusiutuvien teknologoiden käyttöönotto aiheuttaa haasteita.



Tasapaino voidaan saavuttaa jouston avulla. Joustoa on eri aikajänteillä.

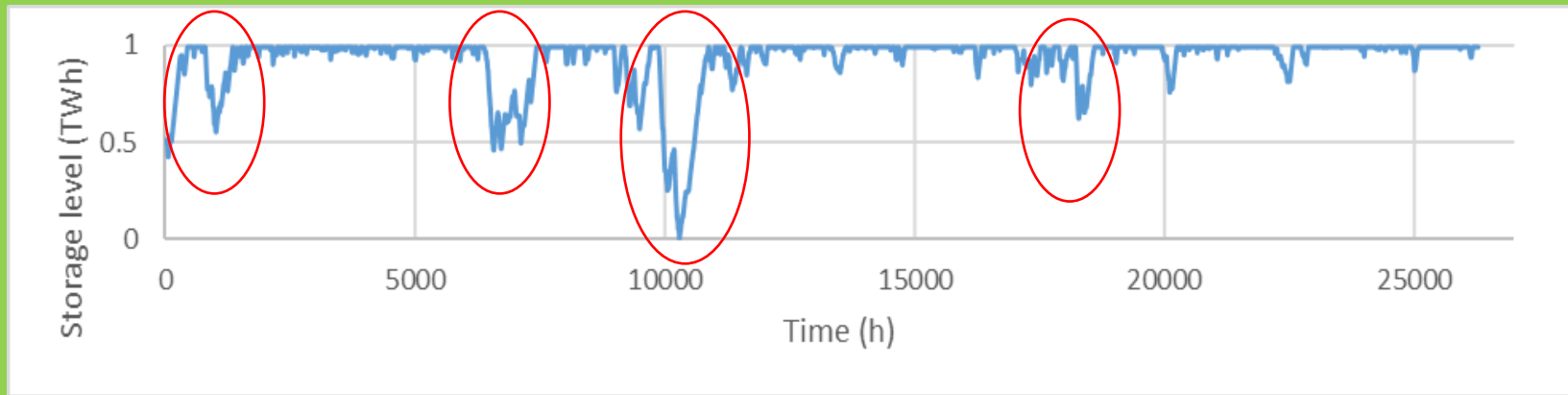


Hiilineutraaliuden vaatima sähköistys lisää tasapainon merkitystä.

- Dekarbonisoitu terästeollisuus ja raskas liikenne vaatisi vetyä noin 20 TWh/a ja sähköä noin 3.3 TWh/a -> Sähköä noin 32 TWh/a.
- 100% sähköistetty henkilöautoliikenne vaatisi noin 7 TWh/a sähköä.

Jouston tarve

Lisääntyvä uusiutuva kapasiteetti vaatii enemmän joustoa.
Jos joustoa ei ole, voi käydä näin:



Kolmen vuoden simulaatio Suomen sähköjärjestelmästä v. 2040.

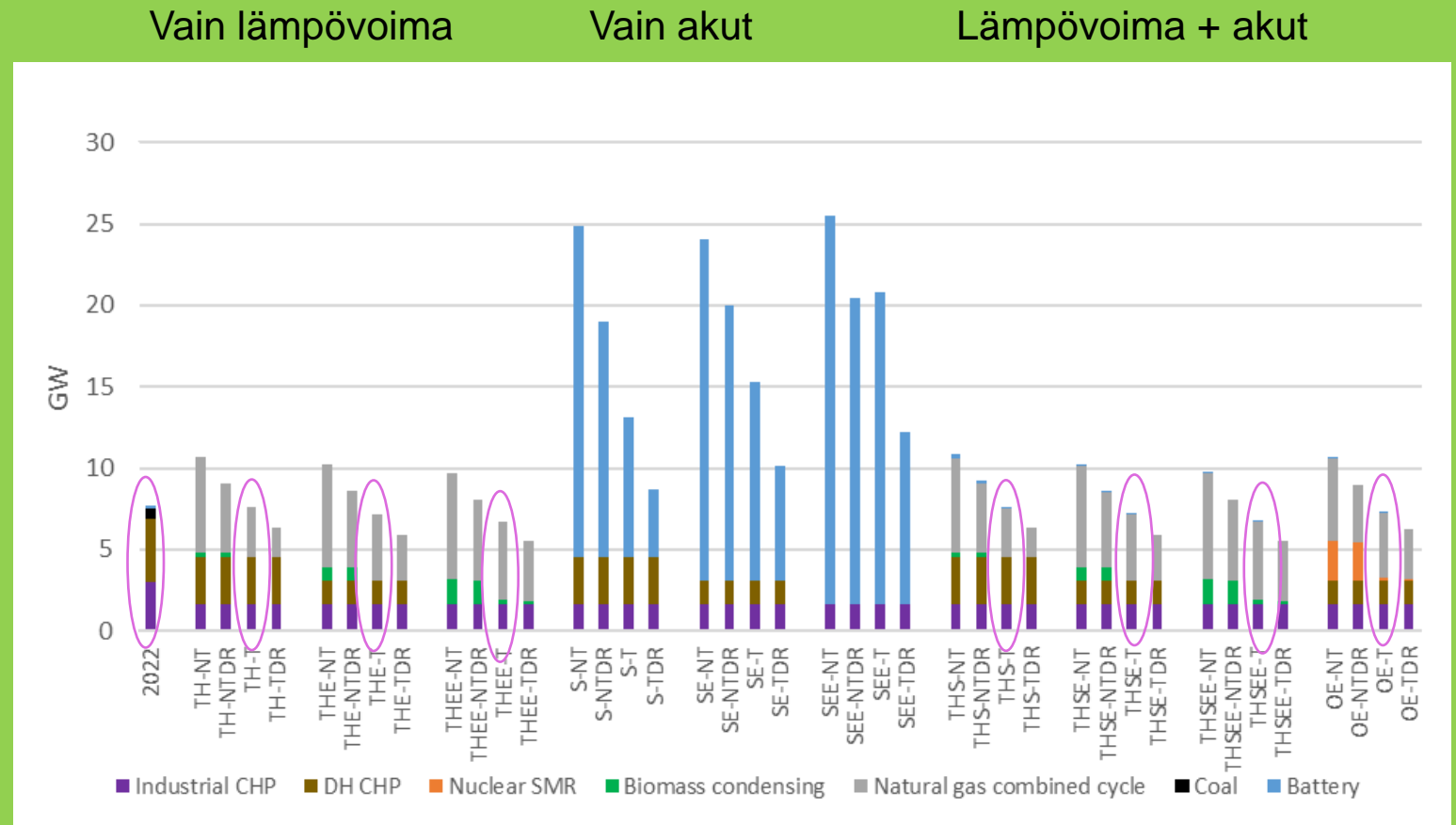
Ei lisättyä joustoa, vain vesivoima. Sähkövarasto “kattaa” kaiken puuttuvan jouston. Toteutettu itsetehdyllä Excel-mallilla, kiinteä sähkön tuotantojärjestys.

2. Vuoden talvella huomataan erityisen vaativa jouston tarve. 1 TWh puuttuvaa sähköä noin viikon aikana. Taustalla vähätuulinen ja kylmä jakso.

Koivunen, Tero; Syri, Sanna; Veijalainen, Noora. 2021. Contributing factors for electricity storage in a carbon-free power system. John Wiley & Sons. International Journal of Energy Research, volume 46, issue 2, pages 1339-1360. ISSN 1099-114X. DOI [10.1002/er.7252](https://doi.org/10.1002/er.7252).

Mistä joustoa? Ja kuinka paljon?

- Simuloitu 2035 sähköjärjestelmä 100 TWh/a kysynnällä perustuen 2022 historiallisiin uusiutuvien tuotantoprofiileihin ja tuonti- ja vientiprofiileihin.
- Muuttujina kysyntäjousto (DR) kaupankäynti (NT/T) ja kaukolämpö CHP:n sähköistystasot (E = 50% EE = 100%). Mallinnus toteutetu GenX – ohjelmistolla.
- Kuvaajassa näytetään ohjattava uusi kapasiteetti (ei sisällä olemassa olevia ydinvoimaloita, vesivoimaa tai uusiutuvaa kapasiteettia).
- Kaupankäynti (sähkön tuonti & vienti) ja kysyntäjousto vähentävät ohjattavan kapasiteetin määrää.
- Kuitenkin, jotain uusia joustavia laitoksia, kuten kaasuturbiineita tai vastaavia tullaan tarvitsemaan johtuen CHP poistumasta.
- SMR (a 150 MW) vaihtoehtona vain optimoiduissa OE-skenaarioissa.



“Vahvaa” kapasiteettia on nykytilannetta vastaavissa skenaarioissa (TH-T) koko ajan noin 8 GW. Vastaa 2022 kapasiteettia.

Pelkät akut eivät ole ratkaisu. Taloudellisesti kestämatöntä, lisäksi massiivinen yli-investointi tuulivoimaan ja aurinkoon!

A!

Kertaus

Joustolle on tarvetta.

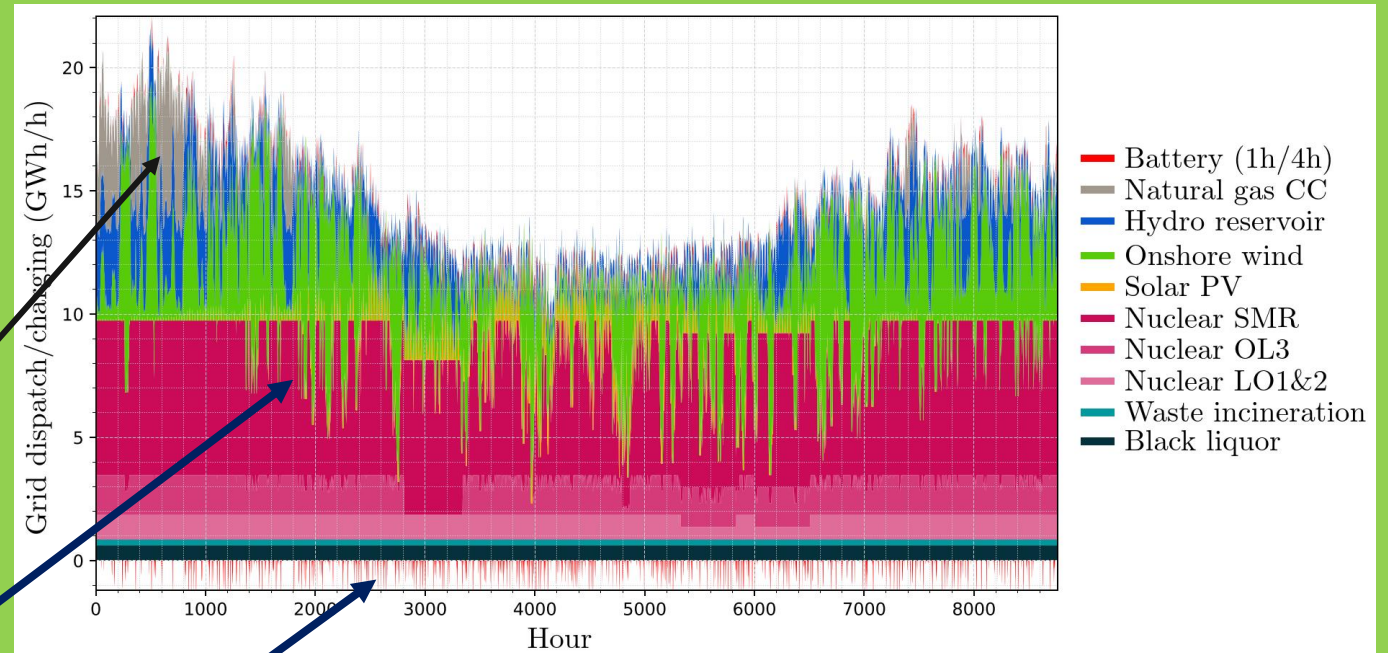
Jouston määrä tulee olemaan noin 7-8 GW ohjattavaa sähköntuotantokapasiteettia. Kysyntäjousto vähentää tätä tarvetta noin 1 GW. Tämä ei sisällä nykyisiä ydinvoimaloita tai vesivoimaa.

Jos nykyistä CHP kapasiteettia poistetaan, pitäisi se korvata jollain muulla (kaasu CCGT taloudellisesti tehokkain tutkituista vaihtoehdoista).

Katsotaan seuraavaksi tarkemmin, mikä on eri joustojen rooli sähköjärjestelmässä.

Miten eri teknologiat joustavat?

- 2040 sähköjärjestelmä. (Ei sis. OL 1&2 tutkimus tehty 2022-23), 2019 profiilit.
- Sähkön kysyntä 126.7 TWh/a (sis. vetyä, sähköistetty kaukolämmitys)
- Ei kysyntäjoustoa saatavilla, kaikki jousto tulee tuotannosta.
- Sähkökauppaa EI mallinnettu. Suomi tuottaa kaiken sähkön mitä kuluttaa.
- Mallinnettu GenX – ohjelmistolla.
- Investoitavat teknologiat: Akut, kaasuturbiinit, maatuulivoima, aurinko PV, SMR (150 MW per kpl) ydinvoima. Kaikilla investoinneilla NPV ≥ 0



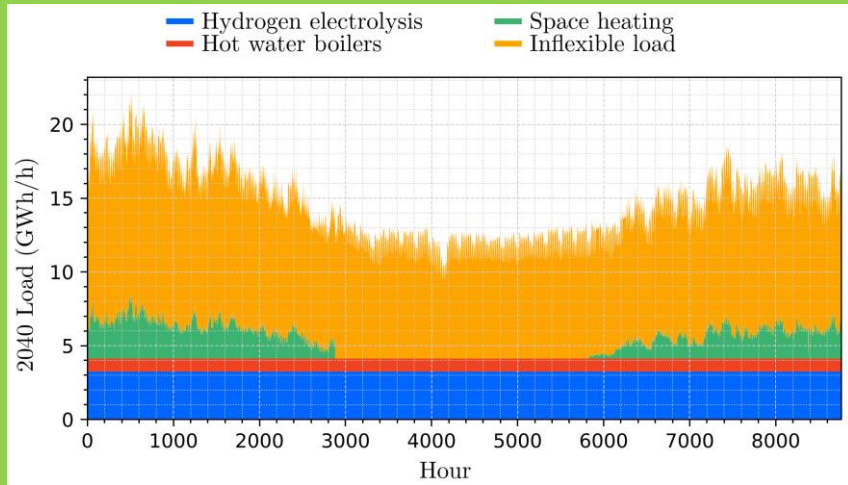
Kaasuturbiinit
huippukulutustunneilla.

Ydinvoimalat joustavat
(OL3 & SMR) kesällä
ja tuulisina hetkinä.

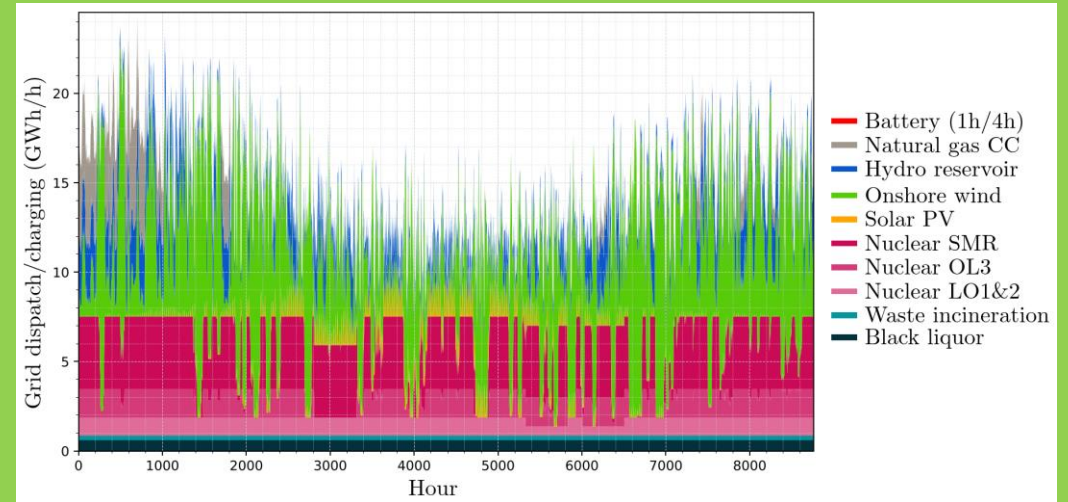
Akut joustavat lyhyellä
aikavälillä.

Lyhyen ajan jousto: Akut,
kaasuturbiinit, vesivoima
Pitkän ajan jousto: Ydinvoimaloiden
alassäädöstä.

Miten kysyntäjousto vaikuttaisi tilanteeseen?



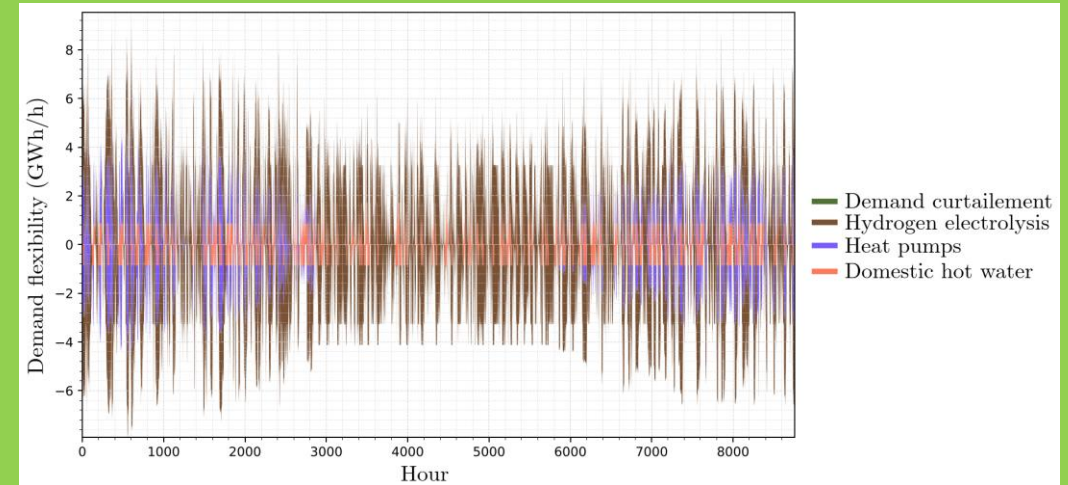
Jousto lisää uusiutuvia ja vähentää ydinvoimaa. Ydinvoiman alassäätö kasvaa.



Oletukset: Vedenlämmityksestä käytössä perustilanteessa jatkuvasti 50% ja vedyntuotannossa 75%. Tilalämmitys ilmalämpöpumpuilla. Jousto huippukulutuksen mukaan.

Joustoparametri	Kuumavesivaraajat	Tilalämmitys	Vedyn tuotanto
Maksimi joustokapasiteetti [MW]	1728	4562	4349
Max. edistys [h]	12	12	4
Max. viivästys [h]	12	4	0

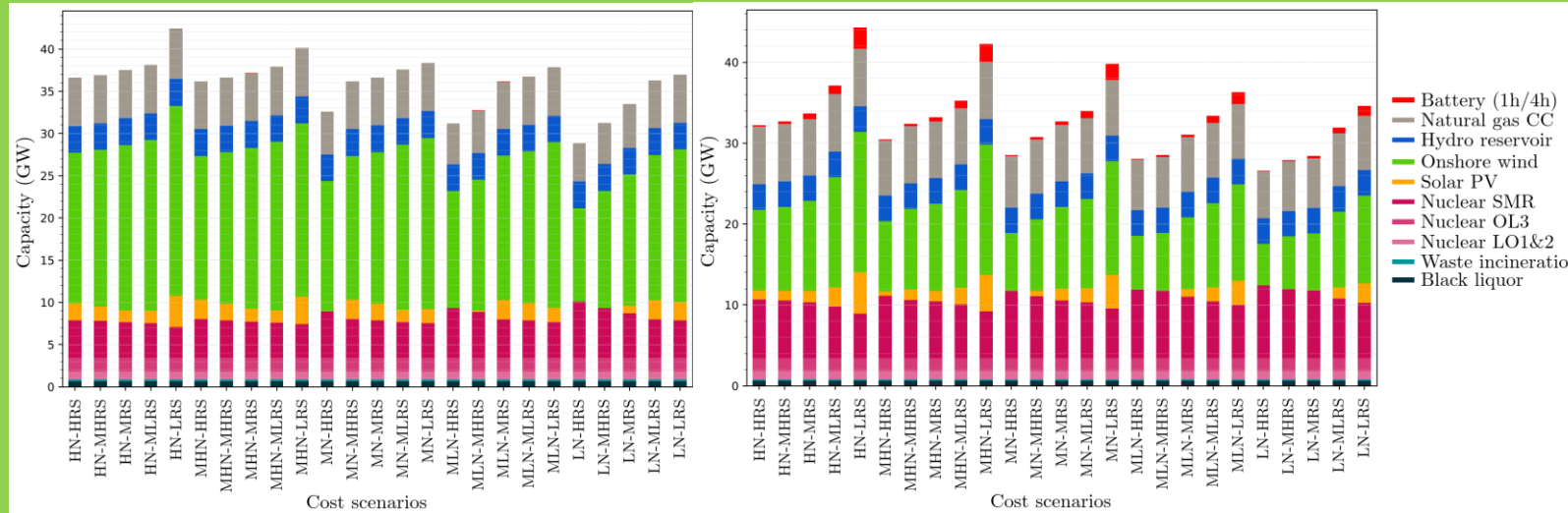
Akut poistuvat, kun kysyntäjousto ajaa saman asian. [Säätösähkö ja intraday markkinoita ei mallinnettu]



A!

Koivunen, Tero; Hirvijoki, Eero. 2024. Effect of investment cost on technology preference in a flexible, low-carbon Finnish power system. Elsevier. Nuclear Engineering and Design, volume 417, pages 112854. ISSN 0029-5493. DOI 10.1016/j.nucengdes.2023.112854.

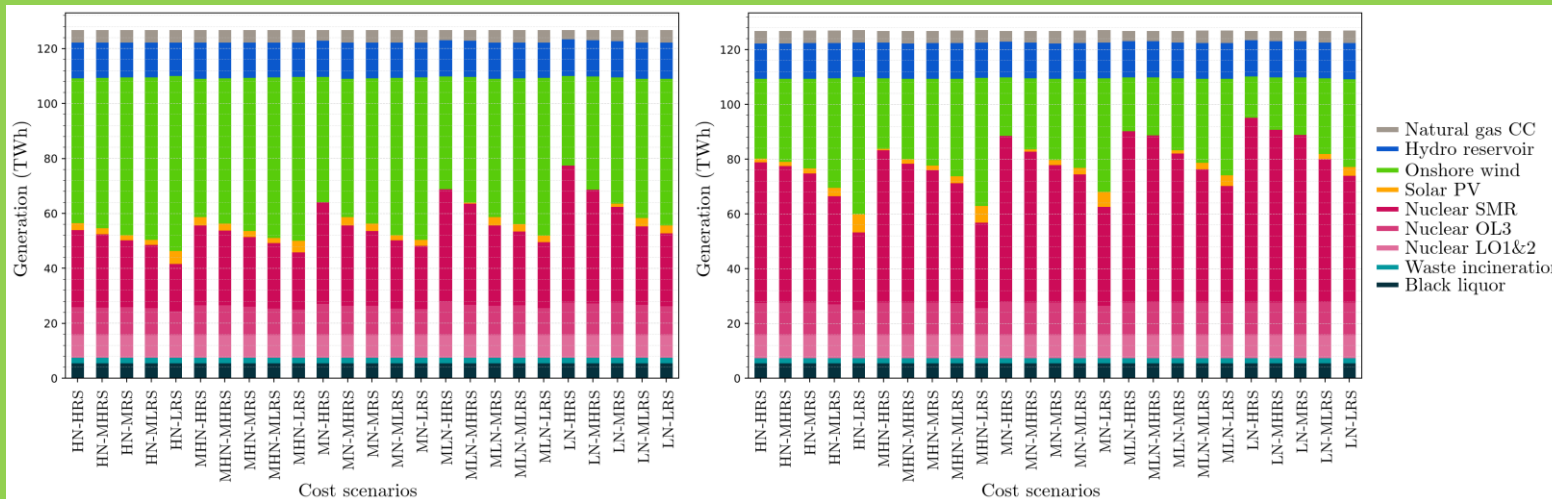
Kapasiteetti ja energiamäärä



Kaasuturbiinit kapasiteetissa merkittävässä osassa (n. 6 GW). Energiankäytössä käyttö pientä. Fossiiliselle tuotannolle on asetettu 2.5 Mt-CO₂ vuosittainen päästöraja.

Jousto kasvattaa uusiutuvien osuutta merkittävästi. Uusiutuvista tuulivoima selvästi merkittävin. Auringon osuus jää pieneksi.

Ydinvoimalla merkittävä osuus tuotetusta energiasta.



Koivunen, Tero; Hirvijoki, Eero.2024. Effect of investment cost on technology preference in a flexible, low-carbon Finnish power system. Elsevier. Nuclear Engineering and Design, volume 417, pages 112854. ISSN 0029-5493. DOI 10.1016/j.nucengdes.2023.112854.



Vasemmalla jouston kanssa, oikealla ilman joustoa.

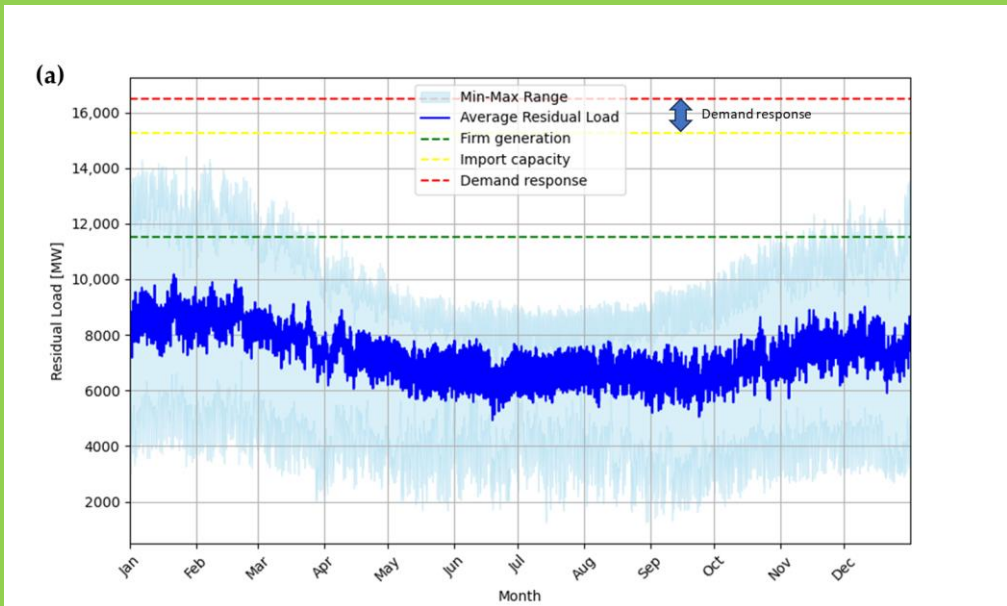
Sähkön riittävyys

Sähkön riittävyyteen tulee kiinnittää huomiota. Vuonna 2030 residuaalikuorman (eli kuorman, josta on vähennetty uusiutuva tuotanto) vaihteluväli tulee kasvamaan merkittävästi.

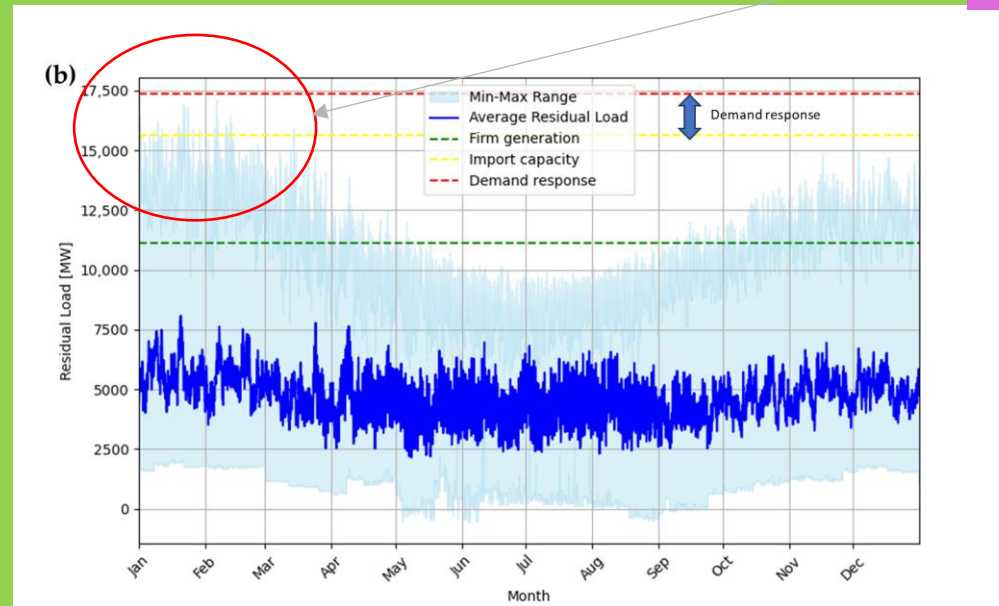
Ilman toimia, voi johtaa mahdollisiin sähköpulatilanteisiin. Tutkimuksessa tarkasteltiin 35 säävuotta. 1982-2016.

Näissä tuloksissa käytetty pohjoismaista sähkömarkkinamallia joka on toteutettu PLEXOS-ohjelmistolla. Tämä tutkimus on tehty Suomen Akatemian strategisen tutkimuksen Realsolar- hankkeessa.

Ongelmia noin kerran kymmenessä vuodessa!



2024 tilanne



2030 tilanne

Koivunen, T.; Syri, S.
Analysis of Severe Scarcity Situations in Finland's Low Carbon Electricity System Until 2030. *Energies* 2024, 17, 5928.
<https://doi.org/10.3390/en17235928>

Vrt. 2024 tilanne, ja tammikuu 2024. Periaatteessa tuotantoa piti vielä olla, mutta osa tuotannosta ei ollutkaan saatavilla. 2030 voi olla ongelmia, vaikka kaikki tuotanto olisikin toiminnassa.

Johtopäätökset

- Hiilineutraalisuustoimet lisäävät sähkön kulutusta.
- Uusiutuvaa tuotantoa on tulossa paljon, mutta tuotannon ennakoimattomuus aiheuttaa ongelmia.
- Sähköjärjestelmä tarvitsee erilaista joustoa:
 - Pitkän ajan joustoa kausivaihteluihin (esim. sähkönsiirto, ydinvoimalat alassäädöllä, vesivoima ym.)
 - Lyhen ajan joustoa mm. akut, kysyntäjoustopot, vesivoima
 - Joustoa tuulettomiin ja kylmiin hetkiin huippukulutusaikoina (nk. Dunkelflaute-ilmiö) kaasuturbiineista [vetyä, synteettistä maakaasua, biokaasua?]
- Näistä viimeisin on kriittinen sähköjärjestelmän turvatulle toimivuudelle. On huomattavaa, että esim. Poistuva CHP-kapasiteetti suoraan lisää tämän kapasiteetin tarvetta lähes 1:1.
- Pitkän ajan jouston tulokset tässä esityksessä eivät välttämättä realistisia. Sähkökauppaa ei mallinnettu suuressa osassa tuloksia realistisella tavalla. Ydinvoiman rooli todennäköisesti tämän vuoksi pienempi.
- Tosin, jos uusi kulutus on joustamatonta, ydinvoiman rooli korostuu (datakeskukset?).

Lähteet

Koivunen, Tero. Flexibility and resilience in the transition to a carbon-neutral Finnish energy system. Aalto University. School of Engineering | Doctoral thesis (article based). 2024. <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-64-2087-5>

Koivunen, Tero; Syri, Sanna; Millar, Robert John. 2020. The role of nuclear power in a modelled carbon-free Finnish power system. In: 17th International Conference on the European Energy Market (EEM), Stockholm, Sweden 16th – 18th September 2020. IEEE. EEM, issue 17. Pages 1-6. ISBN 978-1-7281-6919-4. [DOI 10.1109/EEM49802.2020.9221896](https://doi.org/10.1109/EEM49802.2020.9221896).

Koivunen, Tero; Syri, Sanna; Veijalainen, Noora. 2021. Contributing factors for electricity storage in a carbon-free power system. John Wiley & Sons. International Journal of Energy Research, volume 46, issue 2, pages 1339-1360. ISSN 1099-114X. DOI [10.1002/er.7252](https://doi.org/10.1002/er.7252).

Koivunen, Tero; Khosravi, Ali; Syri, Sanna. 2023. The role of power – to – hydrogen in carbon neutral energy and industrial systems: Case Finland. Elsevier. Energy, volume 284, pages 128624. ISSN 0360-5442. [DOI 10.1016/j.energy.2023.128624](https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128624).

Hyvönen, Johannes; Koivunen, Tero; Syri, Sanna. 2023. Possible bottlenecks in clean energy transitions: Overview and modelled effects - Case Finland. Elsevier. Journal of Cleaner Production, volume 410, pages 137317. ISSN 0959-6526. [DOI 10.1016/j.jclepro.2023.137317](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137317).

Koivunen, Tero; Hirvijoki, Eero. 2024. Effect of investment cost on technology preference in a flexible, low-carbon Finnish power system. Elsevier. Nuclear Engineering and Design, volume 417, pages 112854. ISSN 0029-5493. [DOI 10.1016/j.nucengdes.2023.112854](https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2023.112854).

Hyvönen, Johannes; Koivunen, Tero; Syri, Sanna. 2023. Power supply security in a carbon neutral Finland. In: 19th International Conference on the European Energy Market (EEM), Lappeenranta, Finland 06th – 08th June 2023. IEEE. EEM, issue 19. Pages 1-8. ISBN 979-8-3503-1258-4. [DOI 10.1109/EEM58374.2023.10161906](https://doi.org/10.1109/EEM58374.2023.10161906).

Koivunen, T.; Syri, S. Analysis of Severe Scarcity Situations in Finland's Low Carbon Electricity System Until 2030. Energies 2024, 17, 5928. <https://doi.org/10.3390/en17235928>

Kiitos!

Kysymyksiä?

Kysymyksiä voi myös lähettää sähköpostitse:

tero.koivunen@aalto.fi