



**TAL
TECH**

ELEKTRISÜSTEEMI STABIILSUS (PAINDLIKKUS)

Argo Rosin, täisprofessor tenuuris
Mikrovõrkude ja metroloogia uurimisrühm
Tallinna Tehnikaülikool

29.05.2025

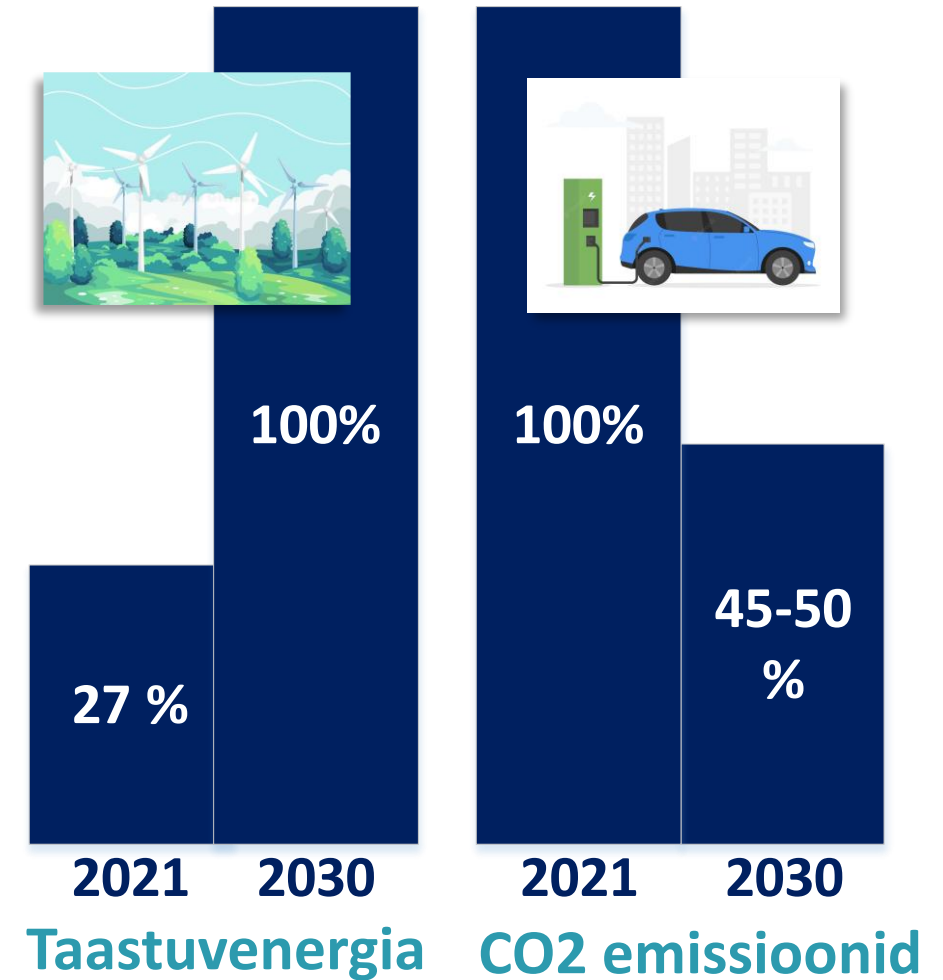
TULEVIKU ENERGIASÜSTEEM

RIIKLIKUD EESMÄRGID

- Riigikogu otsus - katta taastuvelektriga kogu siseriiklik tarbimine
- Energiamaajanduse korralduse seadus, ENMAK2035 ja REKK2030

REAALNE VAJADUS

- Taastuenergia toodang 3-kordistub
- 50% taastuenergiast lisandub jaotusvõrku
- Tarbimine ja tootmine ei ole üheaegsed



ELEKTRISÜSTEEMI STABIILSUS

TOOTMINE



TARBIMINE



Väjakutsed:

- Sageduse ja pinge muutused
- Hinnavolatiilsus
- Katkestused, kustumine

Lahendused:

- Salvestid (akud, H2 jm)
 - Nutikas tarbimine
- (Kiiresti) juhitud tootmine

ELEKTRISÜSTEEMI TASAKAALUSTAMISE VÄLJAKUTSED

Ilmastikust sõltuv tootmine



Päikese- ja tuuleenergia tootlikkus on ajas suure varieeruvusega (päevad, aastaajad). Eriti problemaatilised on pikalt kestvad tuulevaiksed ja päikesevased perioodid.

Energiasalvestid ning reservvõimsused



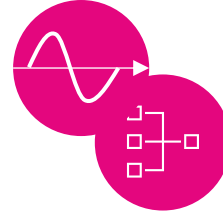
Tootmise ja tarbimise tasakaalu viimiseks on vaja suuri salvestusmahtusid ning kalleid reservvõimsusi, mis kataksid tarbimisnõudlust tootmise puudumisel.

Välisühendused ja regionaalne vaade



Samas geograafilises piirkonnas on üldiselt samadest taastuvenergiaallikatest tootmine ajaliselt kokkulangev. Välisühendused ei pruugi aidata süsteemi tasakaalustamisel.

Tehniline valmisolek



Elektrisüsteemid ja nende juhtimissüsteemid ei ole algselt ehitatud arvestamiseks hajutatud energiasüsteemiga kaasnevate väljakutsetega - inverterid, inertsivähenevamine, stabiilsus, jne.

Majanduslik mõju

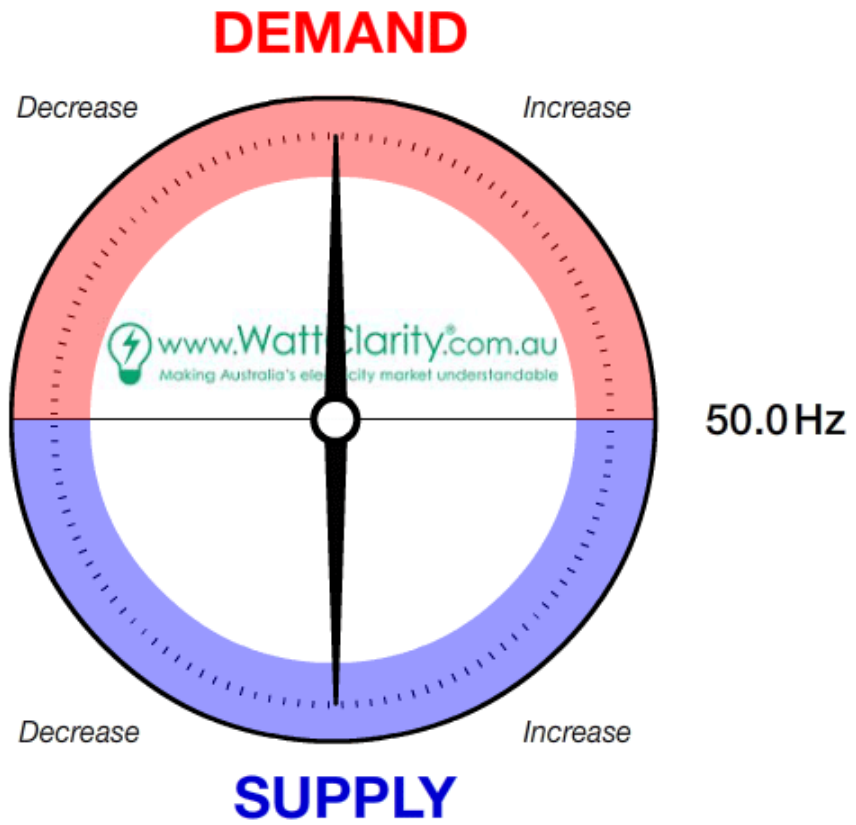


Investeeringute maksumus. Võrgutasude struktuur ja lisanduvad tasakaalustamisega seotud kulukomponendid. Tootmise/tarbimise piiramine või teadlik välja lülitamine.

Ühiskondlik aktsepteerimine



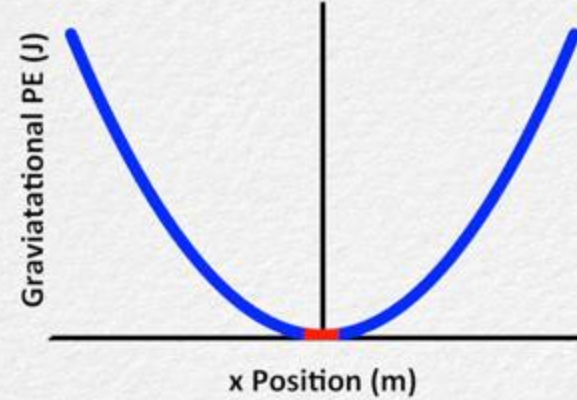
Ühiskondlik kokkulepe ja aktsepteerimine. Taastuvenergia tehnoloogia ja kaasneva taristu suur maakasutuse jalajälg. NIMBY mentaliteet.



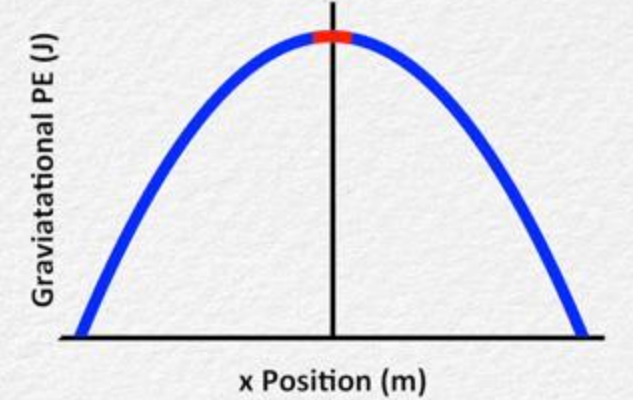
Equilibrium



Stable



Unstable

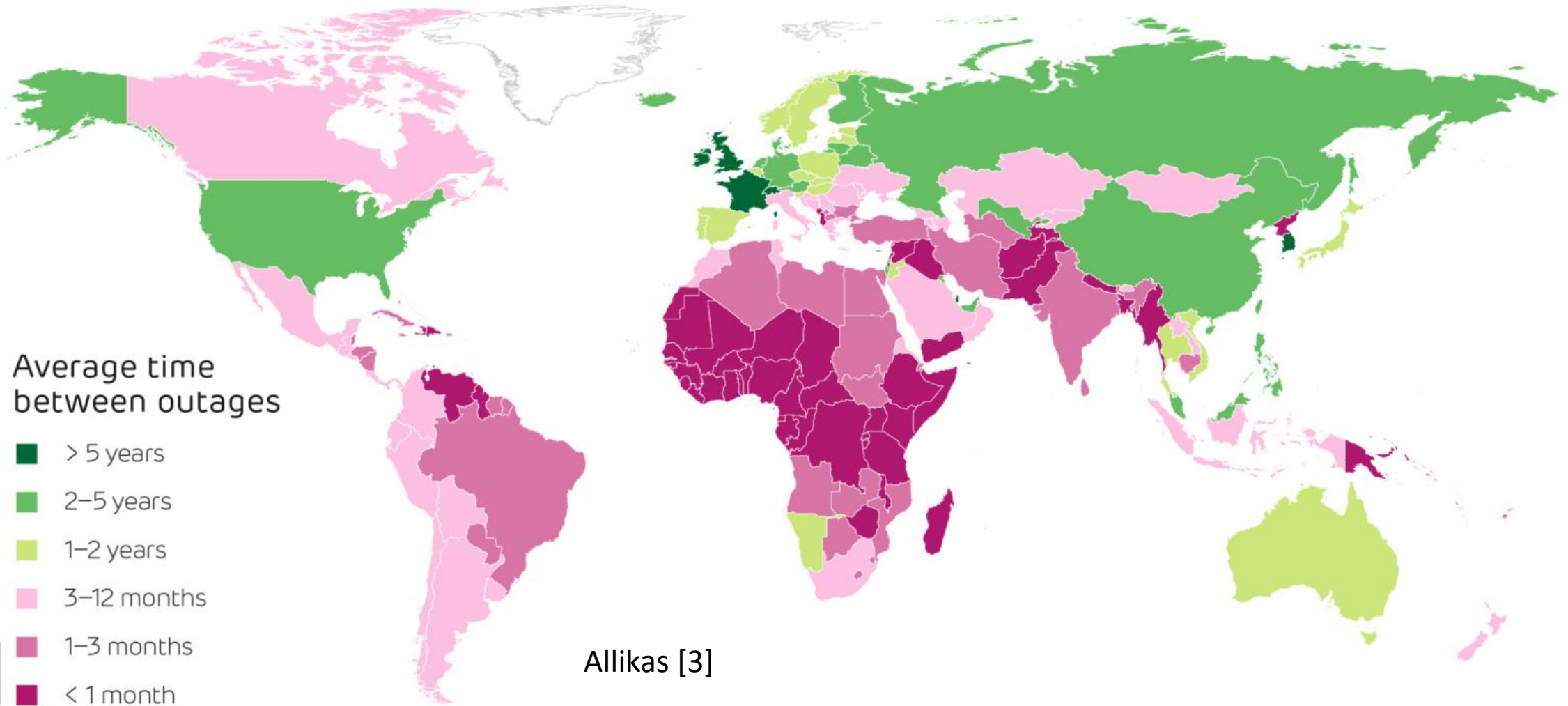


KATKESTUSED JA SELLE HIND

Saamata jäänud energia hind (Value of Lost Load)

- **Texas 2021 – 35685 \$/MWh** [1]
- **Eestis – 9206 €/MWh** (max 164715 €/MWh) [2]

Hispaania-Portugal – 1,6...4,5 miljardit € (Reuters, 29.04. 2025)



TAASTUVENERGIA KASVATAB NÕUDLUST JUHITAVA VÕIMSUSE EHK REGULEERIMISE JÄRELE

Storage power capacity
relative to peak demand

Storage power capacity
for a GB-sized system (GW)

100%

60

Allikas [4]

75%

45

50%

30

25%

15

0%

0

Share of demand met by variable renewable energy

Great Britain

- BEIS (2018)
- ◆ BNEF (2018)
- ★ Heuberger et al. (2018)
- + National Grid (2018) - CE
- × National Grid (2018) - CR
- National Grid (2018) - SP
- | National Grid (2018) - TD
- Price et al. (2018)
- ◆ Zeyringer et al. (2018)
- ▲ Carbon Trust (2016)
- Y CCC (2015)
- ★ Edmunds et al. (2014)

Germany

- Schill and Zerrahn (2018)
- ◆ Zerrahn et al. (2018)
- ★ BMWi (2017)
- + Repenning et al. (2015) KS 80
- × Repenning et al. (2015) KS 95
- Pape et al. (2014)
- ▲ Schill (2014)

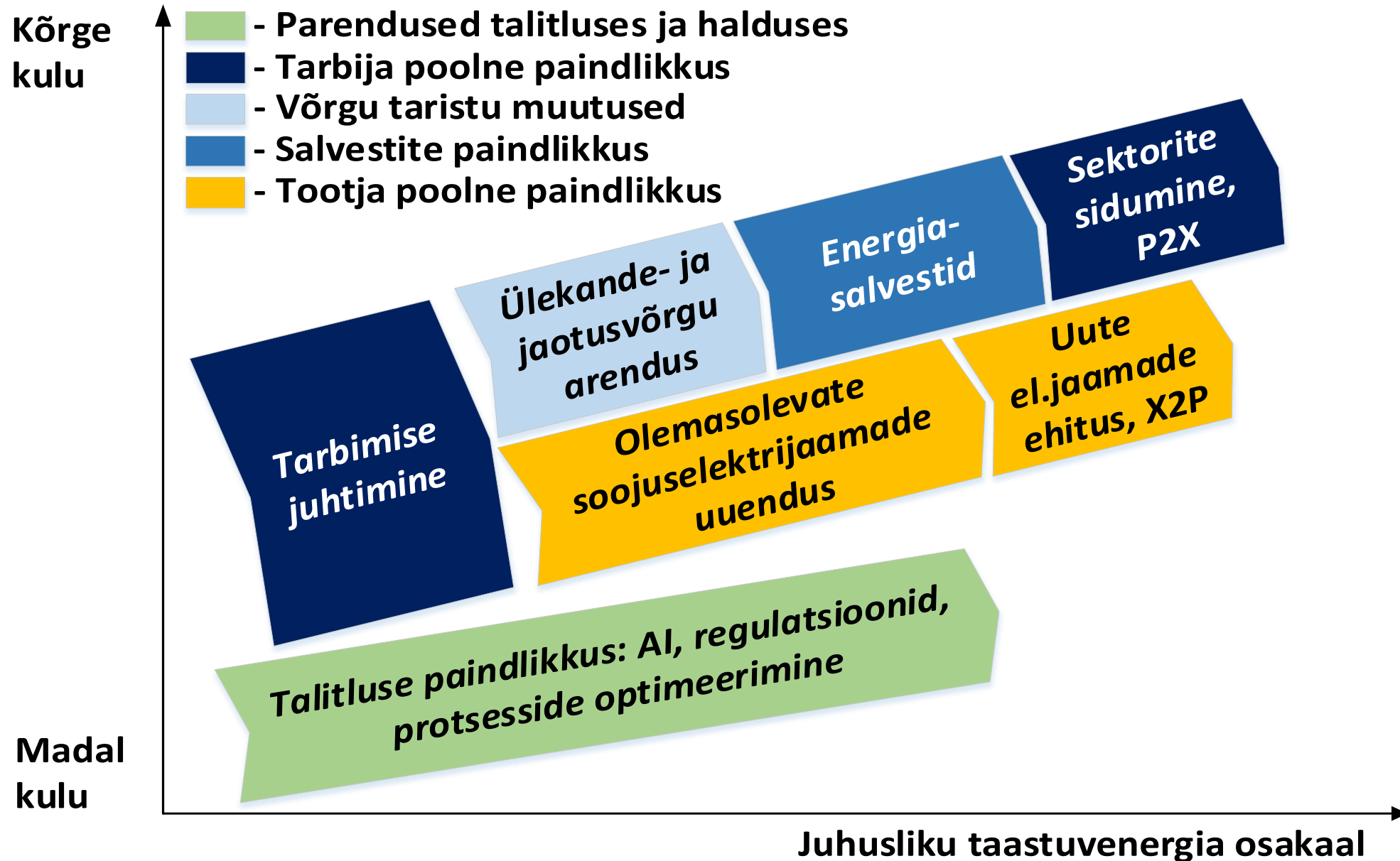
Europe

- Cebulla et al. (2017)
- ◆ Scholz et al. (2017)

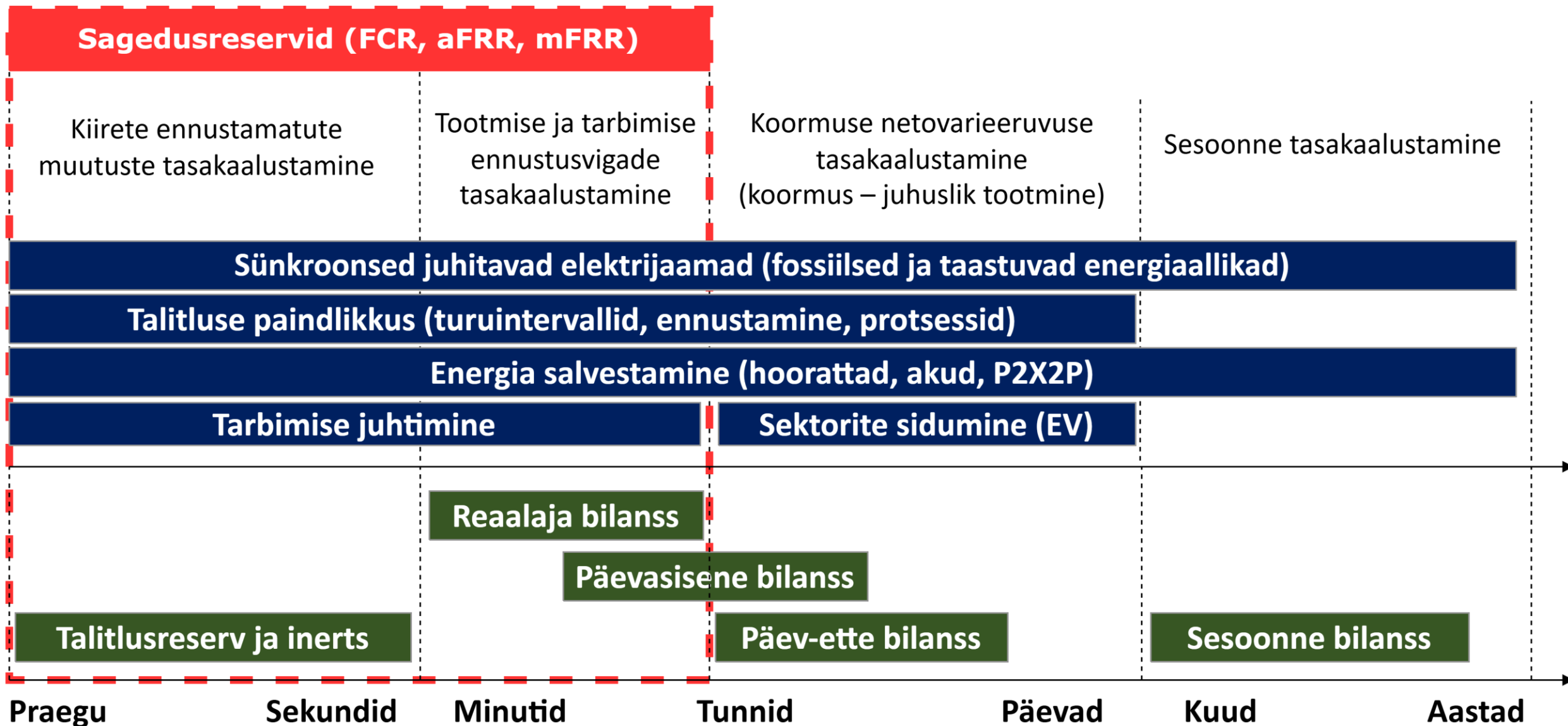
United States

- Denholm and Mai (2017)
- ◆ de Sisternes et al. (2016)
- ★ MacDonald et al. (2016)
- + Jacobson et al. (2015)
- Safaei and Keith (2015)
- ▲ Budischak et al. (2013)
- Y Denholm and Hand (2011)

JUHITAVATE VÕIMSUSTE LIIDESTAMISE KULU



ELEKTRISÜSTEEMI TASAKAALUSTAMISE VAJADUS – PAINDLIKKUS



EESTIS REGULEERIMISTEENUSE TOOTED (ELERING)

Sageduse hoidmise reserv

FCR

- Automaatne käivitus
- Käivitus 30 sek jooksul

Automaatne sageduse taastamise reserv

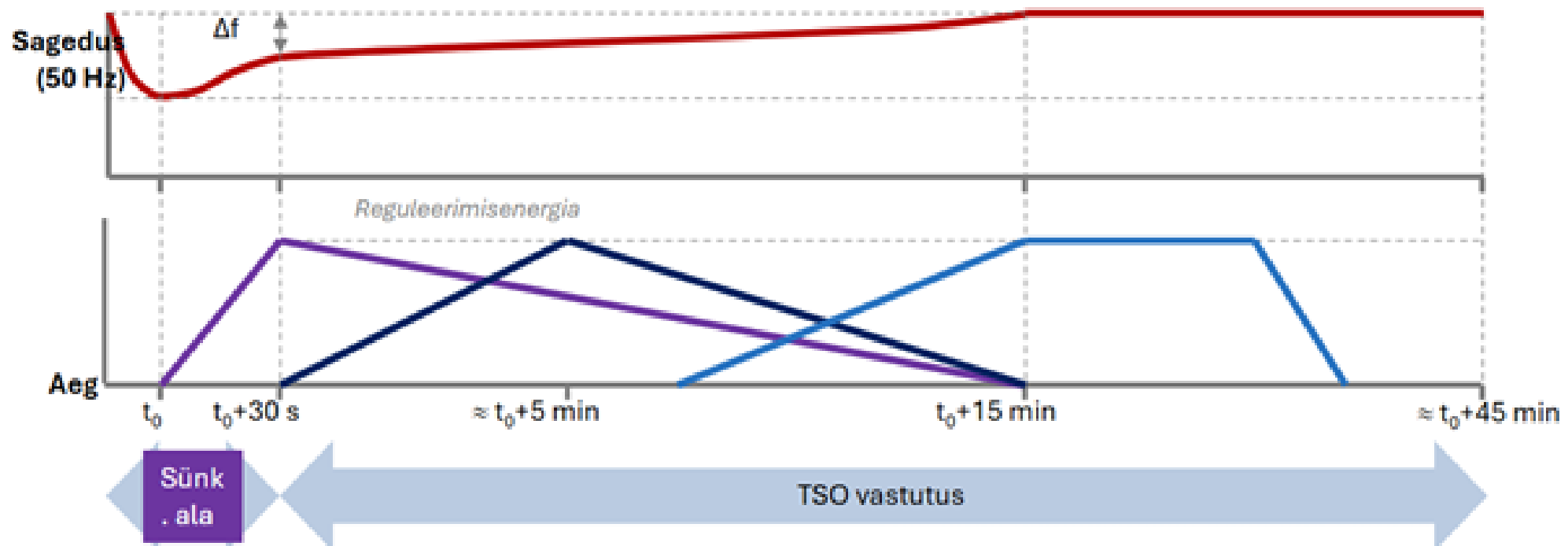
aFRR (+IN)

- Automaatne käivitus
- Käivitus alates 30 sek kuni 5 min

Manuaalne sageduse taastamise reserv

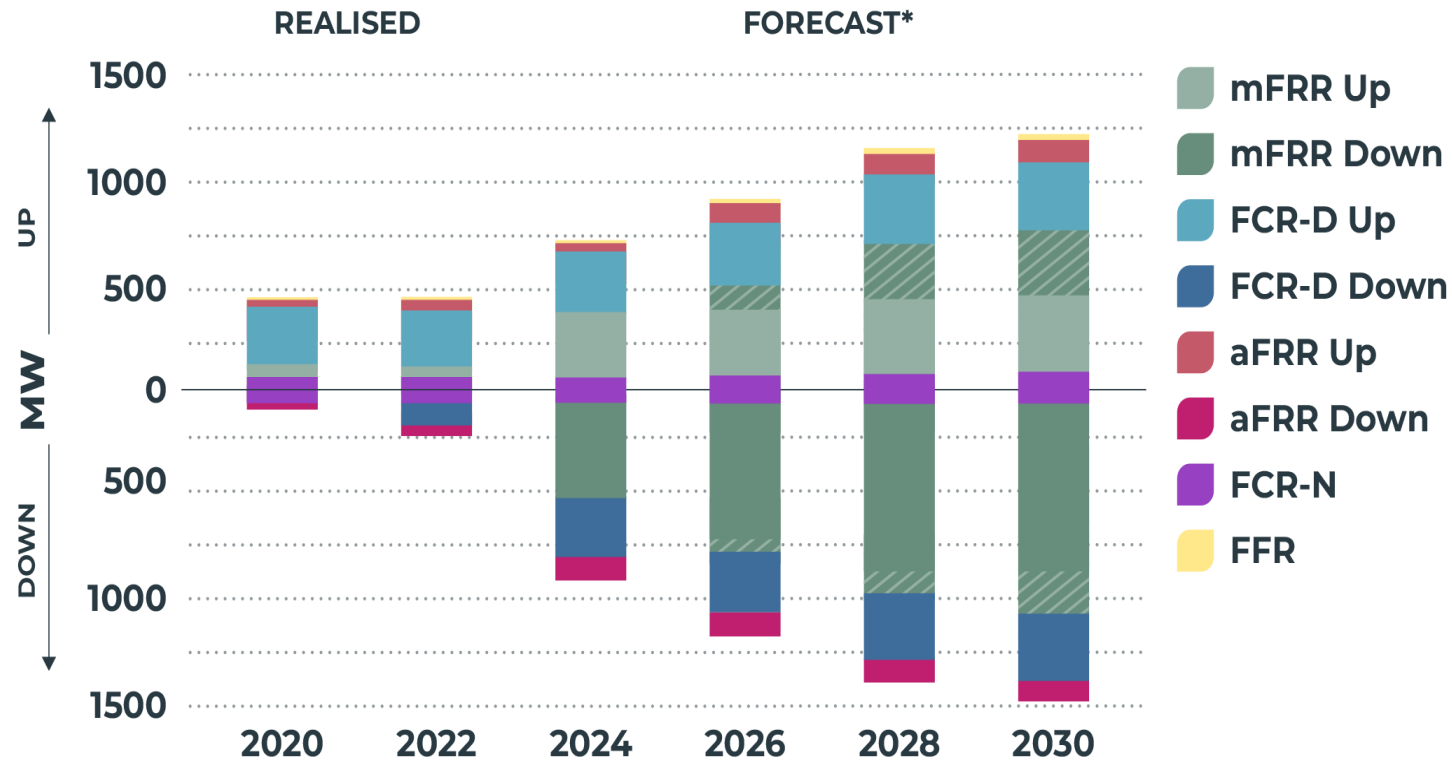
mFRR

- Planeeritud käivitus ja otse käivitus
- Käivitus kuni 12,5 min



TAASTUVENERGIA MÕJU SAGEDUSRESERVIDELE SOOMES

- **Soomlaste 2024->2030 plaan on ca 44%->54% taastuvelektrit:**
 - 3-kordistub tuul (70TWh)
 - 5-kordistub päike (10TWh)
- tunnistavad, et taastuvenergiaga lisandub elektrivõrku ebastabiilsust
- **5 aastaga kasvab sagedusreservide vajadus 134%,** seda turul, kus on 42% tuumaenergiat
- **Salvestite kasutuselevõttu toetatakse maksuvabastusega,** mis on 20% projekti väärtusest kuni 150 miljoni euron



Allikad [6-8]

TARBIMISE JUHTIMINE JA SALVESTAMINE AITAVAD HOIDA VÕRKU TASAKAALUS – AGA MILLISE HINNAGA?

Tarbimise juhtimise dünaamika

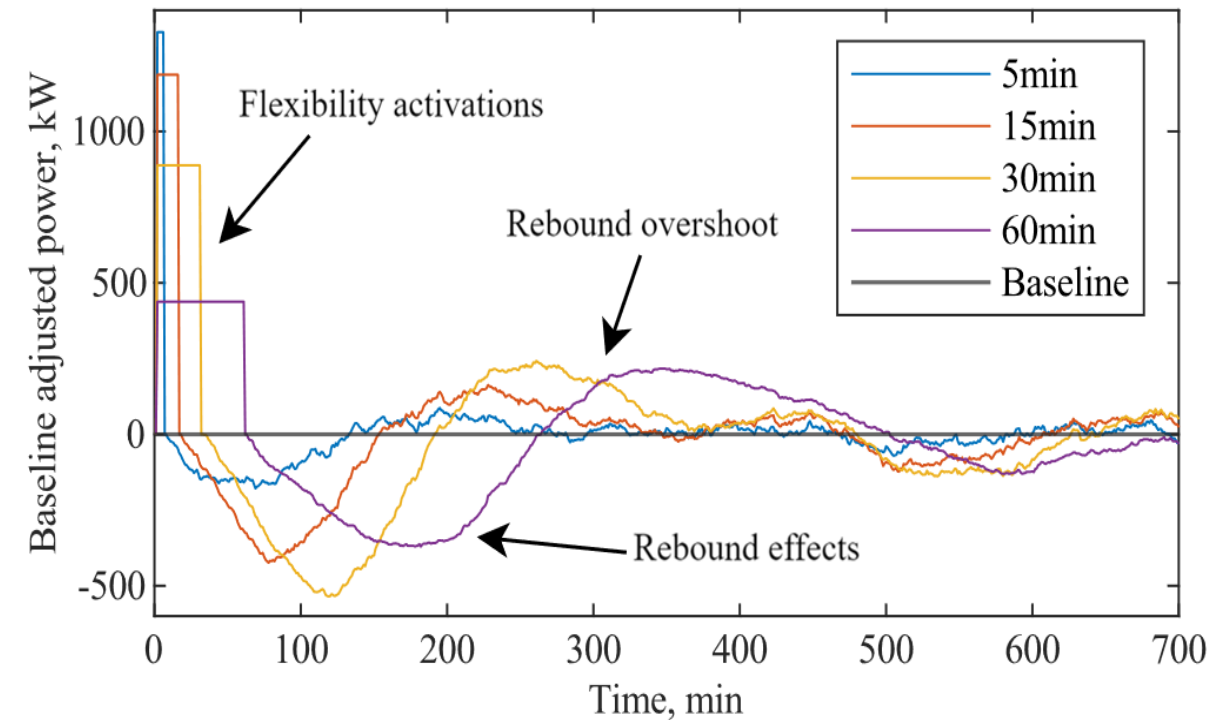
- Tarbimise juhtimisel või salvestatud energia kasutamisel on järgnevatel tundidel mõju kogu võrgu dünaamikale

Juhitud ressurss muutub juhitamatuks

- 1000 soojuspumba väljalülitus üheks tunniks
 - vähendab juhitavust järgmised 3 tundi
 - juhtimise eelne olukord taastub >10 tunniga

Miski ei toimu lõivu maksmata?!

- Tarbijate paindlikkus „tehakse tasa” järgnevatel tundidel hüppeliste koormuste muutustega, millega praegused süsteemide mudelid ei arvesta



Allikas [9]

MILLINE NÄEKS VÄLJA 100% TAASTUVENERGIA EESMÄRK 2024 AASTA VAATES?*

Taastuenergia



Lihtsustatult: 3,63x sama palju päikest ja tuult, kui toodeti 2024. aastal

- ca **2 900 MW päikest** (tipuvõimsus)
- ca **2 200 MW tuult** (tipuvõimsus)



Tulemus 100% kodumaisest elektritarbimisest oleks kaetud taastuenergiaga (päike, tuul)

Impordi (tootmise) vajadus



max **1 400 MW** (5 200 tunnil)

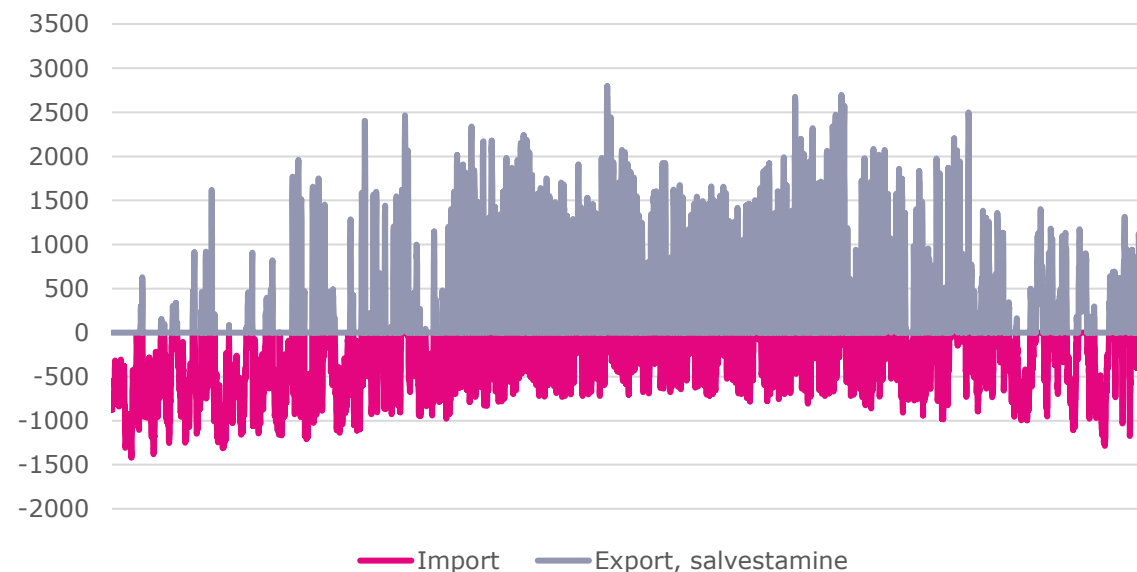
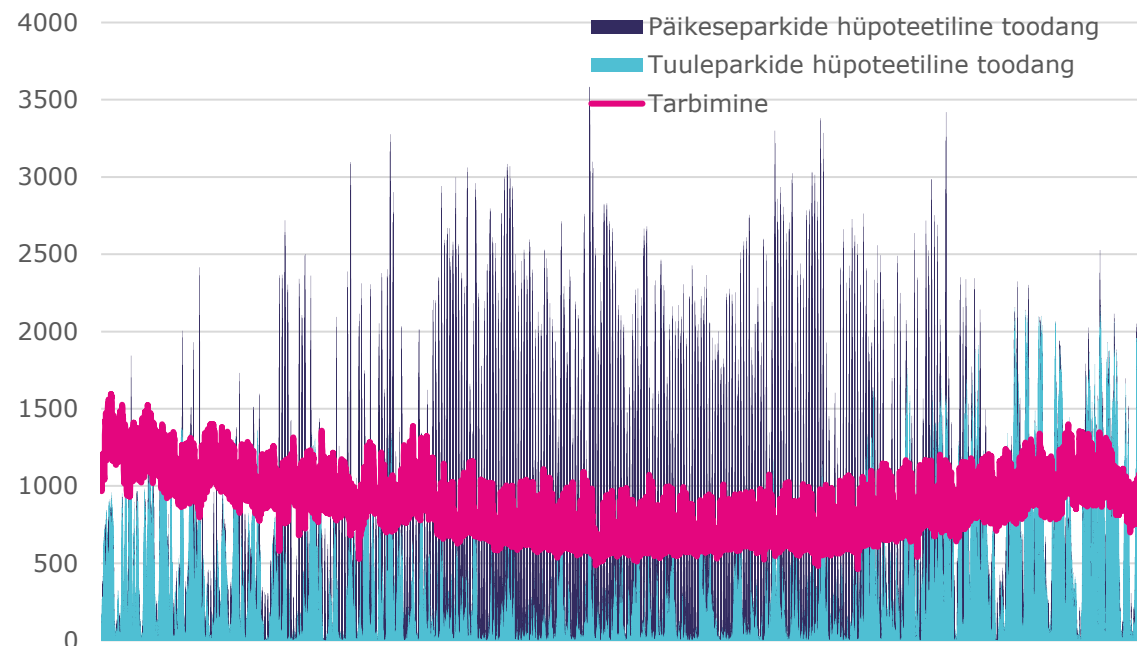
Ei korreleeru salvestamise võimalusega talvisel perioodil, kui taastuenergia tootmine on minimaalne

Ekspordi (salvestamise) vajadus



max **2 800 MW** (3 550 tunnil)

Hüpoteetilise salvesti maht: 2,66 TWh



*Arvutus põhineb ainult 2024. aasta Eleringi tarbimise, päikese- ja tuuleenergia aegridadel ning ei arvesta turu toimimist, aastate varieeruvust, ega muidu tegelikku olukorda mõjutavadi tegureid. Arvutuse eesmärgiks on näitlikustada, kuidas katta 100% aastast elektrenergia tarbimisest tuule- ja päikeseenergiast toodetud kogustega, ega pretendeeri absoluutsele tõele.

MIDA MUUTA ENERGEETIKATEADUSES JA SELLE HINDAMISES?

- **Määrata Eesti energiasüsteemi uuringute vajadus ning sisustada need pikaajaliste tegevuste ja baasrahastamisega, et tagada oskusteabe järjepidevus ja areng ülikoolis.**
- **Väärtustada rohkem Eesti energiasüsteemi planeerimise, digitaliseerimise ja majandamisega seotud rakendusteadust.**
- **Diferentseerida valdkonniti doktoriõppe rahastamine.** Ülikoolis doktorant 2300€ vs erasektori magistrikraad 4000€.
- **Puudu on elektrisüsteemi dünaamikast ja arengutest pikaajalist visiooni omavatest teadlastest/akadeemikutest.**
- **Poliitiline lobism tuleb asendada teadusliku faktipõhisusega, teadlase suhtlust avalikkusega tuleb rohkem väärtustada**



MIDA MUUTA ENERGEETIKAHARIDUSES?

- Elektrotehnika, mehhaanika ja TI rakendusliku poole integreerimine gümnaasiumi matemaatikasse ja füüsikasse.
- **Õppe kõrge kvaliteedi tagamiseks** on vaja raha ja meetmeid:
 - uuendada iga 10 a tagant õppetaristut
 - laiendada projektipõhist õpet ja siduda see riiklike väljakutsetega
 - Taristu investearingu ja jooksvate kulude katmiseks, suurendada õppetoetust vähemalt 1,5 korda
- Sarnaselt Soomele
 - **hinnata riiklikult erialade õpetamise reaalne kulu**, kus inseneeria õpe on sotsiaalteadustest 1,75 korda kallim.



KODUTÖÖ: ENERGIADefitsiit ja tootmise mitmekesisus?

Ehituse ja käituvõtmise aega on hinnatud eri allikate baasil AI-D kaasates

Elektrijaama tüüp	Tüüpiline ehitusaeg, a	Keskmine käiku-andmise aeg, a	Osakaal 2050	Märkused
Tuumaelektrijaam	7–15	10–20		Kõrge reguleeritus, pikad load ja turvanõuded
Süsi (fossiilkütus)	4–7	5–10		Langev trend – keskkonnanõuded ja investeeringuriskid
Põlevkivielektrijaam	5-8	6-10		Suured keskkonnanõuded, põlevkivi spetsiifiline
Maagaasijaam (CCGT)	2–4	3–5		Kiire ehitus, suhteliselt odav investeeering
Biokütusel elektrijaam	2-5	3-6		Vajab kindlat kütusevarustust, sobib hajutatud tootmiseks
Tuulepark (maismaa)	1–3	2–4		Kiire kasutuselevõtt, sõltub asukoha tuuleoludest
Tuulepark (merel)	3–6	5–8		Keerukam logistika ja tehnika
Päikeseelektrijaam (PV)	0,5–2	1–3		Väga kiire paigaldus, kasvav trend
Akusalvesti (BESS)	0,5-1,5	0,5-2		Väga kiire rakendamine, oluline tasakaalustamisel

KASUTATUD ALLIKAD

1. <https://www.utilitydive.com/news/texas-power-outages-cost-consumers-VOLL/726807/>
2. <https://www.konkurentsiamet.ee/analuusid-ja-uuringud/elekter#saamata-jaanud-energ>
3. <https://reports.electricinsights.co.uk/q3-2019/the-blackout/>
4. <https://reports.electricinsights.co.uk/q3-2019/how-much-energy-storage-will-we-need/>
5. [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/%20%20%20%20Publication/2018/Nov/IRENA Power system flexibility 1 2018.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/%20%20%20%20Publication/2018/Nov/IRENA_Power_system_flexibility_1_2018.pdf)
6. https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/julkaisut/asiakaslehdet/fingrid_1_2024.pdf
7. <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/kantaverkko/kantaverkon-kehittaminen/sahkon-tuotannon-ja-kulutuksen-kehitysnakymat-q1-2024-fingrid.pdf>
8. <https://capaloai.com/blog/finnish-bess-market/>
9. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10680507>



TAL TECH

ARUTELU JA TÄPSUSTAVAD KÜSIMUSED?



Kaasrahanud
Euroopa Liit



Eesti
tuleviku heaks

TEL: +372 5290305
ARGO.ROSIN@TALTECH.EE

