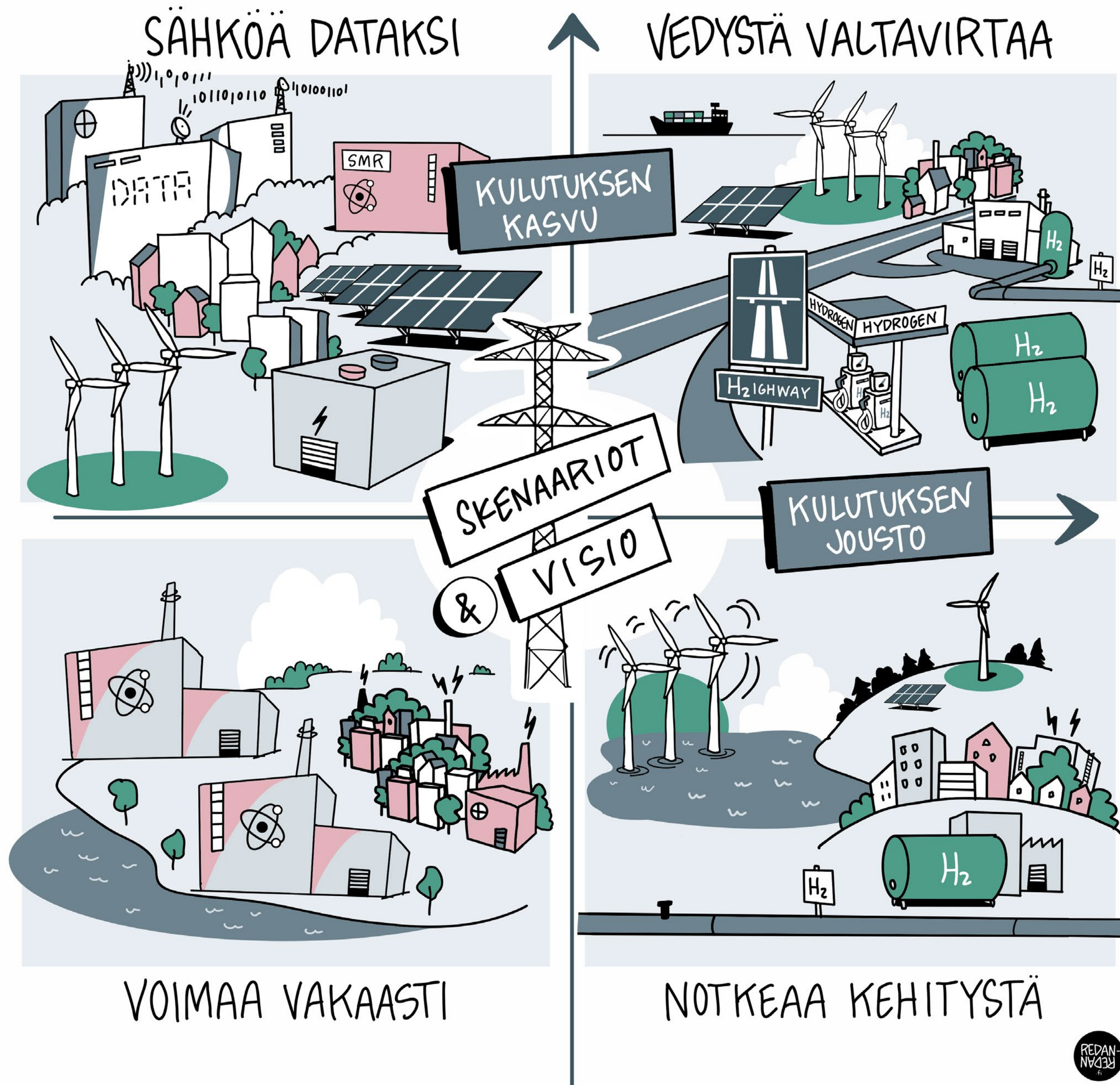




Fingridin sähköjärjestelmävisio vuodelle 2040

Loppuraportti
Lokakuu 2025

FINGRID



Fingridin sähköjärjestelmävisio vuodelle 2040

Loppuraportti lokakuu 2025

ESIPUHE	3
YHTEENVETO	5
1 JOHDANTO	7
2 SKENAARIOT	9
2.1 Yhteenveto	10
2.2 Sähköä dataksi	14
2.3 Vedystä valtavirtaa	17
2.4 Notkeaa kehitystä	20
2.5 Voimaa vakaasti	23
3 SKENAARIOIDEN SIIRTOTARPEET	26
3.1 Yhteenveto	28
3.2 Investointien maantieteellinen sijainti	29
3.3 Poikkileikkausten siirtotarpeet	31
3.4 Joustojen vaikutus siirtotarpeeseen	32

4 KANTAVERKON VAHVISTUSTARPEET	33
4.1 Yhteenveto	35
4.2 Skenaarioiden verkkovahvistukset	37
4.3 Verkkovahvistukset: Sähköä dataksi	39
4.4 Verkkovahvistukset: Vedystä valtavirtaa	41
4.5 Verkkovahvistukset: Notkeaa kehitystä	43
4.6 Verkkovahvistukset: Voimaa vakaasti	45
4.7 Verkostolaskenta	47
5 KANTAVERKON TEHOKAS HYÖDYNTÄMINEN	48
5.1 Yhteenveto	49
5.2 Investointien sijainnin vaikutus	50
5.3 Alueellisen tuotantotariffin vaikutus	54
5.4 Sähkö- ja vetyjärjestelmän joustojen vaikutus	55
5.5 Toimenpiteet kantaverkon siirto- ja liittämiskyvyn varmistamiseksi	56

6 MUUT SKENAARIOIDEN TOTEUTUMISEN EDELLYTYKSET	57
6.1 Yhteenveto	58
6.2 Kilpailukyky	59
6.3 Sähkön riittävyys ja tehotasapainon hallinta	64
LIITE A	72
A.1 Skenaarioiden mallinnus	73
A.2 Sähkön kulutus	74
A.3 Sähkön tuotanto	77
A.4 Sähkön rajasiirtoyhteydet	77
A.5 Ympäröivä maailma	77
A.6 Laskelmissa käytetyt pääoma- ja käyttökustannukset sekä hyödykehinnat	78

Esipuhe

Viimeiset vuodet ovat olleet Euroopan energiamarkkinoilla merkittävien muutosten aikaa. Euroopan ilmastotavoitteet ovat maailman kunnianhimoisimpien joukossa, mikä on viitoittanut polkua sähköistyneempään ja puhtaampaan energiajärjestelmään. Venäjän hyökkäys Ukrainaan vuonna 2022 aiheutti energiakriisin, joka toi uuden ajurin EU:n fossiilisten tuontipolttoaineiden käytön vähentämiseen. Tähän päästään sähköistämällä niin teollisuus kuin kotitalouksien lämmitys ja liikenne. Euroopassa puhtaan sähkön kysynnän odotetaan kasvavan merkittävästi tulevana vuosina, ja Suomella on tässä kehityksessä erityinen asema. Meillä on poikkeuksellisen suuri ja kilpailukykyinen uusiutuvan sähkön tuotantopotentiaali, joka tarjoaa vahvan perustan menestykselle energiamurroksessa. ➤



Energiamurros näkyy selvästi Fingridin toiminnassa. Uusiutuvan sähkön tuotantohankkeiden liityntäkyselyt ovat kasvaneet tasaisesti jo usean vuoden ajan, ja viime aikoina myös sähkön kysyntähankkeiden määrä on lisääntynyt nopeasti. Näitä hankkeita on jo toteutettu erityisesti tuotantopuolelle, jonka myötä Suomessa ollaan sähkön suhteen omavarainen vuositasolla. Kasvu on myös jatkumassa ja viime vuosina useat kysyntähankkeet ovat saaneet investointipäätöksen ja edenneet rakentamisvaiheeseen. Valtaosa Fingridin saamista sähkön kysyntähankkeiden liityntäkyselyistä liittyy teollisiin investointeihin kuten datakeskuksiin, vety- ja sähköpolttoainehankkeisiin sekä tehdasteollisuuteen. Suomen kilpailukyky ratkaisee pitkälti sen, missä määrin nämä hankkeet toteutuvat.

Luotettava sähköverkko on keskeinen kilpailukykytekijä teollisille energiaintensiivisille investoinneille. Siksi kantaverkon pitkän aikavälin suunnittelussa on tärkeää huomioida, että kantaverkko mahdollistaa sähkön kulutuksen ja tuotannon kasvupotentiaalin tulevaisuudessa.

Fingridin sähköjärjestelmävision avulla tarkastellaan Suomen potentiaalia kantaverkon kehittämistarpeiden ja sähköjärjestelmän muutosten näkökulmasta. Tavoitteenamme on visiotyön kautta ymmärtää kantaverkkoasiakkaiden tulevaisuuden tarpeita ja siten mahdollistaa puhtaan energian investointien toteutuminen Suomessa. Visiotyössä on huomioitu tuoreimmat yhteiskunnan ja energia-alan signaalit kehityksen suunnasta ja nopeudesta, mutta kulutuksen ja tuotannon kehittymiseen liittyy paljon epävarmuuksia. Sen vuoksi on syytä tarkastella useita erilaisia kehityskulkuja ja luoda niihin valmiuksia.

Useimmissa sähköjärjestelmävision skenaarioissa kanta-verkon kasvu ja vahvistustarpeet ovat huomattavia. Koska uusien voimajohtojen toteutus vie aikaa, on esimerkiksi luvituksen vauhdittaminen keskeinen edellytys kehityksen mahdollistamiselle. Verkon vahvistamisen rinnalla on tärkeää maksimoida sekä nykyisen että uuden verkon siirtokyky ja käyttöaste. Tämä edellyttää uusien teknologisten ratkaisujen hyödyntämistä sekä kannustimia, jotka ohjaavat tuotantoa ja kulutusta hyödyntämään kantaverkkoa tehokkaasti. Näin voidaan liittää verkkoon asiakkaita nopeammin sekä vahvistaa Suomen kilpailukykyä ja siirtymää kohti päästötöntä yhteiskuntaa.

Siirtojenhallinnan tärkeyden lisäksi sähköjärjestelmävision analyysi korostaa joustavuuden merkitystä niin kulutuskuin tuotantopuolella tulevaisuuden sähköjärjestelmässä. Sähkömarkkinamallin tulee tarjota kannusteita kulutuksen ja tuotannon tasapainottamiseen. Mikäli joustavaa, säästä riippumatonta sähköntuotantoa ei synny markkinaehtoisesti – kuten visiotyö indikoi – siihen tulee sähköjärjestelmässä löytää uudenlaisia tukiratkaisuita. Edellä mainittuihin haasteisiin on löydettävä ratkaisut, jotta energiasiirtymä on yhteiskunnalle hyväksyttävää ja saamme hyödynnettyä Suomen kilpailuedun puhtaan sähkön tuotannossa.

Euroopan energiamurros on vasta alussa – ja sen vauhti kiihtyy. Suomella on erinomaiset edellytykset menestyä tässä muutoksessa, mikäli sähköjärjestelmää ja sähkömarkkinoita kehitetään aktiivisesti. Fingridin sähköjärjestelmävisio edistää omalta osaltaan tätä päämäärää.



Jussi Närhi

Erikoisasiantuntija, strateginen verkkosuunnittelu

Annika Ahtiainen

Yksikön päällikkö, strateginen verkkosuunnittelu

Yhteenveto

Sähköjärjestelmävisiossa esitellään neljä erilaista skenaariota Suomen sähköjärjestelmän kehitykselle vuoteen 2040 mennessä. Nämä jakautuvat korkeamman kasvun Sähköä dataksi ja Vedystä valtavirtaa -skenaarioihin sekä maltillisemman kasvun Notkeaa kehitystä ja Voimaa vakaasti -skenaarioihin. Jokainen skenaario tarkastelee sähkön kulutuksen ja tuotannon kasvua eri näkökulmista, kuten datakeskusten, vetyteollisuuden ja uusiutuvan energian tuotannon osalta. Skenaarioiden eriävät kehityskulut haastavat kantaverkon kehittämistä ja sähköjärjestelmää eri tavoin, ja visiossa tunnistamme niiden toteuttamiseksi vaadittavat kantaverkon vahvistustarpeet sekä muut toimenpiteet. >



➤ Skenaarioissa kasvava asiakaskysyntä nostaa sähkön siirtotarvetta ja luo tarpeen kantaverkon vahvistamiselle. Korkeamman kasvun skenaarioissa siirtotarve voi nousta jopa viisinkertaiseksi nykytilanteeseen verrattuna. Siirtotarpeita käsitellään yksinkertaistetusti kasvavan pohjois-eteläsuuntaisen siirron näkökulmasta, mikä kuitenkin antaa kuvan sähköjärjestelmän siirtokyvystä ja liitettävyydestä. Kasvava asiakkaiden siirtotarve edellyttää merkittäviä investointeja kantaverkon vahvistamiseen kasvun mahdollistamiseksi.

Kantaverkon vahvistustarpeet vaihtelevat skenaarioittain, mutta useammassa skenaarioissa vaadittuja uusia vahvistuksia tunnistettiin noin 1000 kilometrin edestä. Korkeimmillaan tarvitaan jopa 4000 kilometriä uutta 400 kV johtoa korkeimpiin siirtotarpeisiin vastaamiseksi nykyisessä kehittämissuunnitelmassa tunnistetun 3800 kilometrin lisäksi. Skenaarioiden toteutuminen edellyttää kantaverkon ennakoivaa ja oikea-aikaista kehittämistä, jonka mahdollistamiseksi muun muassa taloudellisen sääntelyn ja luvituksen on tuettava asiakastarpeisiin vastaamista.

Sähkön kantaverkon vahvistusten lisäksi Fingridin tavoitteena on hyödyntää kantaverkkoa entistä tehokkaammin, mikä on myös edellytys korkeimpien kasvuskenaarioiden toteutumiselle. Kantaverkon tehokkaaseen hyödyntämiseen vaikuttavat erityisesti investointien sijainti ja siirtotilanteiden hallintaan käytettävissä olevat joustot. Mikäli tuotanto ja kulutus sijoittuvat lähemmäs toisiaan, saadaan sähköä siirrettyä vähemmillä investoinneilla kantaverkkoon. Lisäksi joustoilla voidaan hallita korkeimpia siirtohuippuja ja siten parantaa liitettävyyttä. Kantaverkon tehokas hyödyntäminen edellyttää

kannusteita investointien sijoittumiselle kantaverkon kannalta oikeaan paikkaan sekä insentiivejä joustojen hyödyntämiseen kantaverkon siirtotarpeiden hallitsemiseksi. Näitä keinoja voivat olla esimerkiksi alueelliset liittymismaksut tai tariffit ja joustavat liittynät asiakkaan ja Fingridin välillä.

Suomella on merkittävä kilpailuetu sähköintensiivisen teollisuuden investointien houkuttelussa. Uusiutuvan sähköntuotannon, erityisesti maatuulivoiman, lisärakentamispotentiaali tukee investointeja ja sähkön hintatason pysymistä kilpailukykyisenä eri skenaarioissa. Sähkön riittävyys ja tehotasapainon hallinta edellyttävät investointeja joustokykyyneen sekä tuotanto- että kulutuspuolella. Kaikkien näiden investointien toteutumisesta myös muiden tekijöiden, kuten rahoituksen, luvituksen sekä poliittisen ja taloudellisen toimintaympäristön vakauden täytyy tukea kasvua. Epävarmuudet eri sektorien kehityksestä ovat suuria ja erityisesti korkeamman kasvun skenaarioiden kasvu on mahdollista vain, jos Suomi on teollisten investointien näkökulmasta houkutteleva maa.

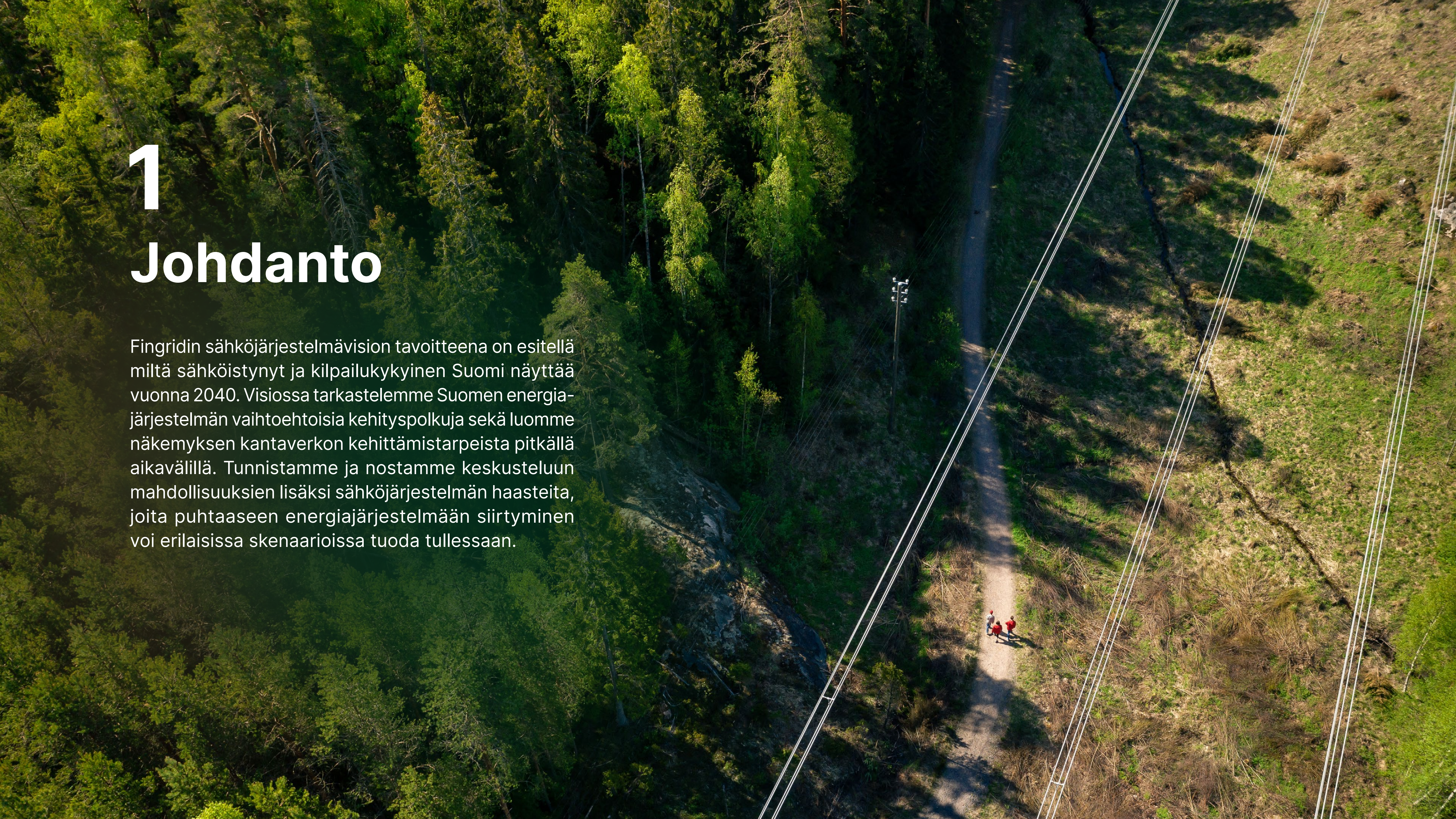
Fingridin visiona on puhdas, varma ja Euroopan kilpailukykyisin sähköjärjestelmä. Sähköjärjestelmävisio osoittaa, että Suomella on kaikki edellytykset toteuttaa jopa korkeimmat kasvuskenaariot kohti puhdasta ja kilpailukykyistä sähköjärjestelmää. Skenaarioiden toteutuminen edellyttää sekä kantaverkon ennakoivaa kehittämistä että kattavaa yhteistyötä asiakkaiden kanssa ja muita keinoja kantaverkon tehokkaaksi hyödyntämiseksi. Tämän lisäksi muun toimintaympäristön tulee tukea kasvua, jotta Suomi pysyy houkuttelevana ja kilpailukykyisenä investointikohteena.



1

Johdanto

Fingridin sähköjärjestelmävision tavoitteena on esitellä miltä sähköistynyt ja kilpailukykyinen Suomi näyttää vuonna 2040. Visiossa tarkastelemme Suomen energiajärjestelmän vaihtoehtoisia kehityspolkuja sekä luomme näkemyksen kantaverkon kehittämistarpeista pitkällä aikavälillä. Tunnistamme ja nostamme keskusteluun mahdollisuuksien lisäksi sähköjärjestelmän haasteita, joita puhtaaseen energiajärjestelmään siirtyminen voi erilaisissa skenaarioissa tuoda tullessaan.



Suomi on houkutteleva kohde puhtaan sähkön tuotannon ja kulutuksen investoinneille, jotka tarvitsevat vahvan ja luotettavasti toimivan sähkön kantaverkon. Fingridin vastaanottamat liityntäkyselyt uusiutuvalle sähkön tuotannolle ovat nousseet yli 400 gigawattiin ja kulutuskohteille noin 70 gigawattiin. Sähkövarastojen liityntäkyselyt ovat ylittäneet jo 30 gigawattia. Liityntäkyselyt vastaavat moninkertaisesti Suomen nykyistä tuotantoa ja kulutusta sekä kuvaavat hyvin Suomen suurta investointipotentiaalia.

Visiotyössä luodaan näkemys erilaisissa kehityskuluissa tarvittavista verkkovahvistuksista ja muista mahdollisista toimenpiteistä kasvun mahdollistamiseksi ja Suomen ilmastotavoitteiden saavuttamiseksi sähköjärjestelmän näkökulmasta. Vaikeasti ennustettavia pitkän aikavälin muutoksia tarkastellaan neljän eri skenaarion avulla. Tarkoituksena ei ole yrittää löytää yhtä todennäköistä skenaariota, vaan pyrimme korostamaan erilaisia ilmiöitä, jotka haastavat kantaverkkoa ja sähköjärjestelmää eri tavoin. Kehityksen arviointi monipuolisten ja haastavien skenaarioiden kautta auttaa varmistamaan, että keinoja sähköistymisen ja puhtaaseen energiajärjestelmään siirtymisen mahdollistamiseksi pystytään arvioimaan kattavasti ja ajoissa. Tärkeää on myös pystyä tekemään siirtymä kohti puhdasta energiajärjestelmää luonnon kannalta kestävällä tavalla ja pyrkiä tehostamaan kantaverkon maankäyttöä.

Sähköjärjestelmävision tuloksia ei tule tulkita investointisuunnitelmana tai toimenpidelistana. Raportissa osoitetaan skenaariokohtaisia, tietyistä kehityspoluista riippuvia verkkovahvistustarpeita, jotka auttavat varautumaan erilaisten tulevaisuuksien toteutumiseen. Lisäksi useammassa kuin yhdessä skenaariossa esiin nousevat verkkovahvistukset ovat usein hyvin keskeisiä jatkotarkasteluun pitkällä aikavälillä. Sähköjärjestelmävision lisäksi Fingrid esittelee seuraavan kymmenen vuoden aikana tarvittavia kantaverkkoinvestointeja joka toinen vuosi päivitettävässä kantaverkon kehittämissuunnitelmassa.

Tässä raportissa esittelemme Fingridin neljä erilaista skenaariota vuodelle 2040 ja niiden pohjalta nousevat kantaverkon kehitystarpeet, sekä myös millaisia muutoksia skenaariot tarkoittavat koko sähköjärjestelmälle. Skenaariotyöhön saimme arvokasta palautetta sidosryhmiltä keväällä 2025, mitä hyödynsimme skenaarioiden viimeistelyssä. Seuraavat luvut esittelevät skenaariot (luku 2), niissä esiintyvät siirtotarpeet (luku 3) ja tarvittavat kantaverkon vahvistustarpeet (luku 4), kantaverkon tehokkaan hyödyntämisen vaikutukset (luku 5) sekä muut skenaarioiden toteutumisen edellytykset (luku 6). Lisäksi liitteessä A on esitelty skenaarioiden mallinnuksessa ja taustatekijöistä tehdyt oletukset.



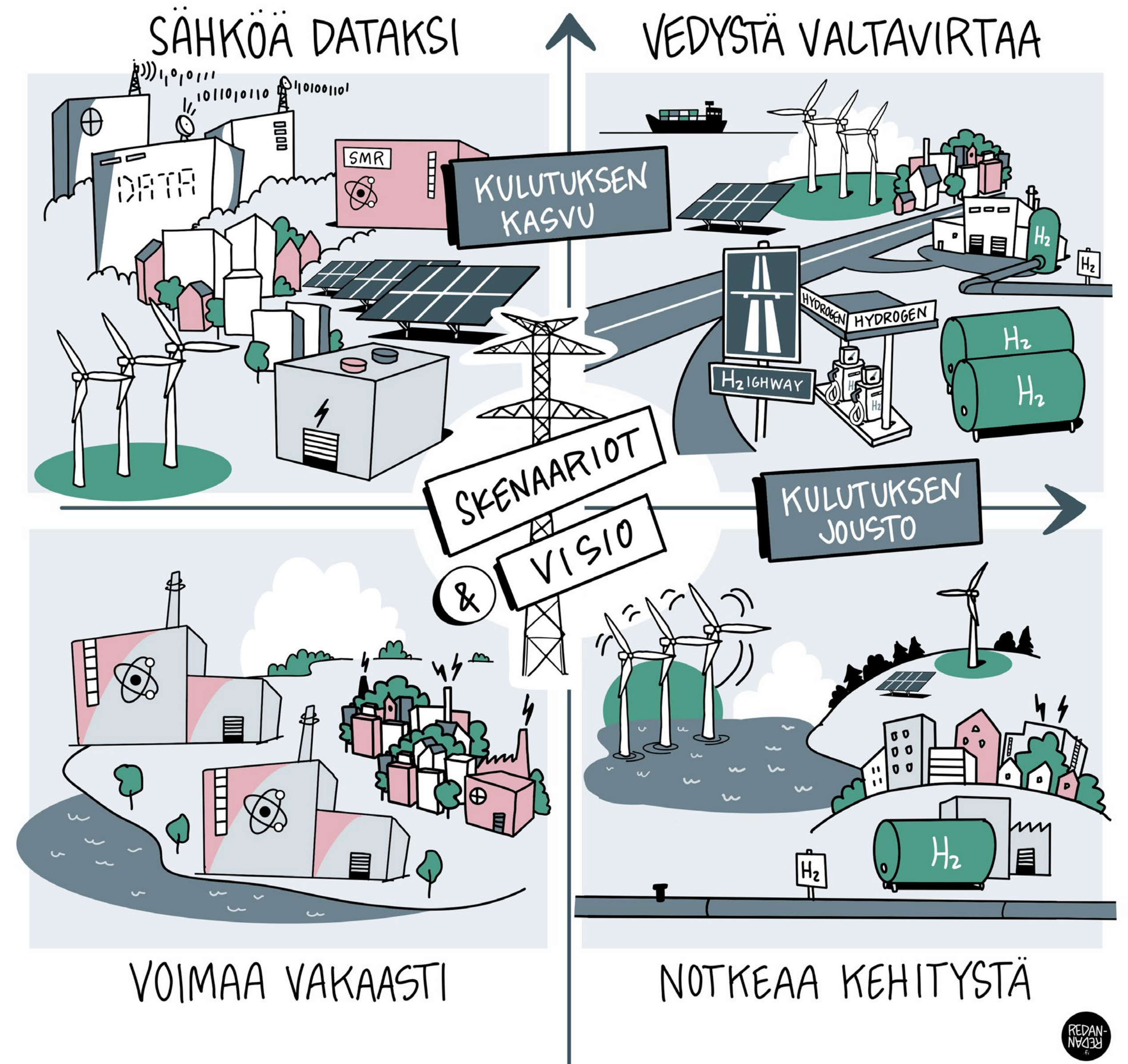
2

Skenaariot

Sähköjärjestelmävisiossa kantaverkon verkkovahvistusten tarvetta arvioidaan erilaisissa skenaarioissa. Skenaarioiden kasvutekijöinä olemme huomioineet muun muassa Suomen ilmastotavoitteet ja muun muassa hiilineutraaliuden saavuttamiseen tähtäävät teollisuuden vähähiilisyys-tiekartat¹, VTT:n laatimat skenaariot liikenteelle ja lämmityksen voimakkaan sähköistymisen. Jokaisessa skenaariossa on kuitenkin myös omat kasvutekijänsä ja siten ne edustavat sähkön kulutuksen ja tuotannon erilaisia, mutta mahdollisia kehityspolkuja. Nämä kehityspolut on valittu siten, että ne haastavat kantaverkon kehittämistä eri tavoin ja auttavat varautumaan kantaverkon suunnittelussa erilaisiin tulevaisuuskuviin.

Ensimmäisessä luvussa on esitetty yhteenveto skenaarioista ja seuraavissa luvuissa jokainen skenaario esitellään tarkemmin.

¹Vähähiilisyystiekarttojen päivittäminen 2024 - Työ- ja elinkeinoministeriö

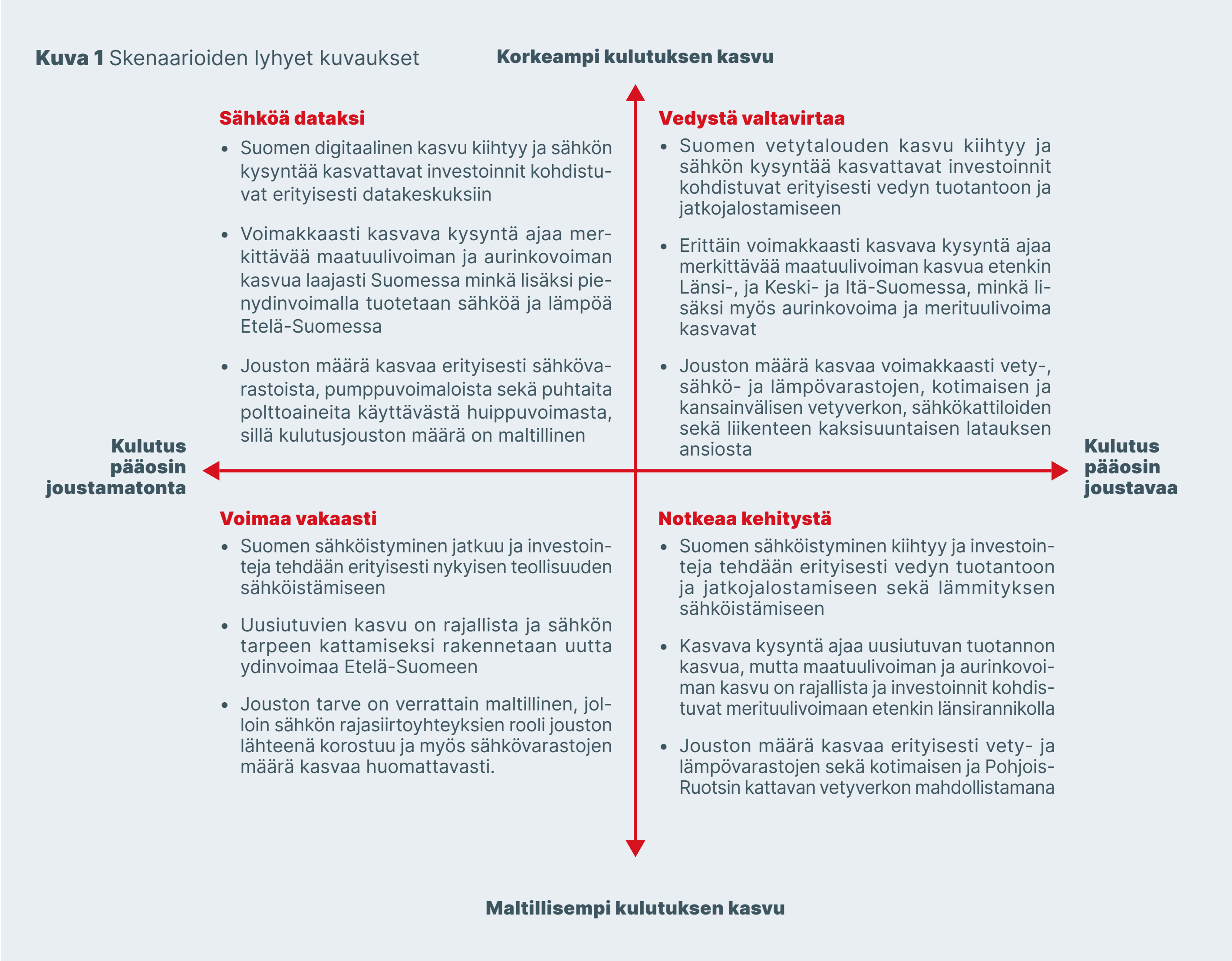


2.1 Yhteenveto

Kaksi tärkeintä skenaariomuuttujaa ovat **sähkön kulutuksen kasvunopeus** sekä **sähkön kulutuksen joustavuus**. Näistä on luotu neljä skenaariopohjaa:

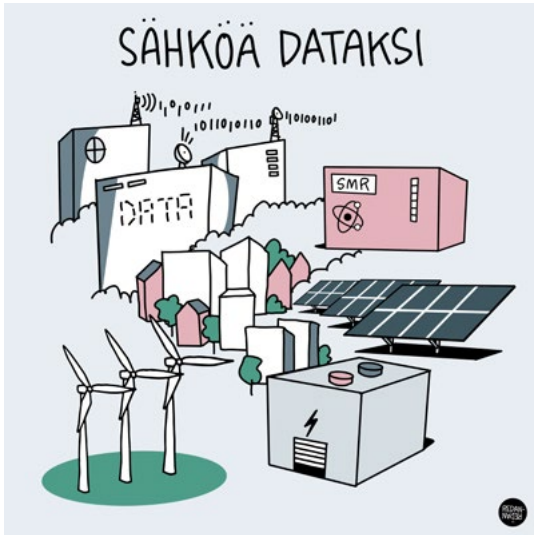
- 1. Sähköä dataksi** - korkeamman kulutuskasvun skenaario, jossa kulutus on pääosin joustamatonta
- 2. Vedystä valtavirtaa** - korkeamman kulutuskasvun skenaario, jossa kulutus on pääosin joustavaa
- 3. Voimaa vakaasti** - maltillisemman kulutuskasvun skenaario, jossa kulutus on pääosin joustamatonta
- 4. Notkeaa kehitystä** - maltillisemman kulutuskasvun skenaario, jossa kulutus on pääosin joustavaa.

Seuraavaksi esitetään skenaarioiden lyhyt kuvaus ja merkittävimmät skenaariotekijät.



Taulukko 1
Skenaarioiden
merkittävimmät
muuttujat

- +++ = Voimakasta kasvua
- ++ = Kohtalaista kasvua
- + = Maltillista kasvua
- ≈ = Ennallaan
- = Maltillista vähenemistä
- = Kohtalaista vähenemistä



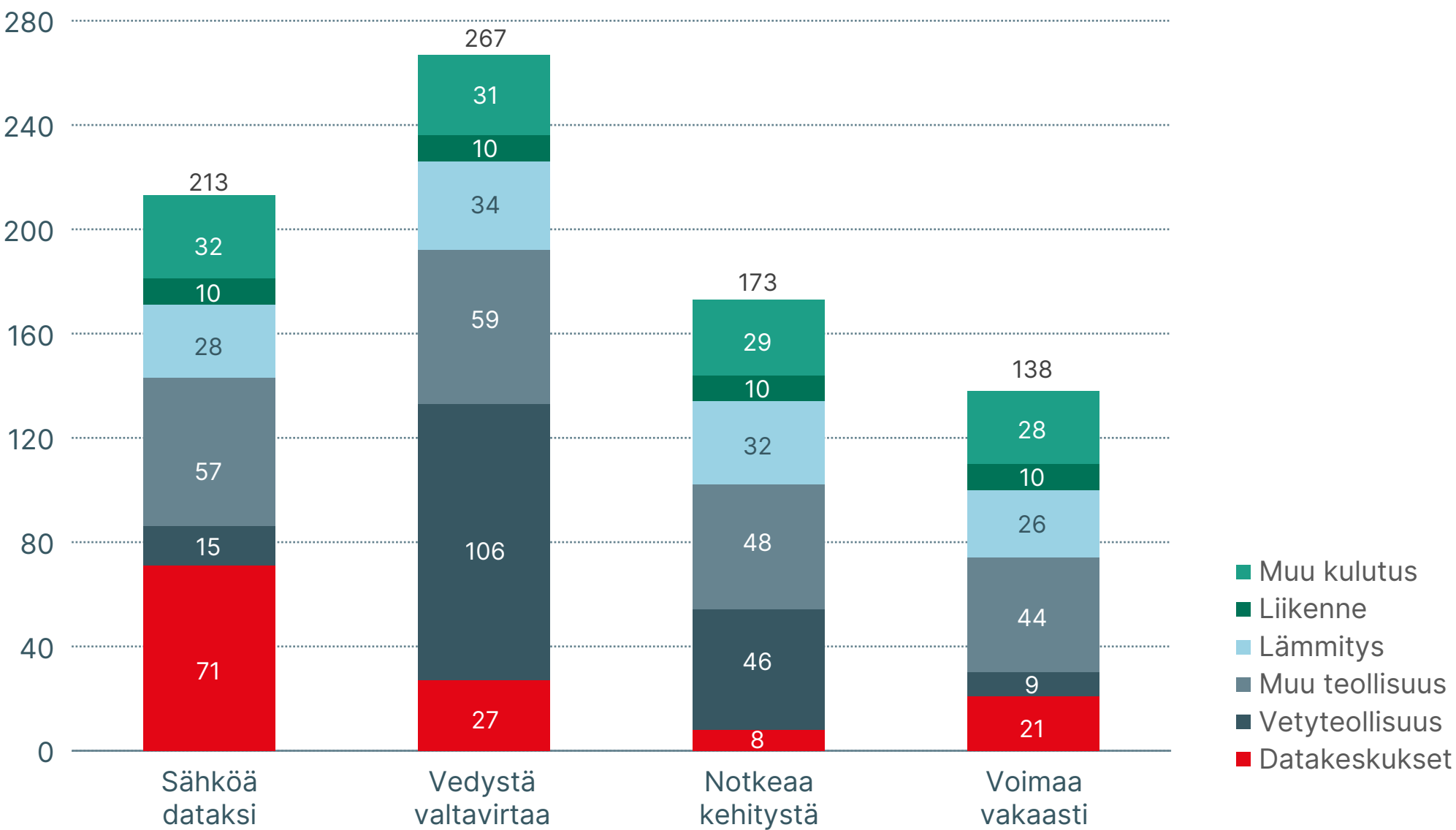
Skenaariotekijä		Sähköä dataksi	Vedystä valtavirtaa	Notkeaa kehitystä	Voimaa vakaasti
Kulutus	Sähkön kulutus	+++	+++	++	+
	Kulutusjousto	≈	+++	+++	≈
Tuotanto	Maatuulivoima	+++	+++	++	+
	Merituulivoima	+	+	+++	≈
	Aurinkovoima	+++	+++	++	++
	Ydinvoima	+	≈	≈	+++
	CHP	-	--	--	-
	Muu lämpövoima ¹	++	+	≈	≈
	Vesivoima	≈	≈	≈	≈
Energian varastointi ja siirto	Sähkövarastot	+++	++	+	++
	Muut energiavarastot ²	≈	+++	++	≈
	Sähkön rajasiirtoyhteydet	Uudet rajasiirtoyhteydet Ruotsiin ja Viroon	Uudet rajasiirtoyhteydet Ruotsiin ja Viroon	Uudet rajasiirtoyhteydet Ruotsiin ja Viroon	Uudet rajasiirtoyhteydet Ruotsiin ja Viroon
	Vetyverkko	Ei vetyverkkoa	Kansallinen vetyverkko ja yhteydet Pohjois-Ruotsiin sekä Keski-Eurooppaan	Kansallinen vetyverkko ja yhteys Pohjois-Ruotsiin	Ei vetyverkkoa

² Muulla lämpövoimalla tarkoitetaan tässä tapauksessa huippuvoimaa eli nopeaan joustoon kykenevää kapasiteettia, kuten kaasuturbiineita ja moottorivoimaloita.

³ Muilla energiavarastoilla viitataan vety- ja lämpövarastoihin.

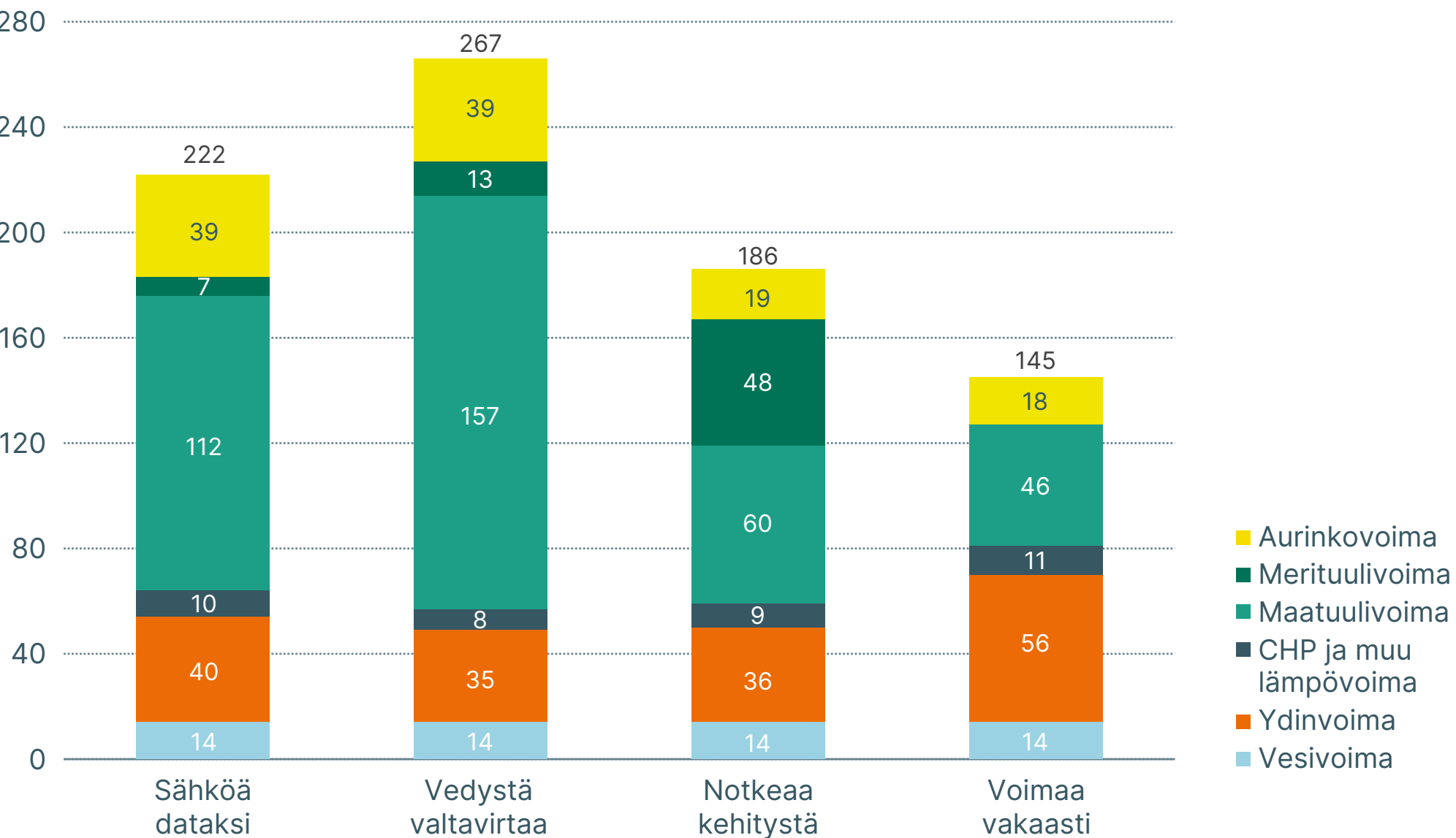
Sähkön kulutus ja tuotanto

Kuva 2 Sähkön kulutus skenaarioissa vuonna 2040



Skenaarioissa sähkön kulutus kasvaa erityisen voimakkaasti Sähköä dataksi ja Vedystä valtavirtaa -skenaarioissa, mutta kasvua on myös Notkeaa kehitystä ja Voimaa vakaasti -skenaarioissa verrattuna nykytasoon. Korkeamman kasvun skenaarioissa edullinen puhdas sähkö houkuttelee Suomeen uusia teollisia investointeja merkittävästi enemmän, jolloin sähkön kulutus kasvaa erityisesti datakeskusten ja vedyntuotannon ja sen jatkojalostamisen myötä. Lisäksi muu teollisuus, lämmitys ja liikenne sähköistyvät kaikissa skenaarioissa, mutta sähköistämisaasteissa on eroja skenaarioiden välillä.

Kuva 3 Sähkön tuotanto skenaarioissa vuonna 2040



Skenaarioiden sähkön tuotanto painottuu lähes poikkeuksetta uusiutuvaan tuuli- ja aurinkovoimaan. Maatuulivoima on Suomen kustannuskilpailukykyisin tuotantomuoto, ja sen määrä kasvaa merkittävästi kaikissa skenaarioissa. Merituulivoiman kasvu on voimakkainta Notkeaa kehitystä -skenaariossa, jossa maatuulivoiman kasvua on rajattu maankäytöllisistä syistä. Aurinkovoiman määrä kasvaa myös merkittävästi kaikissa skenaarioissa. Lisäksi Sähköä dataksi -skenaariossa rakennetaan pienydinvoimaa ja Voimaa vakaasti -skenaariossa perinteistä suuremman kokoluokan ydinvoimaa.

Sähkön vuositase ja tuotantokapasiteetti

Taulukko 2 Sähkön vuositase skenaarioissa vuonna 2040

Sähkötase (TWh)	Sähköä dataksi	Vedystä valtavirtaa	Notkeaa kehitystä	Voimaa vakaasti
Vesivoima	14	14	14	14
Ydinvoima	40	35	36	56
CHP ja muu lämpövoima	10	8	9	11
Maatuulivoima	112	157	60	46
Merituulivoima	7	13	48	-
Aurinkovoima	39	39	19	18
Tuotanto yhteensä	222	267	186	145
Kulutus yhteensä	213	267	173	138
Sähkön nettovienti	9	0	13	7

Kaikissa skenaarioissa Suomessa tuotetaan vuositasolla sähköä vähintään yhtä paljon kuin kulutetaan ja Suomi on selkeästi sähkön nettoviejä useimmissa skenaarioissa. Tämä on seurausta Suomen suuresta potentiaalista uusiutuvan sähkön tuotannossa. Suomen uusiutuvan sähkön tuotantoon investoidaan, koska se on Euroopan tasolla erittäin kilpailukykyistä. Kilpailukykyinen sähkö houkuttelee Suomeen teollisia investointeja nostaen sähkön kulutusta, ja johtaa myös maltilliseen sähkön nettovientiin naapurimaihin. Siirrot vaihtelevat markkinatilanteen mukaan ja sähköä myös tuodaan Suomeen naapurimaista esimerkiksi vähätuulisilla tunneilla. Siten sähkön rajasiirtoyhteydet osaltaan tasapainottavat Suomen energiajärjestelmää.

⁴ Muulla lämpövoimalla tarkoitetaan tässä tapauksessa huippuvoimaa eli nopeaan joustoon kykenevää kapasiteettia, kuten kaasuturbiineita ja moottorivoimaloita.

⁵ Sähköä dataksi -skenaarion lukuihin sisältyy sähkön akkuvarastojen lisäksi pumppuvoimaloita yhteensä noin 1 GW.

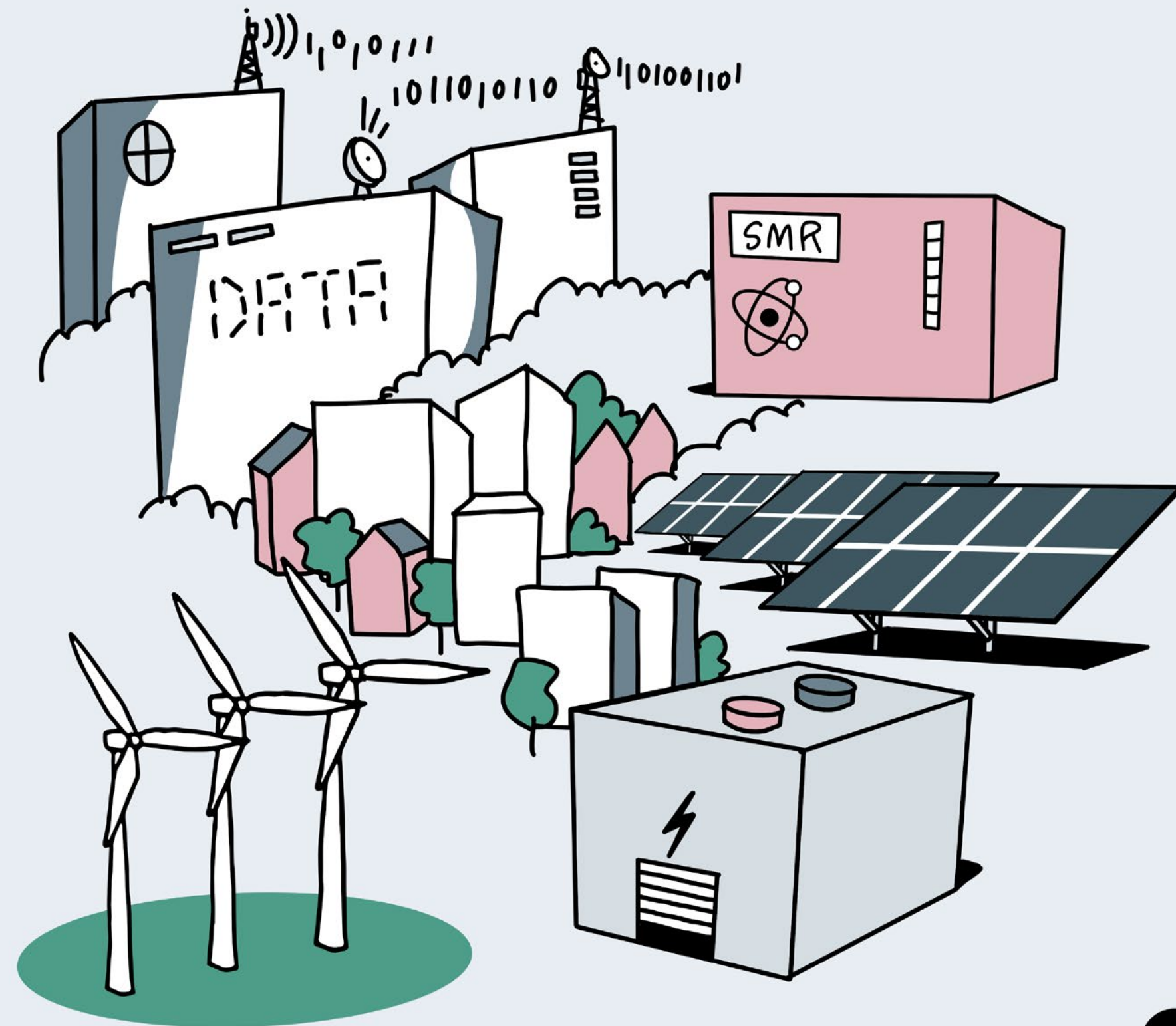
⁶ Suomen ja naapurimaiden (Ruotsi, Norja, Viro) välinen tuonti- ja vientikapasiteetti. Ks. lisätiedot Liite A.5.

Taulukko 3 Sähkön tuotantokapasiteetti skenaarioissa vuonna 2040

Kapasiteetti (GW)	Sähköä dataksi	Vedystä valtavirtaa	Notkeaa kehitystä	Voimaa vakaasti
Vesivoima	3	3	3	3
Ydinvoima	5,4	4,6	4,6	7,2
CHP	3	2	2	3
Muu lämpövoima ⁴	5	1	-	-
Maatuulivoima	42	52	20	15
Merituulivoima	2	3	12	-
Aurinkovoima	43	40	19	18
Sähkövarastot ⁵	31	11	2	7
Rajasiirtokapasiteetti ⁶	6,3	6,3	6,3	6,3

Kaikissa skenaarioissa Suomessa investoidaan puhtaaseen sähköntuotantoon vastaamaan kasvavaan kulutukseen. Valtaosa investoinneista kohdistuu maatuulivoimaan ja aurinkovoimaan, joita rakennetaan useita kymmeniä gigawatteja. Merituulivoimaan investoidaan eniten Notkeaa kehitystä -skenaariossa. Voimaa vakaasti -skenaariossa toteutetaan myös investointeja uuteen ydinvoimaan. Lisäksi isossa roolissa ovat investoinnit sähkövarastoihin, etenkin Sähköä dataksi -skenaariossa, jossa kulutusjousto on maltillisemmin.

SÄHKÖÄ DATAKSI



2.2 Sähköä dataksi

Sähköä dataksi -skenaariossa Suomen sähkön kulutus kasvaa voimakkaasti erityisesti datakeskusten ajamana. Uusi teollisuus sijoittuu Suomeen kilpailukykyisen uusiutuvan energian houkuttelemana. Kulutuksen jouston ollessa maltillista sääriippuvainen tuuli- ja aurinkovoima tarvitsee rinnalleen joustoa energiavarastoista ja tuotannosta tasapainottamaan järjestelmää. Skenaariossa tarvittava jousto saadaan erityisesti akuista, mutta myös pumppuvoimasta sekä nopeaan joustoon kykenevästä lämpövoimasta.

Sähkön kulutus

Skenaariossa teollinen sähkönkulutus kasvaa reilusti erityisesti datakeskusten siivittämänä, mutta myös vetyteollisuutta rakennetaan ja muu perinteinen teollisuus sähköistyy. Skenaariolle keskeisenä oletuksena kulutusjousto on maltillisesti, mikä haastaa sähköjärjestelmän kehitystä. Skenaariossa datakeskukset eivät jousta lainkaan ja myös vedyntuotanto joustaa hyvin vähän, sillä kattavaa vedynsiirtoinfrastruktuuria tai suuria vetyvarastoja ei rakenneta. Muu teollisuus joustaa siltä osin kuin jousto havaitaan nykyään, mutta uuden teollisuuden ei oleteta joustavan eli jouston määrä ei kasva muussa teollisuudessa lainkaan.

Kaukolämmössä sähköistyminen tapahtuu niin sähkökattiloiden kuin lämpöpumppujen myötä. Lämpöpumput pystyvät hyödyntämään teollisuuden, erityisesti datakeskusten, hukkalämpöä. Lämpöpumput joustavat vain pienellä osalla kokonaistehostaan, kun taas sähkökattilat on oletettu kokonaan joustavaksi. Liikenne sähköistyy, mutta vain pieni osa sähköautojen latauksesta joustaa hinnan mukaan.

Taulukko 4 Sähkön kulutus Sähköä dataksi -skenaariossa

Kulutus (TWh)	2024	Muutos	2040
Teollisuus ⁷	34	+109	143
- datakeskukset			71
- vetyteollisuus			15
- muu teollisuus			57
Lämmitys	18	+10	28
- kotitaloudet	16	≈	16
- kaukolämpö	2	+10	12
Liikenne	1	+9	10
Muu kulutus ja häviöt	30	+2	32
Yhteensä	83	+130	213

Sähkön tuotanto

Skenaariossa maatuulivoima on selkeästi suurin tuotantomuoto aurinkovoiman noustessa toiseksi suurimmaksi. Tuuli- ja aurinkovoimalla tuotetaan yhteensä lähes kolme neljäsosaa sähköstä Suomessa. Nykyisten ydinvoimalaitosten lisäksi skenaariossa on oletettu rakennettavan pienydinvoimaa sähkön ja lämmön yhteistuotantoon Etelä-Suomessa, mikä nostaa ydinvoimalla tuotetun sähkön määrää.

Taulukko 5 Sähkön tuotanto Sähköä dataksi -skenaariossa

Tuotanto (TWh)	2024	Muutos	2040
Vesivoima	14	≈	14
Ydinvoima	31	+9	40
CHP ja muu lämpövoima	13	-3	10
Maatuulivoima	20	+92	112
Merituulivoima	-	+7	7
Aurinkovoima	1	+38	39
Yhteensä	79	+143	222

⁷ Vuoden 2024 lukemissa datakeskukset sisältyvät teollisuuden sijaan palveluihin eli muuhun kulutukseen, minkä vuoksi alasegmenttien jaottelua ei ole tehty tässä ja seuraavissa taulukoissa.

Tuotantokapasiteetissa mitattuna voimakkaimmin kasvava tuotantomuoto on aurinkovoima, jota on lopulta maatuuli-voimaakin enemmän. Lisäksi skenaariossa rakennetaan noin 750 MW edestä pienydinvoimaa, mitä hyödynnetään sähkön ja lämmön tuotannossa. Tämän lisäksi sähkövarastojen sekä uuden joustavan lämpövoiman kasvu on merkittävää nykyiseen järjestelmään verrattuna.

Maatuulivoimaan ja aurinkovoimaan investoidaan eniten niiden kustannuskilpailukyvyn ansiosta. Skenaariossa on oletettu muista skenaarioista poiketen suuren mittakaavan tuulivoiman rakentamista Lappiin. Lisäksi skenaariossa toteutetaan yksittäisiä merituulivoimahankkeita. Maantieteellisesti hajautetumpi sijainti tuotannolle tasaa uusiutuvien tuotantoprofiilia, mikä auttaa vastaamaan pääosin joustamattomaan kulutukseen.

Skenaariossa kulutuksen vähäinen jousto lisää tarvetta sähköjärjestelmän muulle joustolle. Tärkeimpänä jouston lähteenä toimivat sähkövarastot, joiden kokonaiskapasiteetti on 30 GW ja painopiste on nykyistä suuremmissa 8 tunnin sähkövarastoissa. Voimakkaasti kasvavien uusiutuvien tuotantomuotojen lisäksi skenaariossa rakennetaan noin 1 GW pumppuvoimaa, jonka varaston kooksi on arvioitu 24 tuntia. Näiden lisäksi skenaariossa rakennetaan 5 GW nopeaan joustoon kykeneviä puhtaita polttoaineita käyttäviä lämpövoimaloita, kuten kaasuturbiineja ja moottorivoimaloita.

Taulukko 6 Sähkön tuotantokapasiteetti Sähköä dataksi -skenaariossa

Kapasiteetti (GW)	2024	Muutos	2040
Vesivoima	3	≈	3
Ydinvoima	4,4	+1	5,4
CHP	5	-2	3
Muu lämpövoima	-	+5	5
Maatuulivoima	8	+34	42
Merituulivoima	-	+2	2
Aurinkovoima	1	+42	43
Sähkövarastot ⁸	<1	+31	31
Yhteensä	22	+111	133

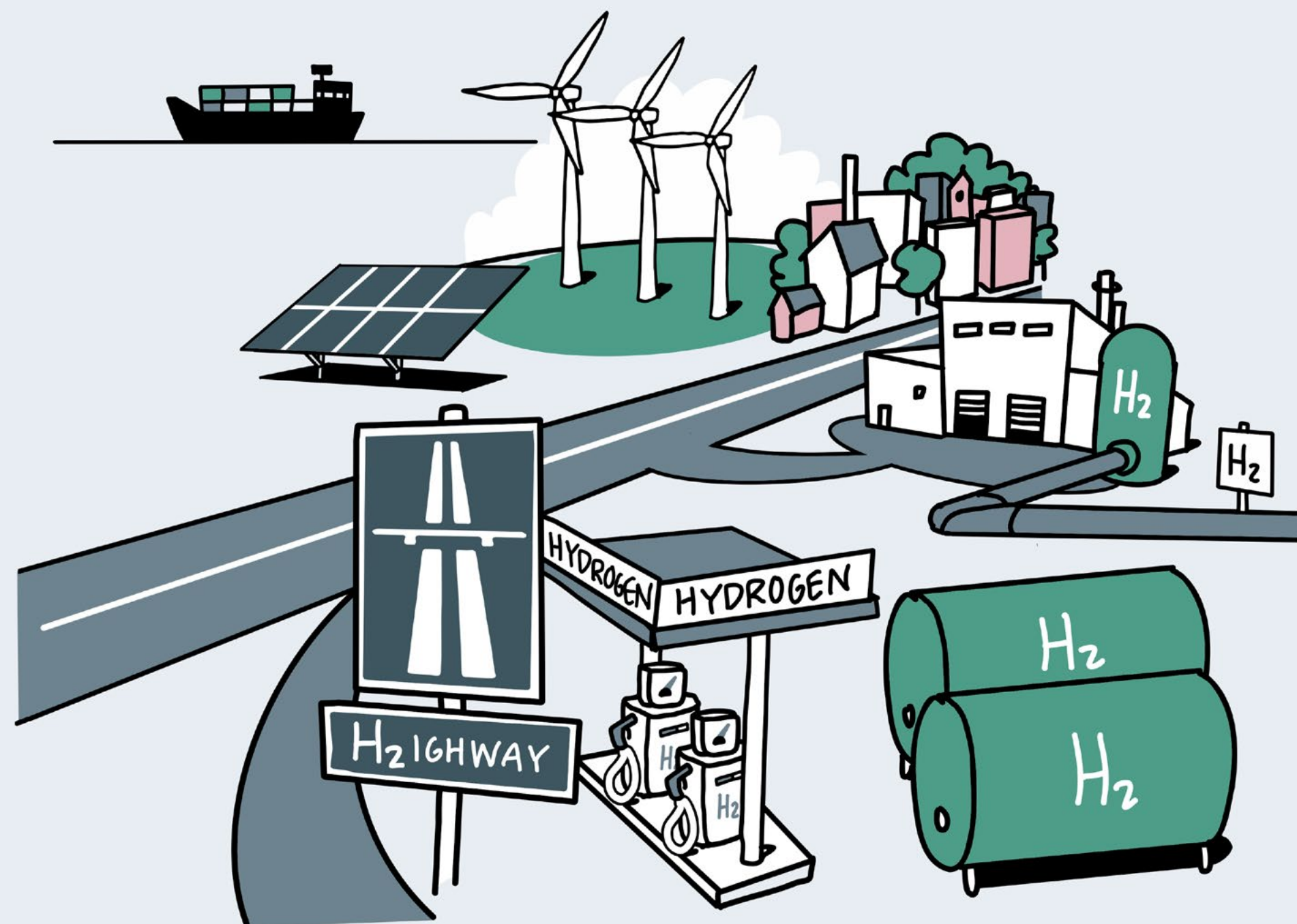
Uuden joustavan lämpövoiman tuotantomäärät ovat vähäisiä, mutta sen rooli on keskeinen järjestelmän sähkön riittävyyden kannalta. Matalista ja merkittävistä säävuosittain vaihtelevista tuotantomääristä johtuen uusien nopeasti säätyvien lämpövoimaloiden ei ole oletettu syntyvän markkinaehtoisesti, vaan niiden on oletettu saavan tukea ja näin varmistetaan sähkön riittävyys kaikkina säävuosina.

Miten skenaario haastaa verkon kehittämisen?

Skenaariossa tuotannon ja kulutuksen nopea kasvu ja erityisesti tuotantopuolen investointien hajautuminen Lappiin vaativat verkon laajaa kehittämistä. Lisäksi suuri sähkön tuotannon ja varastojen kokonaiskapasiteetti haastavat verkon kehittämistä ja liittämiskykyä. Varastojen kokonaiskapasiteetin kehitystä ajaa etenkin maltillinen kulutusjouston määrä ja skenaarion kannalta ratkaisevaa on näiden sijoittuminen sähköverkkoon. Skenaariossa ei ole myöskään vetyverkkoa, joten energian siirrolle ei ole vaihtoehtoista tapaa sähköverkon rinnalla.

⁸ Sähköä dataksi -skenaarion lukuihin sisältyy sähkön akkuvarastojen lisäksi pumppuvoimaloita yhteensä noin 1 GW.

VEDYSTÄ VALTAVIRTAA



2.3 Vedystä valtavirtaa

Vedystä valtavirtaa -skenaariossa sähkön kulutus kasvaa erittäin voimakkaasti, ja kasvun painopiste on joustavassa kulutuksessa. Suomi on Euroopan kilpailukykyisin paikka sähköintensiiviselle teollisuudelle etenkin runsaan ja edullisen maatuulivoimatuotannon ansiosta. Erinomaisen kilpailukykyensä avulla ansiosta Suomi saavuttaa tavoitteensa tuottaa 10 % EU:n vedystä ja sen jatkojalosteista. Vedyn tuotanto kehittyy 2030-luvulla huomattavan joustavaan suuntaan, kun vetyverkot ja suuret vetyvarastot mahdollistavat vedyn tuotannon jouston, vaikka samaan aikaan vedyn jatkojalostusprosesseja voidaan ajaa vakaamin. Lisäksi kulutuksen joustot lisääntyvät etenkin sähkökattiloiden ja sähköautojen älykkään ja kaksisuuntaisen latauksen myötä.

Sähkön kulutus

Sähkön kulutus kasvaa etenkin uuden teollisuuden ajamana ja edullisen sähkön hintatason mahdollistamana. Sähköä käytetään erityisesti vedyn ja sen jatkojalosteiden tuotantoon. Vedystä valmistetaan Suomessa jatkojalosteita⁹ ja vetyä käytetään myös raaka-aineena kemianteollisuudessa sekä metalliteollisuudessa. Noin puolet Suomessa tuotetusta vedystä hyödynnetään jatkojalostuksessa ja noin puolet viedään vetynä. Skenaariossa on kotimaisen vetyverkon lisäksi rakennettu vedyn putkiyhteydet Pohjois-Ruotsiin ja Keski-Eurooppaan. Suomi on myös merkittävässä roolissa EU:n datakeskusmarkkinassa, minkä lisäksi metalli- ja kemianteollisuuden sähkönkulutus Suomessa kasvaa esimerkiksi teollisuusprosessien ja teollisuuden lämmöntuotannon sähköistyksen myötä.

Teollisuuden lisäksi lämmitys sähköistyy voimakkaasti. Kasvu tulee kaukolämmön lämpöpumpuista, jotka hyödyntävät vedyntuotannon ja datakeskusten hukkalämpöjä, sekä sähkökattiloista, joilla hyödynnetään edullisen sähkön hetkiä. Sähköllä tuotetaan valtaosa Suomen kaukolämmöstä, mikä myös edellyttää merkittävää määrää lämpövarastoja ja lisää siten energiajärjestelmän joustoa. Liikenteessä pääosa kasvusta tulee sähköautoista, joiden latausta ohjataan sähkön hinnan mukaan. Tämän lisäksi kaksisuuntaisen latauksen käyttö on laajamittaista. Tätä kautta sähköautoista saadaan merkittävää säästökykyä tasapainottamaan sähkön tuotantoa ja kulutusta.

⁹ Vedyn jatkojalosteilla tarkoitetaan tässä yhteydessä sähköstä, vedystä ja mahdollisesti muista raaka-aineista kuten typestä tai biopohjaisesta hiilidioksidista tuotettuja tuotteita, kuten sähköpolttoaineita, materiaaleja ja kemikaaleja.

Taulukko 7 Sähkön kulutus Vedystä valtavirtaa -skenaariossa

Sähkön kulutus (TWh)	2024	Muutos	2040
Teollisuus	34	+158	192
- datakeskukset			27
- vetyteollisuus			106
- muu teollisuus			59
Lämmitys	18	+16	34
- kotitaloudet	16	≈	16
- kaukolämpö	2	+16	18
Liikenne	1	+9	10
Muu kulutus ja häviöt	30	+1	31
Yhteensä	83	+184	267

Sähkön tuotanto

Skenaariossa sähkön tuotanto kasvaa voimakkaasti mahdollistaen kulutuksen kasvun ja samalla sähkön hinnan säilymisen kilpailukykyisellä tasolla. Maatuulivoiman ja aurinkovoiman tuotanto kasvaa nykyisestä moninkertaiseksi, minkä lisäksi merituulivoima kasvaa hieman. Maatuulivoimaa rakennetaan merkittävästi myös Itä-Suomeen. Ydinvoimatuotannon määrä kasvaa nykyisten laitosten suunniteltujen tehonkorotusten myötä. Sähkön ja lämmön yhteistuotannon määrä supistuu nykyisestä ja vesivoima pysyy nykyisellä tasolla.

Taulukko 8 Sähkön tuotanto Vedystä valtavirtaa -skenaariossa

Tuotanto (TWh)	2024	Muutos	2040
Vesivoima	14	≈	14
Ydinvoima	31	+4	35
CHP ja muu lämpövoima	13	-5	8
Maatuulivoima	20	+137	157
Merituulivoima	0	+13	13
Aurinkovoima	1	+38	39
Yhteensä	79	+188	267

Tuotantokapasiteetissa mitattuna sähkövarastojen määrä kasvaa moninkertaiseksi nykyisestä. Pääosa joustosta saadaan kuitenkin skenaariossa vedyn tuotannosta, minkä mahdollistavat kansainvälinen vetyverkko sekä siihen liitetyt vetyvarastot. Yhteensä vedyn varastointikapasiteettia on Suomessa noin 5 GW sähkötehoa vastaava määrä, sisältäen vetyverkon puskurivarastokapasiteetin, ja lisäksi kansainvälisen vetyverkon avulla voidaan hyödyntää muissa maissa sijaitsevaa varastokapasiteettia. Runsas vetyvarastokapasiteetti sekä sähköautoista saatava kaksisuuntainen lataus hidastavat akkuvarastojen tarpeen kasvua.

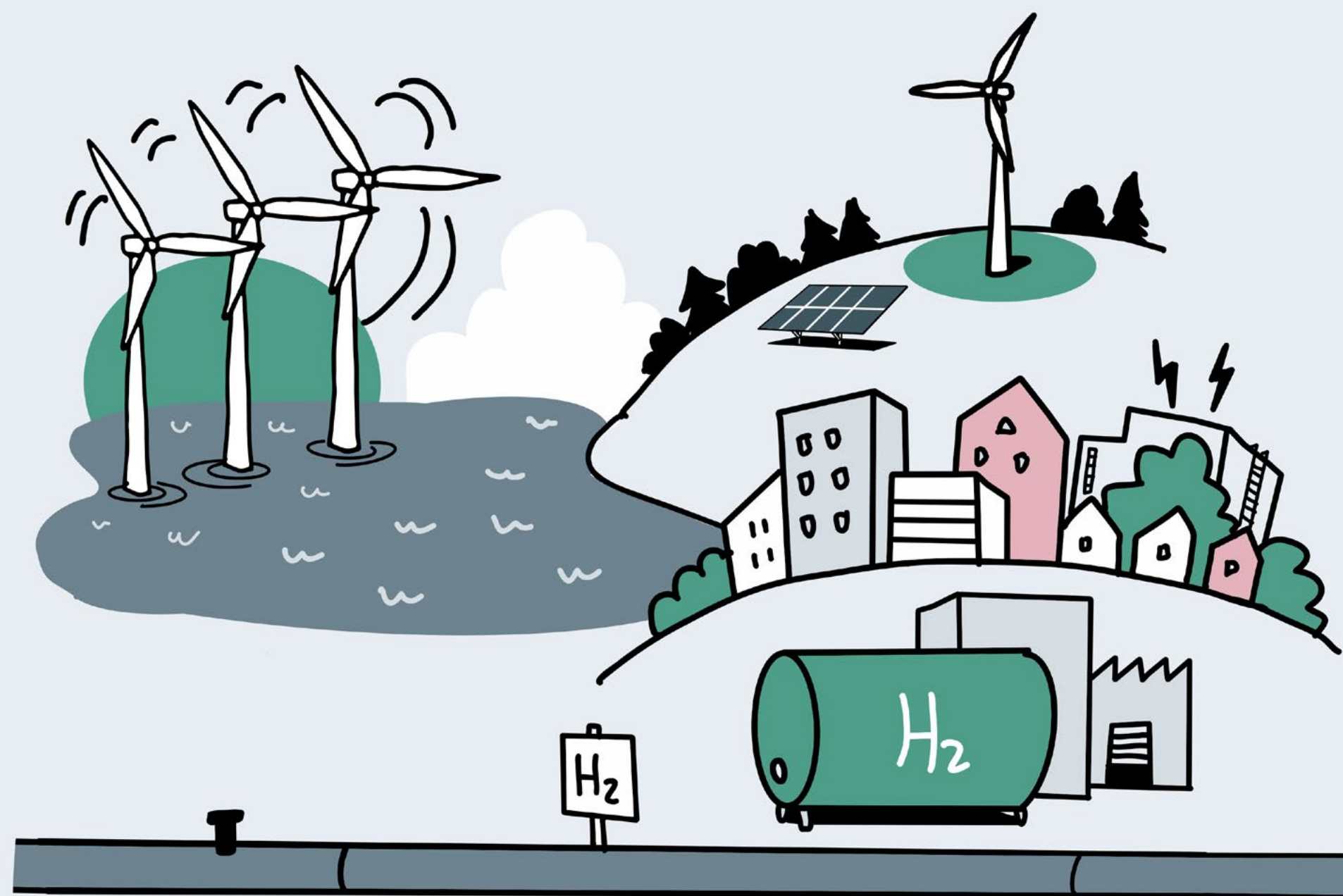
Taulukko 9 Sähkön tuotantokapasiteetti Vedystä valtavirtaa -skenaariossa

Kapasiteetti (GW)	2024	Muutos	2040
Vesivoima	3	≈	3
Ydinvoima	4,4	+0,2	4,6
CHP	5	-3	2
Muu lämpövoima	-	+1	1
Maatuulivoima	8	+44	52
Merituulivoima	-	+3	3
Aurinkovoima	1	+39	40
Sähkövarastot	<1	+11	11
Yhteensä	22	+96	118

Miten skenaario haastaa verkon kehittämisen?

Vedystä valtavirtaa -skenaario edustaa erittäin voimakkaan kasvun skenaariota ja siten haaste verkon kehittämiselle on merkittävä. Skenaariossa tarvitaan uusien voimajohtojen lisäksi merkittävässä määrin myös muita keinoja, kuten tuotannon ja kulutuksen yhteissijoittumista ja joustoja, jotta skenaarion kuvaama kasvu voidaan saavuttaa. Kasvu kuvaa skenaariota, jossa EU:n vetyjalosteiden markkina kehittyy ilmastoneutraaliustavoitteen edellyttämällä tavalla ja Suomi saavuttaa tästä markkinasta 10 prosentin osuuden. Skenaarion avulla pyritään etsimään ratkaisuja, joilla tällainen energiajärjestelmän kehitys voitaisiin kantaverkon näkökulmasta mahdollistaa.

NOTKEAA KEHITYSTÄ



REDAN-
NORD

2.4 Notkeaa kehitystä

Notkeaa kehitystä -skenaariossa kantavana ajatuksena on hinnan vaihteluiden mukaan joustavan kulutuksen kasvaminen. Joustavaa kulutusta edustavat erityisesti sähkökattilat, joilla korvataan perinteistä, polttamiseen perustuvaa kaukolämpöä, sekä vedyn valmistus sähköstä elektrolyysillä. Skenaariossa rakennetaan kansallinen vetyinfrastruktuuri, mikä edesauttaa vetyinvestointien sijoittumista Suomeen sekä niiden tuotannon joustavuutta. Kokonaiskulutuksen kasvu jää kuitenkin maltillisemmaksi korkeimpiin kasvuskenarioihin verrattuna, sillä kustannuskilpailukykyisintä maatuulivoimaa ja aurinkovoimaa ei saada täysimääräisesti hyödynnettyä.

Sähkön kulutus

Skenaariossa sähkön kokonaiskulutus kasvaa noin kaksinkertaiseksi nykytasosta. Suurin kasvu syntyy teollisuudessa vetytalouden ja muun teollisuuden sähköistymisen ajamana. Uutta vetyteollisuutta sijoittuu Suomeen edullisen sähkön houkuttelemana ja vetyä käytetään sähköpolttoaineiden, synteettisen ammoniakin sekä teräksen valmistuksessa.

Vedyntuotanto on joustavaa ja pystyy siten hyödyntämään edullista ja puhdasta sähköä. Skenaariossa Suomeen rakennetaan kansallinen vetyverkko, joka seurailee etelä- ja länsirannikkoa, jatkuen edelleen Pohjois-Ruotsiin. Vedyn siirtoinfrastruktuuri mahdollistaa vedyn tuotannon ja kulutuksen yhdistämisen tehokkaasti myös Suomen sisällä ja ohjaa vedyn tuotannon sijoittumista siirtoputkiston läheisyyteen. Lisäksi skenaariossa suurten vetyvarastojen rakentaminen näyttäytyy kannattavana, mahdollistaen vedyn varastoinnin ja siten parantaen järjestelmän joustavuutta.

Lämmityksen sähkönkulutus kaksinkertaistuu nykytasosta kaukolämmön sähköistyessä voimakkaasti. Skenaariossa lämmön varastointi on tärkeässä roolissa mahdollistamassa kaukolämmön lämpöpumppujen ja sähkövarastojen jouston sähkön hinnan ohjaamana. Lisäksi liikenteen sähkönkulutus moninkertaistuu nykytasosta sähköautojen myötä. Sähköautoja ladataan älykkäästi niin ikään hinnan ohjaamana ja myös kaksisuuntainen lataus on skenaariossa laajamittaisesti käytössä.

Taulukko 10 Sähkön kulutus Notkeaa kehitystä -skenaariossa

Kulutus (TWh)	2024	Muutos	2040
Teollisuus	34	+68	102
- datakeskukset			8
- vetyteollisuus			46
- muu teollisuus			48
Lämmitys	18	+14	32
- kotitaloudet	16	≈	16
- kaukolämpö	2	+14	16
Liikenne	1	+9	10
Muu kulutus ja häviöt	30	-1	29
Yhteensä	83	+90	173

Sähkön tuotanto

Sähkön tuotanto perustuu skenaariossa vahvasti uusiutuviin tuotantomuotoihin, erityisesti maa- ja merituulivoimaan, jotka kattavat yli puolet kaikesta Suomessa tuotetusta sähköstä. Merkittävää kasvua nähdään myös aurinkovoiman tuotannossa. Ydinvoiman tuotannon kasvu syntyy nykyisen kapasiteetin tehon nostoista, kun taas CHP-tuotanto laskee, erityisesti kaukolämmön siirtyessä sähkökattiloiden käyttöön. Vesivoiman tuotanto pysyy nykytasolla.

Taulukko 11 Sähkön tuotanto Notkeaa kehitystä -skenaariossa

Tuotanto (TWh)	2024	Muutos	2040
Vesivoima	14	≈	14
Ydinvoima	31	+5	36
CHP ja muu lämpövoima	13	-4	9
Maatuulivoima	20	+40	60
Merituulivoima	-	+48	48
Aurinkovoima	1	+18	19
Yhteensä	79	+107	186

Skenaariossa oletetaan maatuulivoiman ja aurinkovoiman hyväksyttävyyden laskevan, mikä rajaa niiden kasvua. Siten kasvu kohdistuu 2030-luvulla merituulivoimaan, jonka määrä kasvaa noin 13 GW tasolle. Olemassa olevien ydinvoimaloiden suunnitellut tehonkorotukset on huomioitu skenaariossa, mutta uutta ydinvoimaa ei rakenneta. CHP-tuotannon ja muun lämpövoiman tuotanto sen sijaan laskee, sillä useita CHP-laitoksia suljetaan, varsinkin kaukolämmön tuotannossa lämmityksen sähköistyessä. Yhä toiminnassa olevat CHP-laitokset ovat pääasiassa teollisuuden laitoksia.

Taulukko 12 Sähkön tuotantokapasiteetti Notkeaa kehitystä -skenaariossa

Kapasiteetti (GW)	2024	Muutos	2040
Vesivoima	3	≈	3
Ydinvoima	4,4	+0,2	4,6
CHP	5	-3	2
Muu lämpövoima	-	-	-
Maatuulivoima	8	+12	20
Merituulivoima	-	+12	12
Aurinkovoima	1	+18	19
Sähkövarastot	<1	+2	2
Yhteensä	22	41	63

Miten skenaario haastaa verkon kehittämisen?

Skenaario haastaa etsimään uusia ratkaisuja merituulivoiman liittämiseksi kantaverkkoon, sillä skenaariossa rakennetaan merituulivoimaa enemmän kuin Fingridin aiemmin laatimassa merituulivoimaselvityksessä¹⁰ tunnistetut alustavat liityntä-mahdollisuudet antavat myöten. Liityntämahdollisuuksia skenaariossa edesauttaa hybridiliityntöjen toteutuminen, jossa tuotantoa ja kulutusta liitetään samaan liittymispisteeseen. Lisäksi tarkasteluun on otettu Suomen ja Ruotsin välisen Fenno-Skan 3 -rajasiirtoyhteyden toteuttaminen hybridiyhteytenä, jonka varrelle liitettäisiin uutta merituulivoimaa. Lisäksi merituulivoima sijoittuu suurilta osin länsirannikolle maatuulivoiman tapaan, mikä yleisesti haastaa Länsi-Suomen verkon kehitystä. Skenaariossa rakennettu kansallinen vedyn siirtoverkosto kuitenkin ohjaa vedyn tuotantoa sijoittumaan lähelle länsirannikkoa ja siten tasoittaa siirtopaineita maan länsiosista muualle Suomeen.

¹⁰ Merituulivoiman alustavat liityntämahdollisuudet kantaverkkoon 2030-luvulla. Fingrid, 2024.
Lisätietoa: <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/kehittaminen/merituulivoimaselvitys/>

VOIMAA VAKAASTI



2.5 Voimaa vakaasti

Voimaa vakaasti -skenaariossa maatuulivoiman rakentamista rajoitetaan ja sähköntuotantoon halutaan vakautta, minkä vuoksi tuetaan uuden ydinvoiman rakentamista. Kaksi uutta ydinvoimalaa tuovat lisää säästä riippumatonta sähköntuotantoa ja kulutus on pääosin joustamatonta. Kokonaisuudessaan Suomen kilpailukyky jää muihin skenaarioihin verrattuna heikommaksi. Nykyinen teollisuus sähköistyy, mutta uusia investointeja ei tehdä Suomeen laajassa mittakaavassa.

Sähkön kulutus

Skenaariossa sähkön kulutus kasvaa, mutta huomattavasti maltillisemmin muihin skenaarioihin verrattuna. Kulutuksen kasvua tulee erityisesti nykyisen teollisuuden prosessien ja teollisen lämmöntuotannon sähköistämisestä. Lisäksi skenaariossa Suomeen investoidaan datakeskuksiin ja vedyntuotantoon. Suomella ei kuitenkaan ole erityisempää kilpailuetua muuhun Eurooppaan verrattuna, minkä vuoksi investointien määrä jää skenaariossa alhaisemmaksi.

Lämmitys ja liikenne sähköistyvät nykytasosta, mutta kasvutahti on hitaampaa verrattuna muihin skenaarioihin. Kaukolämmössä lämpöpumput ja sähkökattilat yleistyvät, mutta yhteistuotannolla on yhä suuri rooli. Myös liikenteen sähköistyminen hidastuu eivätkä älykäs lataus hinnan mukaan tai kaksisuuntainen lataus ole laajamittaisesti käytössä.

Taulukko 13 Sähkön kulutus Voimaa vakaasti -skenaariossa

Kulutus (TWh)	2024	Muutos	2040
Teollisuus	34	+40	74
- datakeskukset			21
- vetyteollisuus			9
- muu teollisuus			44
Lämmitys	18	+8	26
- kotitaloudet	16	≈	16
- kaukolämpö	2	+8	10
Liikenne	1	+9	10
Muu kulutus ja häviöt	30	-2	28
Yhteensä	83	+53	138

Sähkön tuotanto

Ydinvoimalla tuotetaan skenaariossa eniten sähköä ja seuraavaa sijaa pitää maatuulivoima. Yhdessä ne kattavat noin kaksi kolmasosaa Suomen vuotuisesta sähköntuotannosta. Aurinkovoiman tuotanto nousee jo selvästi yli vesivoiman ja CHP jää pienimmäksi tuotantomuodoksi, vaikka sillä on yhä merkittävä rooli lämmöntuotannossa.

Taulukko 14 Sähkön tuotanto Voimaa vakaasti -skenaariossa

Tuotanto (TWh)	2024	Muutos	2040
Vesivoima	14	≈	14
Ydinvoima	31	+25	56
CHP ja muu lämpövoima	13	-2	11
Maatuulivoima	20	+26	46
Merituulivoima	-	-	-
Aurinkovoima	1	+17	18
Yhteensä	79	+66	145

Skenaariossa rakennetaan kaksi suuren kokoluokan (1,3 GW) ydinvoimalaa, millä vastataan kasvavaan kulutukseen. Kulutuksen kasvusta huolimatta ydinvoima ei näyttäydy markkinaehtoisesti kannattavalta ja vaatii tukijärjestelmän. Maatuulivoiman kasvu pysähtyy 2030-luvun taitteessa. Aurinkovoiman kasvu jatkuu ja kapasiteetti ylittää asennetun tuulivoimakapasiteetin. Merituulivoimaa ei skenaariossa rakenneta lainkaan. CHP-laitosten määrä laskee vähitellen fossiilisia polttoaineita käyttävien laitosten sulkeutuessa, mutta biomassaa ja jätteitä käyttävällä yhteistuotannolla on yhä tärkeä rooli. Sähkövarastoja rakennetaan tuomaan lisää joustoa järjestelmään, mahdollistaen tarvittavan jouston järjestelmään.

Taulukko 15 Sähkön tuotantokapasiteetti Voimaa vakaasti -skenaariossa

Kapasiteetti (GW)	2024	Muutos	2040
Vesivoima	3	≈	3
Ydinvoima	4,4	+2,8	7,2
CHP	5	-2	3
Muu lämpövoima	-	-	-
Maatuulivoima	8	+7	15
Merituulivoima	-	-	-
Aurinkovoima	1	+17	18
Sähkövarastot	<1	+7	7
Yhteensä	22	+31	53

Miten skenaario haastaa verkon kehittämisen?

Skenaariossa verkon kehittämiselle ja energiajärjestelmälle merkittävää on etenkin uusien ydinvoimaloiden sijainti ja koko. Skenaariossa nämä oletetaan rakennettavan Etelä-Suomeen Loviisan alueelle. Suuren kokoluokan ydinvoimalaitosten liittäminen luo suuren verkkoa mitoittavan vian vaatien uusia verkkoinvestointeja ja tuo siten verkon kehitykseen uusia näkökulmia.

3

Skenaarioiden siirtotarpeet

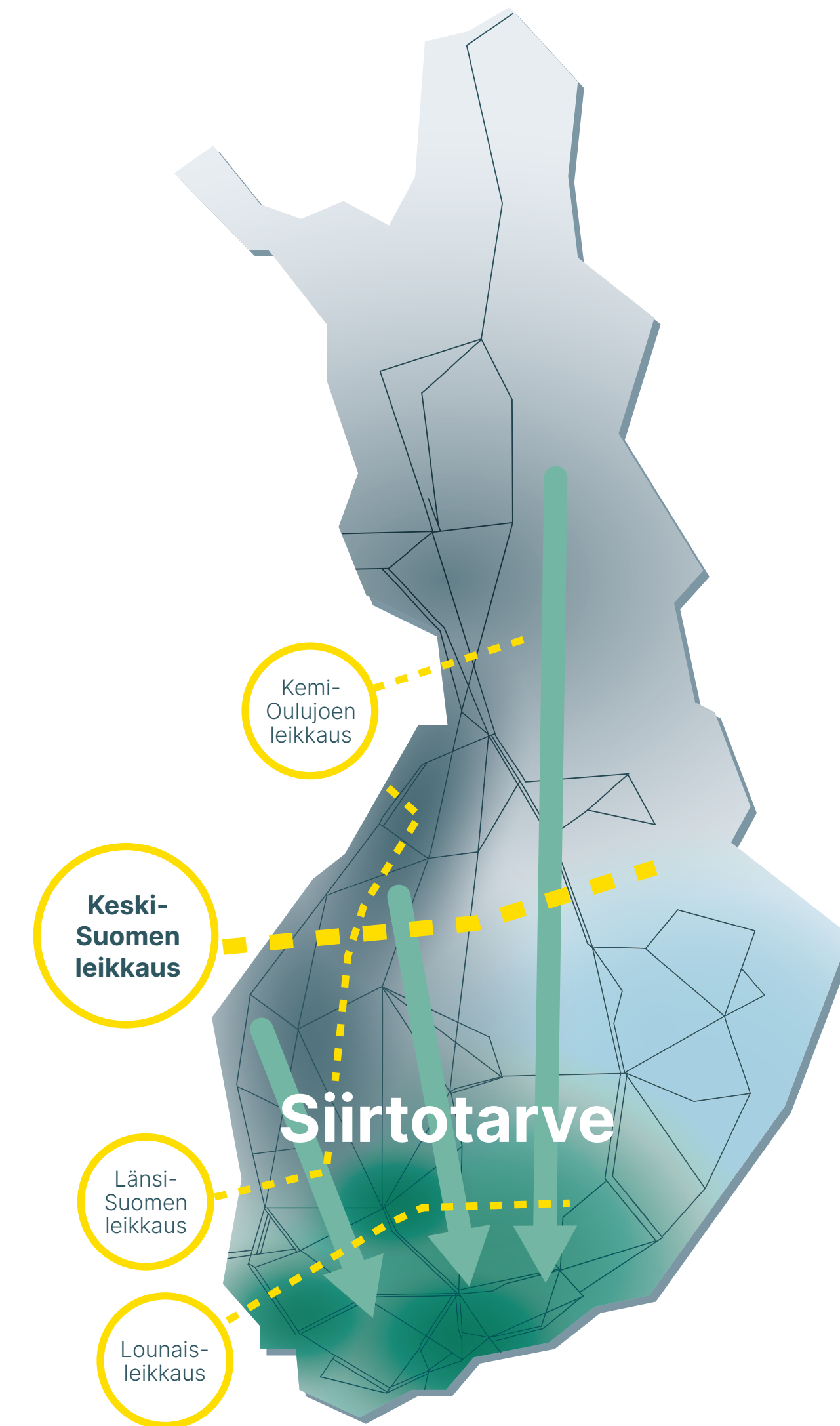
Tässä luvussa esitetään skenaarioiden sähkön siirtotarpeet, joita käytetään luvun 4 kantaverkon vahvistustarpeiden tunnistamiseen. Luvussa 3.1 esitetään yhteenveto siirtotarpeista, jotka perustuvat luvun 3.2 oletuksiin investointien maantieteellisistä sijainneista. Luvussa 3.3 skenaarioiden siirtotarpeet esitetään tarkemmin.



Yksinkertaistuksen vuoksi siirtotarpeet esitetään Keski-Suomen poikkileikkauksen yli. Tämä poikkileikkaus kuvaa hyvin verkon kehittämisessä haasteeksi muodostuvia korkeita siirtoja tuotantopainotteiselta Lapin ja Pohjanmaan alueelta kulutuspainotteiselle Etelä-Suomen alueelle. Kuva 4 havainnollistaa kuinka kasvava siirtotarve niin kutsuttujen poikkileikkausten yli haastaa kantaverkon kehittämistä.

Järjestelmätason poikkileikkauksella tai lyhyemmin leikkauksella tarkoitetaan sähköteknisesti määritettyä useamman siirtojohdon muodostamaa siirtoreittiä, joka on tunnistettu pullonkaulaksi sähköjärjestelmässä. Tällaisen poikkileikkauksen läpi kulkee pääsiirtolinjojen voimajohtoja, jotka määrittävät poikkileikkauksen siirtokyvyn. Mikäli siirtotarve ylittää hetkellisesti poikkileikkauksen siirtokyvyn, joudutaan siirtoja rajoittamaan käyttövarmuuden ylläpitämiseksi. Tunnistettujen leikkauksien siirtokyvyn kasvattaminen johtoinvestointien avulla on yksi tärkeimmistä keinoista kehittää järjestelmätason siirtokykä ja liitettävyyttä. Tulevaisuudessa siirtotarpeiden muuttuessa on mahdollista, että myös leikkausten määrä voi muuttua.

Kuva 4 Tunnistetut sähköverkon poikkileikkaukset ja siirtotarpeet



3.1 Yhteenveto

Tuotanto- ja kulutusinvestointien sijainnilla on keskeinen vaikutus sähkönsiirtotarpeisiin ja sitä kautta tarvittaviin verkkoinvestointeihin. Fingridin verkon suunnitteluskenaario ja liityntäkyselyt toimivat pohjana tuotanto- ja kulutusinvestointien sijaintioletuksille visiotyössä. Vision skenaarioissa on tehty myös vaihtoehtoisia oletuksia, jotka tukevat skenaarioiden toteutumista. Korkean kasvun skenaarioissa korostetaan kulutuksen sijoittamista lähelle tuotantoa ja hybridiliityntöjä, mitkä mahdollistavat erittäin korkean kasvun myös kanta-verkon kehityksen näkökulmasta. Investointien sijainnin vaikutusta ja ohjauskeinoja on käsitelty tarkemmin luvussa 5.

Skenaarioissa Keski-Suomen poikkileikkauksen yli tapahtuvan sähkönsiirron tarve kasvaa merkittävästi. Korkean kasvun skenaarioissa tarve voi nousta 17–18 gigawattiin, mikä on noin viisinkertainen nykytilanteeseen verrattuna. Maltillisemmissa skenaarioissa tarve on 10–11 gigawattia. Suurimmat siirtotarpeet syntyvät tilanteissa, joissa pohjoisessa on paljon tuotantoa ja etelässä samanaikaisesti paljon kulutusta. Näitä tilanteita esiintyy harvoin, mutta ne aiheuttavat suuren osan verkon vahvistustarpeista.

Mikäli korkeimmat huippusiirrot hoidettaisiin muilla keinoin, voitaisiin kantaverkkoa hyödyntää tehokkaammin ja nostaa liitettävyyttä pienemmällä verkkoinvestointien kokonaismäärällä. Korkean kasvun skenaarioissa siirtokapasiteetin rajaaminen perustuen nykyiseen investointitahtiin rajaisi siir-

toa skenaarioissa vain 1–3 % vuoden tunneista, mutta laskisi merkittävästi huippusiirtoa ja siten tarvittavia investointeja. Mahdollisia ratkaisuja erittäin korkeisiin sähkönsiirron huipputilanteisiin on useita, ja ne voivat täydentää tai osittain korvata laajoja verkkoinvestointeja. Näitä on käsitelty tarkemmin luvussa 5.



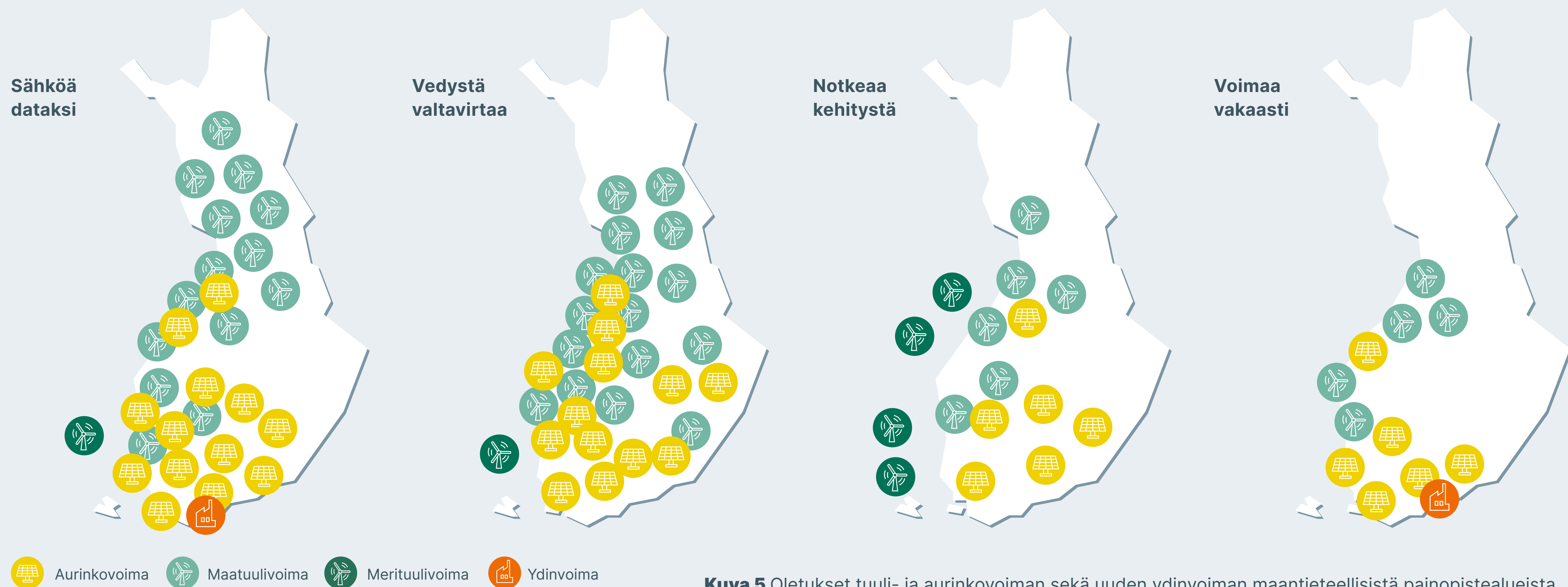
3.2 Investointien maantieteellinen sijainti

Investointien sijaintia ohjaavat osaltaan Fingridin saamat liityntäkyselyt ja niiden pohjalta kehitetty verkon suunnitteluskenaario vuoteen 2035 saakka. Vision skenaarioissa on kuitenkin tehty myös verkon suunnitteluskenaariosta eriäviä lähtöoletuksia, mitkä haastavat verkon kehittämistä eri tavoin, mutta toisaalta ovat myös tärkeitä skenaarion toteutumiselle. Erityisesti korkeamman kasvun keskeisenä edellytyksenä on investointien sijainnin huomiointi siten, ettei siirtotarve pohjoisen ja etelän välillä kasva hallitsemattoman suureksi. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että osa uusista kulutusinvestoinneista ja sähkövarastoista tulisi ohjata alueille, joille sähköntuotanto jo nyt painottuu. Lisäksi skenaarioissa on huomioitu hybridiliityntöjä, joissa tuotantoa ja kulutusta liitetään saman liittymispisteen taakse. Näin voidaan hyödyntää olemassa olevaa verkkoa tehokkaammin, vähentää siirtotarpeita ja nopeuttaa hankkeiden liittämistä. Investointien sijainnin vaikutuksia ja ohjauskeinoja on arvioitu laajemmin luvussa 5.

Skenaarioiden oletukset teollisten kulutusinvestointien sijainnista on kuvattu seuraavaksi. Lisäksi kuva 5 havainnollistaa oletukset tuuli- ja aurinkovoiman sekä uuden ydinvoiman maantieteellisistä painopistealueista. Näiden lisäksi CHP-tuotanto perustuu metsäteollisuuden sivuvirtoihin sekä muuhun biomassaan ja siten keskittyvät biotuotekeskittymien ympärille Etelä- ja Itä-Suomeen. Nykyiset ydinvoima- ja vesivoimasijainnit säilyvät ennallaan.

- Sähköä dataksi -skenaariossa datakeskusinvestoinneista on tehty oletus, jonka mukaan niistä valtaosa sijoittuu Keski-Suomen poikkileikkauksen pohjoispuolelle: Keski- ja Pohjois-Pohjanmaalle, Kainuuseen ja Lappiin. Muut teolliset investoinnit sijoittuvat Perämeren rannikon teollisuuskeskittymiin sekä Etelä-Suomeen.
- Vedystä valtavirtaa -skenaariossa olennaisimpana vetyteollisuusinvestoinnit painottuvat etenkin länsirannikolle sekä Etelä- ja Kaakkois-Suomeen kansallisen laajan vetyputken varrelle. Vedyn siirtoinfra on oletettu mahdollistavan vedyntuotannon sijoittumisen pääosin lähelle sähköntuotantoa, samalla kun jatkojalostus voi hajaantua laajemmin eri alueille. Lisäksi skenaariossa kaukolämpö sähköistyy hyvin voimakkaasti Etelä-Suomessa.
- Notkeaa kehitystä -skenaariossa vetyteollisuusinvestoinnit sijoittuvat samoin kuin Vedystä valtavirtaa -skenaariossavetyputken varteen ja kaukolämpö sähköistyy hyvin voimakkaasti Vedystä valtavirtaa -skenaarion mukaisesti.
- Voimaa vakaasti -skenaariossa muuta teollisuutta sähköistetään etenkin Pohjanmaalla, kun taas datakeskukset, vetyteollisuus ja erityisesti sähköinen kaukolämpö nostavat kulutusta Keski-Suomen poikkileikkauksen eteläpuolella.





Kuva 5 Oletukset tuuli- ja aurinkovoiman sekä uuden ydinvoiman maantieteellisistä painopistealueista

- **Sähköä dataksi** -skenaariossa maatuuli-voiman kehitys painottuu Pohjanmaan lisäksi Kainuun ja Lapin alueelle. Merituulivoimaa kehitetään eteläiselle länsirannikolle ja aurinkovoiman kehitys painottuu Etelä-Suomeen. Lisäksi skenaariossa rakennetaan pienydinvoimaa Etelä-Suomen suuriin kaupunkikeskuksiin.
- **Vedystä valtavirtaa** -skenaariossa maatuuli-voiman painopiste on voimakkaammin länsirannikolla ja tuulivoimaa kehitetään myös huomattava määrä Itä-Suomeen. Merituuli-voiman ja aurinkovoiman osalta kehitys on samansuuntaista kuin Sähköä dataksi -skenaariossa.
- **Notkeaa kehitystä** -skenaariossa tuuli-voiman kehitys painottuu Länsi-Suomeen ja etenkin merituuli-voimaan länsirannikolla, mutta sen lisäksi myös rajusti Suomenlahdelle. Aurinkovoima sijaitsee valtaosin Etelä- ja Keski-Suomessa ja muihin skenaarioihin verrattuna suurempi osa kapasiteetista on katoille asennettavaa pientuotantoa.
- **Voimaa vakaasti** -skenaariossa tuuli-voiman kehitys painottuu länsirannikolle ja aurinkovoiman Etelä-Suomeen. Merkittävimpana skenaariossa rakennettavat suuren kokoluokan ydinvoimalat sijoittuvat Etelä-Suomeen Loviisan alueelle¹¹.

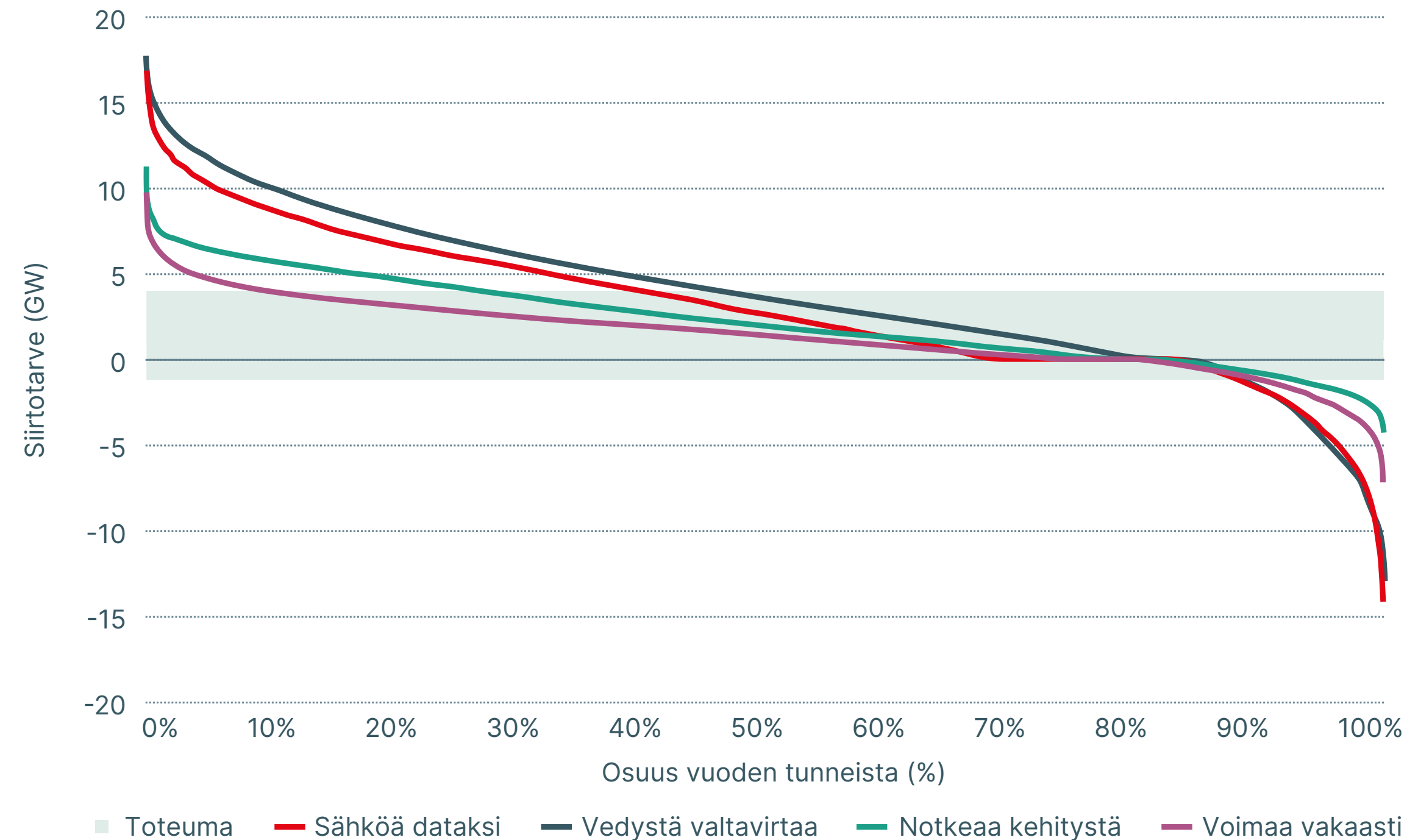
¹¹ Fortumin mukaan yksi vaihtoehto tulevalle maankäytölle Källa-Hästhölmens maa-alueella Loviisassa on uuden ydinvoiman kehittäminen. Lisätietoa: [Källa-Hästhölmens maa-alueiden kehittäminen](#) | Fortum (haettu 2.7.2025)

3.3 Poikkileikkausten siirtotarpeet

Korkean pohjois-eteläsuuntaisen sähkönsiirron tilanteet syntyvät, kun Pohjois-Suomessa on paljon sähkön tuotantoa tai tuontia ja Etelä-Suomessa samanaikaisesti paljon kulutusta tai vientiä. Näiden tilanteiden todennäköisyyttä lisäävät muun muassa kulutusta nostava kylmä sää, runsas tuulivoimatuotanto, maltillinen sähkön hinta sekä tuotantokeskeytykset Etelä-Suomessa. Etenkin näiden yhdistelmänä muodostuvat erittäin korkeat siirtotilanteet, jolloin valtaosa tuotannosta painottuu pohjoiseen ja kulutuksesta etelään.

Kuva 6 esittää skenaarioiden sähkön siirtotarpeet Keski-Suomen poikkileikkauksen yli pysyvyyskäyränä¹². Korkeamman kasvun skenaarioissa siirtotarve on korkeimmillaan 17–18 GW tasolla ja maltillisemman kasvun skenaarioissa 10–11 GW tasolla. Viime vuosina siirtojen huiput ovat keskimäärin olleet noin 4 GW, mikä tarkoittaa, että siirtotarve voi jopa viisinkertaistua nykyisestä.

¹² Vuoden kaikkien tuntien siirtotilanne järjestettynä pohjois-eteläsuunnassa korkeimmasta pienimpään. Positiivinen siirto on pohjoisesta etelään ja negatiivinen siirto etelästä pohjoiseen. Toteumassa kuvattu toteutunut maksimisiirto poikkileikkauksen yli pohjois- ja eteläsuuntaan viimeisen kahden vuoden ajalta.



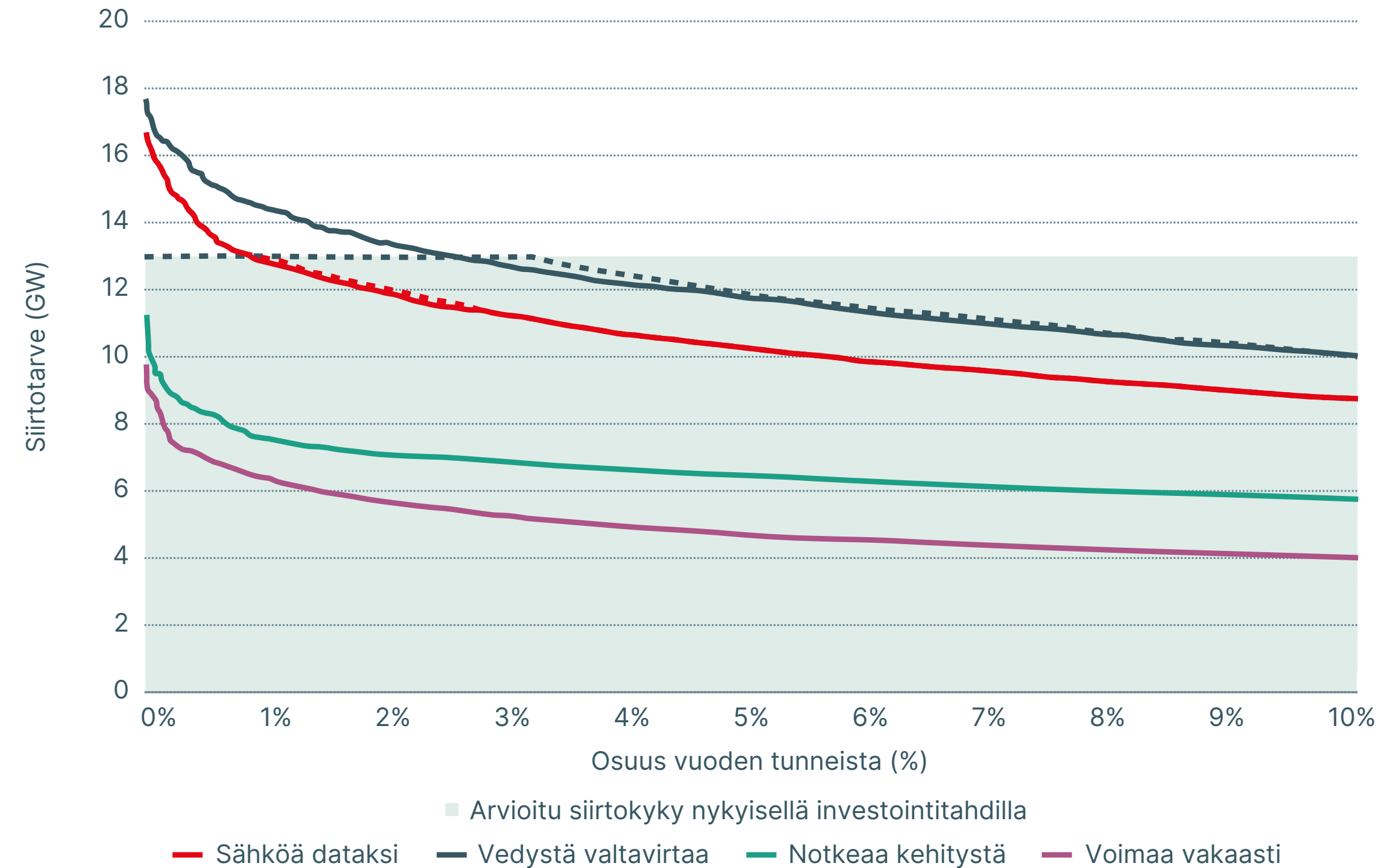
Kuva 6 Siirtotarpeet Keski-Suomen poikkileikkauksen yli

3.4 Joustojen vaikutus siirtotarpeeseen

Kaikissa skenaarioissa siirron pysyvyyskäyrän huippu on hyvin terävä eli korkeimman siirron tilanteita esiintyy vain pienenä osuutena vuoden tunneista edellä mainituista tilanteista johtuen. Merkittävä osa verkon vahvistustarpeista syntyy kuitenkin näistä korkeimmista siirtotilanteista. Karkeasti yksi uusi 400 kV johto kompensointiratkaisuineen vastaa noin 1 GW lisäsiirtokykyä, jolloin varautumalla tähän pieneen osaan vuoden tunneista muilla keinoin voitaisiin säästää verkkoinvestoinneissa ja hyödyntää kantaverkkoa tehokkaammin.

Tämän vuoksi korkean kasvun skenaarioiden osalta on tarkasteltu myös tilannetta, jossa korkeimpiin siirtotarpeisiin varauduttaisiin tehokkaasti joustojen avulla. Tämän arvioimiseksi siirtokyky on skenaarioissa rajattu tasoon, mihin arviolta päästäisiin nykyisellä investointitasolla kantaverkkoon. Keski-Suomen poikkileikkauksen osalta tämä tarkoittaa siirtokyvyn rajausta 13 GW tasolle, minkä lisäksi myös pohjoisempi Kemi-Oulujoen poikkileikkaus on rajattu 8 GW tasolle. Tarvittavat verkkovahvistukset on seuraavassa luvussa laskettu myös näille skenaarioille, joissa huippusiirrot hoidetaan verkkoinvestointien sijaan joustoilla. Kuva 7 havainnollistaa vaikutusta korkeimmilla siirtotunneilla Keski-Suomen poikkileikkauksen siirtoon.

Katkoviivalla esitetyt siirrot vastaavat tilannetta, jossa arvioidun siirtokyvyn ylittävät siirrot hallitaan joustoilla. Sähköä dataksi -skenaariossa joustoja tarvittaisiin vastaamaan noin 4 GW



Kuva 7 Korkeimmat siirtotarpeet Keski-Suomen poikkileikkauksen yli

huippuun, mutta niitä tarvittaisiin alle 1 % vuoden tunneista. Vastaavasti Vedystä valtavirtaa -skenaariossa joustoja tarvittaisiin korkeimmillaan noin 5 GW ja alle 3 % vuoden tunneista. Joustoilla korkeimmat siirtotilanteet voitaisiin hallita tehokkaasti ja siten

hyödyntää kantaverkkoa tehokkaammin, mikä mahdollistaisi useampien asiakkaiden liittämisen vähemmällä verkkoinvestoinneilla. Kantaverkon tehokasta hyödyntämistä ja keinoja siihen on käsitelty tarkemmin luvussa 5.

4

Kantaverkon vahvistustarpeet

Tässä luvussa esitetään ensin yhteenveto kantaverkon vahvistustarpeista, jossa vedetään yhteen skenaarioille yhteiset vahvistustarpeet. Tämän jälkeen käydään läpi skenaariokohtaiset verkkovahvistukset, jotka ovat enemmän riippuvaisia alueellisesta kehityksestä. Luvun lopuksi kuvataan käytetty verkostonlaskentaprosessi.



Kantaverkon vahvistustarpeet ovat esitetty Fingridin viimeisimmän kehittämissuunnitelman¹³ lisäksi, joka sisältää vuoteen 2035 mennessä noin 3 800 km uutta 400 kV:n johtoa. Kehittämissuunnitelman vahvistukset mahdollistavat lähtökohtaisesti Suomen sähkön tuotannon ja kulutuksen kaksinkertaistumisen nykytasosta seuraavan 10 vuoden aikana. Verkon kehitystarve voi kuitenkin olla hyvin erilainen, mikäli tuotanto ja kulutus kasvavat tai sijoittuvat eri tavalla kuin verkon suunnitteluskenaariossa on oletettu. Sen vuoksi visiotyössä tehdyt erilaiset skenaariot tarjoavat tärkeää tietoa kantaverkon vahvistustarpeista erilaisissa tuotannon ja kulutuksen alueellisissa kehityskuluissa.

¹³ Kantaverkon kehittämissuunnitelma 2026–2035 (luonnos). Saatavilla: [Kehittämissuunnitelma – Fingrid](#)



4.1 Yhteenveto

Skenaarioiden toteutuminen edellyttää kantaverkon ennakoivaa ja oikea-aikaista kehittämistä, jonka mahdollistamiseksi taloudellisen sääntelyn on tuettava asiakastarpeisiin vastaamista. Luvituksen sujuvuus on varmistettava sekä uusille johtohankkeille että tuotanto- ja kulutushankkeille, jotta siirtymä kohti puhdasta energiajärjestelmää on toteutettavissa. Samalla on huolehdittava yleisestä hyväksyttävyydestä ja pyrittävä minimoimaan maankäytön muutokset kantaverkon rakentamisen luontovaikutusten näkökulmasta. Investoinnit tehdään aina yhteiskunnan ja asiakkaiden tarpeisiin, ja uusien hankkeiden ohella Fingrid tavoittelee kantaverkon käytön tehostamista.

Skenaariot ja siten myös niissä tarvittavat kantaverkon vahvistustarpeet eli verkkoratkaisut eroavat toisistaan. Tätä eroa korostetaan esittämällä skenaarioiden toteutumiseksi vaadittavat 400 kV verkkovahvistusten johtokilometrit. Tämän lisäksi on tärkeää huomioida johtojen maankäyttötarve¹⁴. Fingrid pyrkii tehostamaan maankäyttöään esimerkiksi hyödyntämällä olemassa olevia johtokäytäviä ja vahvistamalla nykyisiä yhteyksiä, jolloin vahvistuksille ei tarvita täysin uutta johtokäytävää. Korkean kasvun skenaarioissa on laajamittaisia kantaverkon vahvistustarpeita ja lisäinvestointeja kertyy

noin 3000 kilometriä edellä mainitun investointisuunnitelman vahvistuksien lisäksi. Maltillisemman kasvun skenaarioissa vahvistukset ovat paikallisempia ja niitä kertyy noin 300–1000 johtokilometriä. Useammalle skenaariolle yhteisiä vahvistustarpeita tunnistettiin noin 1000 kilometrin edestä.

Kantaverkon mahdollisimman tehokkaalle hyödyntämiselle on edellytyksenä, että kulutus- ja tuotantoinvestoinnit sijoituisivat lähemmäs toisiaan ja järjestelmästä löytyy joustoja siirtohuipputilanteita varten. Vahvistustarpeet kasvavat ja haastavat entistä merkittävämmiin verkon rakentamista, mikäli niissä ei huomioida siirtohuippujen tasoittamista joustoilla. Tällöin kantaverkon vahvistustarpeet voivat nousta korkean kasvun skenaarioissa lähes 4000 kilometriin kantaverkon kehittämissuunnitelmassa tunnistettujen vahvistusten lisäksi.

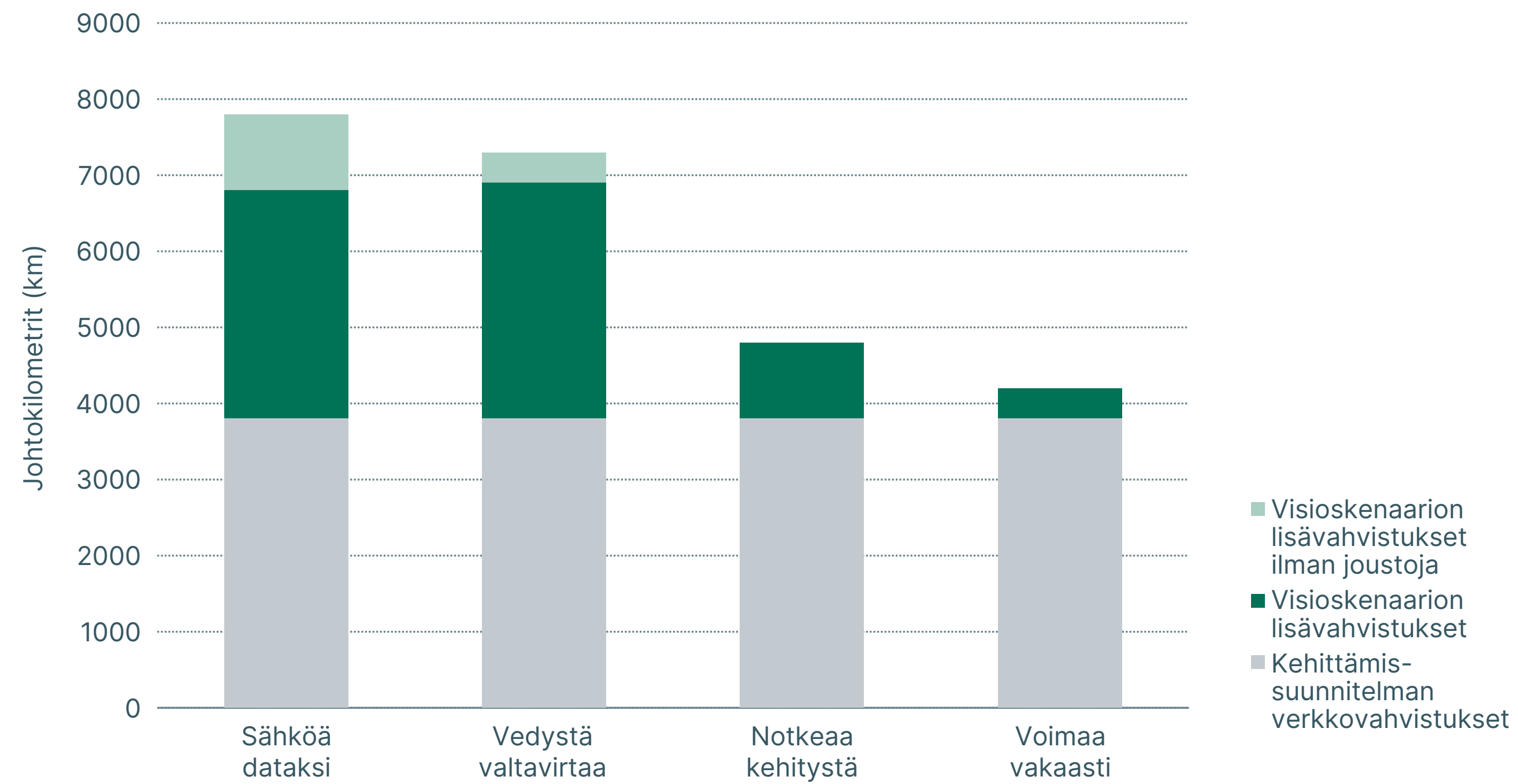
Kuva 8 esittää yhteenvedon skenaariokohtaisista vahvistustarpeista. Kehittämissuunnitelmassa vuosille 2026–2035 tunnistettujen vahvistustarpeiden lisäksi skenaarioissa verkon vahvistamiseen tarvitaan arviolta 300–4000 johtokilometriä¹⁵. Korkeamman kasvun skenaarioissa voidaan säästää investointikustannuksissa sähköverkkoon merkittävästi, mikäli siirtohuiput saadaan tasattua joustojen avulla. Siirtohuiput

koskevat vain hyvin pientä osaa vuoden tunneista, jolloin niiden hoitaminen muilla keinoin on kustannustehokasta ja säästö jakautuu sähkön käyttäjille kantaverkon siirtomaksujen kautta.

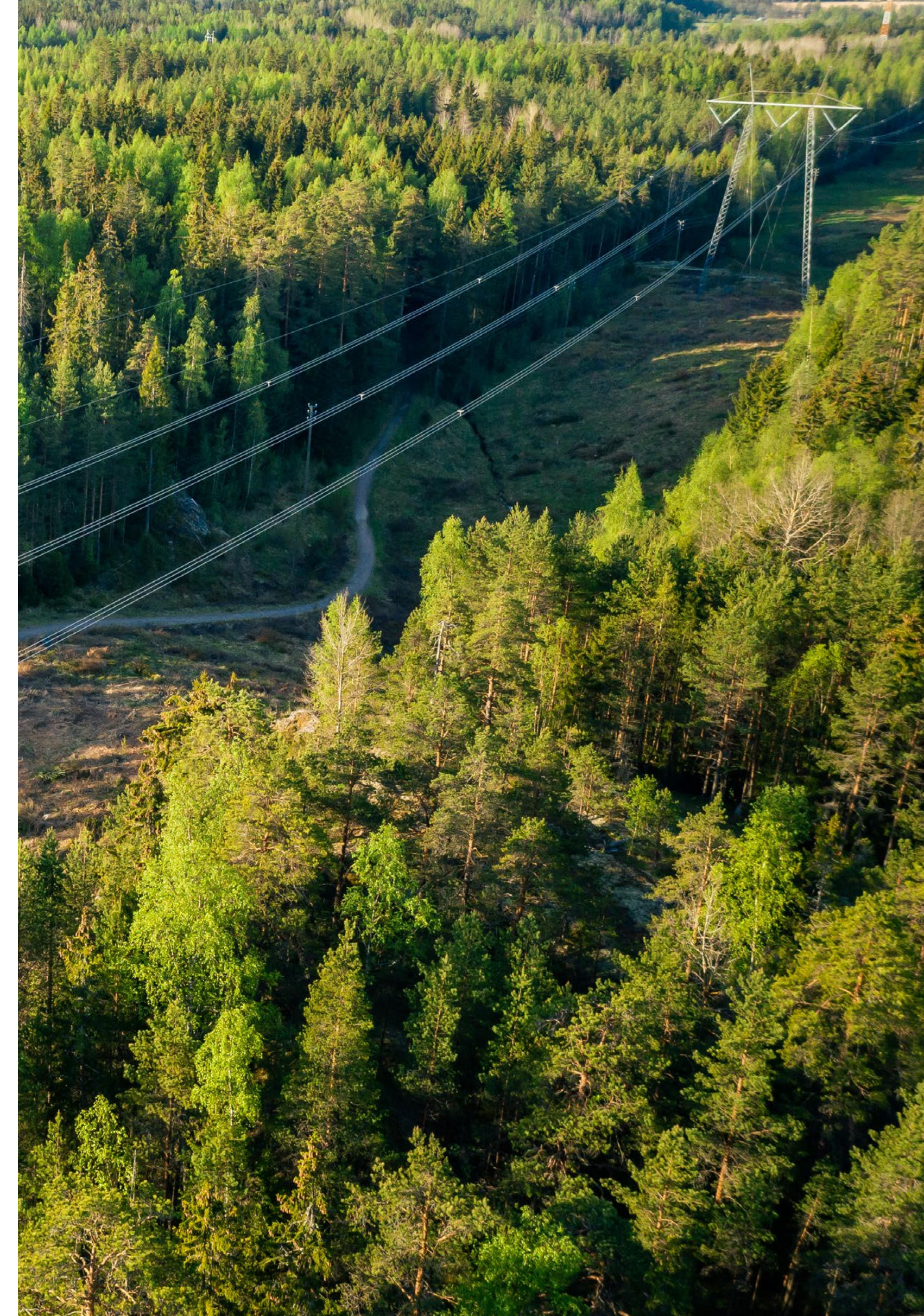
Korkean kasvun skenaariot haastavat merkittävästi verkon rakentamista, etenkin mikäli kantaverkkoa ei pystytä hyödyntämään tehokkaasti. Verkon rakentamisnopeus on jo nykyisen investointisuunnitelman puitteissa nopeampaa kuin koskaan aikaisemmin, ja tahdin nostaminen on haastavaa esimerkiksi työvoiman saatavuuden sekä luvitusprosessien keston vuoksi. Uusien siirtoyhteyksien rakentaminen vastaamaan vain hyvin pieneen osaan vuoden tunteja, jolloin siirrot ovat erittäin korkeita, ei ole toivottavaa eikä tehokasta myöskään maankäytöllisestä näkökulmasta. Näihin haastaviin huippusiirtotilanteisiin esitetään verkkoinvestointien lisäksi muita ratkaisuja luvussa 5.

¹⁴ Maankäyttötarve johtokilometriä kohden on karkean arvion mukaan keskimäärin 3–5 hehtaarin välillä. Fingrid pyrkii tehostamaan maankäyttöä toteuttamalla uusia verkkoratkaisuja mahdollisuuksien mukaan vanhan johdon tilalle tai rinnalle, jolloin maankäyttö on vähäisempää uuteen johtokatuun verrattuna.

¹⁵ Arvio skenaarioiden tarvitsemista lisäinvestoinneista uusiin 400 kV:n johtimiin ja tarvittaviin sähköasemiin on suuntaa antava, sillä siinä ei ole mukana kompensointilaitteiden kustannuksia ja uusien voimajohtojen reitit on arvioitu ylätasolla. Luvuissa ei ole myöskään tarkasteltu 110 kV:n vahvistustarpeita tai korvausinvestointeja investointisuunnitelman jälkeiselle ajalle, joista todennäköisesti syntyy myös tulevaisuudessa investointitarpeita.



Kuva 8 Skenaariossa tarvittavien verkkovahvistusten (400 kV) yhteenlaskettu pituus



4.2 Skenaarioiden verkkovahvistukset

Kuva 9 esittää yhteenvedon visiossa tunnistetuista kantaverkon lisävahvistustarpeista kehittämissuunnitelman vahvistuksen lisäksi. Useammassa kuin yhdessä skenaariossa tarvittavat verkkoratkaisut on esitetty kartassa tummanvihreällä ja yksittäisissä skenaarioissa esiin nousseet verkkoratkaisut vaaleanvihreällä.

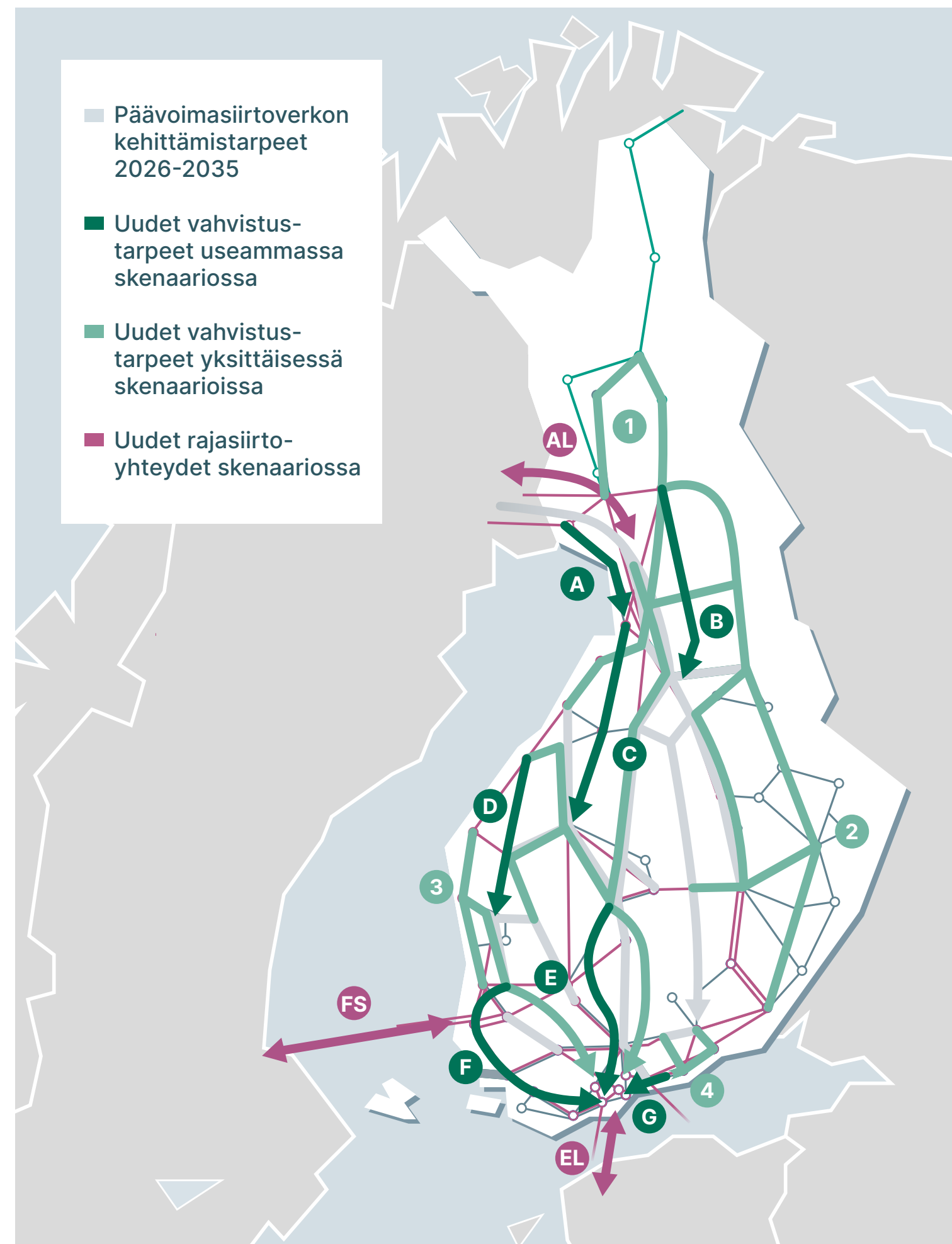
Skenaarioille yhteiset verkkoratkaisut nähdään lähtökohtaisesti tärkeimpinä, sillä niiden tarve toteutuu useammassa tulevaisuuden kehityskulussa. Näissä nousee esiin etenkin poikkileikkausten vahvistustarpeet. Molempien Kemi-Oulujoen sekä Keski-Suomen poikkileikkauksen yli rakennetaan kaksi uutta siirtojohtoa. Vastaavasti Lounaisleikkaukseen ja pääkaupunkiseudulle tarvittavat vahvistukset nousevat synteessä esiin. Näistä verkkoratkaisuista kertyy johtokilometrejä yhteensä 800–1300 kilometriä.

Skenaarioittain tunnistetut vahvistustarpeet on esitelty tarkemmin seuraavissa luvuissa. Yhteensä vision skenaarioissa tunnistettiin uusia verkkoratkaisuja lähes 7000 kilometrin edestä. Näistä kaikkia ei luultavasti koskaan toteuteta, sillä useiden verkkoratkaisuiden tarpeellisuus riippuu hyvin pitkälti alueellisesta tuotannon ja kulutuksen kehityksestä. Näiden osalta on kuitenkin tärkeää seurata kehitystä, esimerkiksi tuulivoiman ja teollisuuden sijaintitekijöitä, ja varautua erilaisissa kehityskuluissa tarvittaviin verkkoratkaisuihin.

Korkeamman kasvun skenaarioissa johtotarpeet kasvavat merkittävästi. Siitä huolimatta useammalle skenaariolle yhteisiä johtotarpeita on kuitenkin verrattain maltillinen määrä. Tämä johtuu toisaalta siitä, että skenaarioiden verkkoratkaisuihin on oletettu pohjaverkkoon mukaan Fingridin vuosien 2026–2035 kehittämissuunnitelmaan sisältyvät päävoimasiirtoverkon vahvistukset, jotka kattavat jo merkittävän osan skenaarioiden kasvusta etenkin maltillisemmissä kasvuskenaarioissa.

Eroavaisuutta vahvistustarpeiden välille syntyy myös luonnollisesti siitä, että skenaariot poikkeavat toisistaan tuotannon ja kulutuksen määrän sekä sijoittumisen suhteen. Erilaiset kehityskulut tarvitsevat toisistaan eriäviä alueellisia vahvistuksia kantaverkkoon. Lisäksi skenaariokohtaiset tarkastelut osoittavat, että korkeamman kasvun skenaarioissa johtoinvestointeja tarvitaan merkittävästi enemmän, jos verkkoinvestoinneilla halutaan kattaa kaikki mahdolliset siirtotilanteet myös keskeytykset huomioiden.





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 skenaarioissa
300-4000 km

Kuva 9 Yhteenveto skenaarioissa tunnistetuista kantaverkon vahvistustarpeista

4.3 Verkkovahvistukset: Sähköä dataksi

Sähköä dataksi -skenaariossa kantaverkkoon liittyy merkittävästi uutta tuulivoimaa, aurinkovoimaa, sähkövarastoja ja datakeskuksia. Tuotantopuolelta uusi tuulivoiman tuotanto sijoittuu suurilta osin pohjoisempaan Suomeen ja aurinkovoiman tuotanto eteläiseen Suomeen. Kulutuksesta valtaosa on etelässä, mutta uusia datakeskuksia rakennetaan myös pohjoisempaan lähelle tuulivoiman tuotantokeskittymiä.

Muihin skenaarioihin verrattuna Sähköä dataksi -skenaariossa on toiseksi suurin tuotannon ja kulutuksen kasvu, mikä näkyy hyvin merkittävänä vahvistustarpeina. Skenaariossa tarvitaan merkittävästi verkkovahvistuksia pohjois-eteläsuuntaisen tehonsiirron mahdollistamiseksi. Erityisesti Lapin alueen investointitarpeet korostuvat ja tuotannon läheisyyteen sijoitetut sähkövarastot tuovat järjestelmään vakautta.

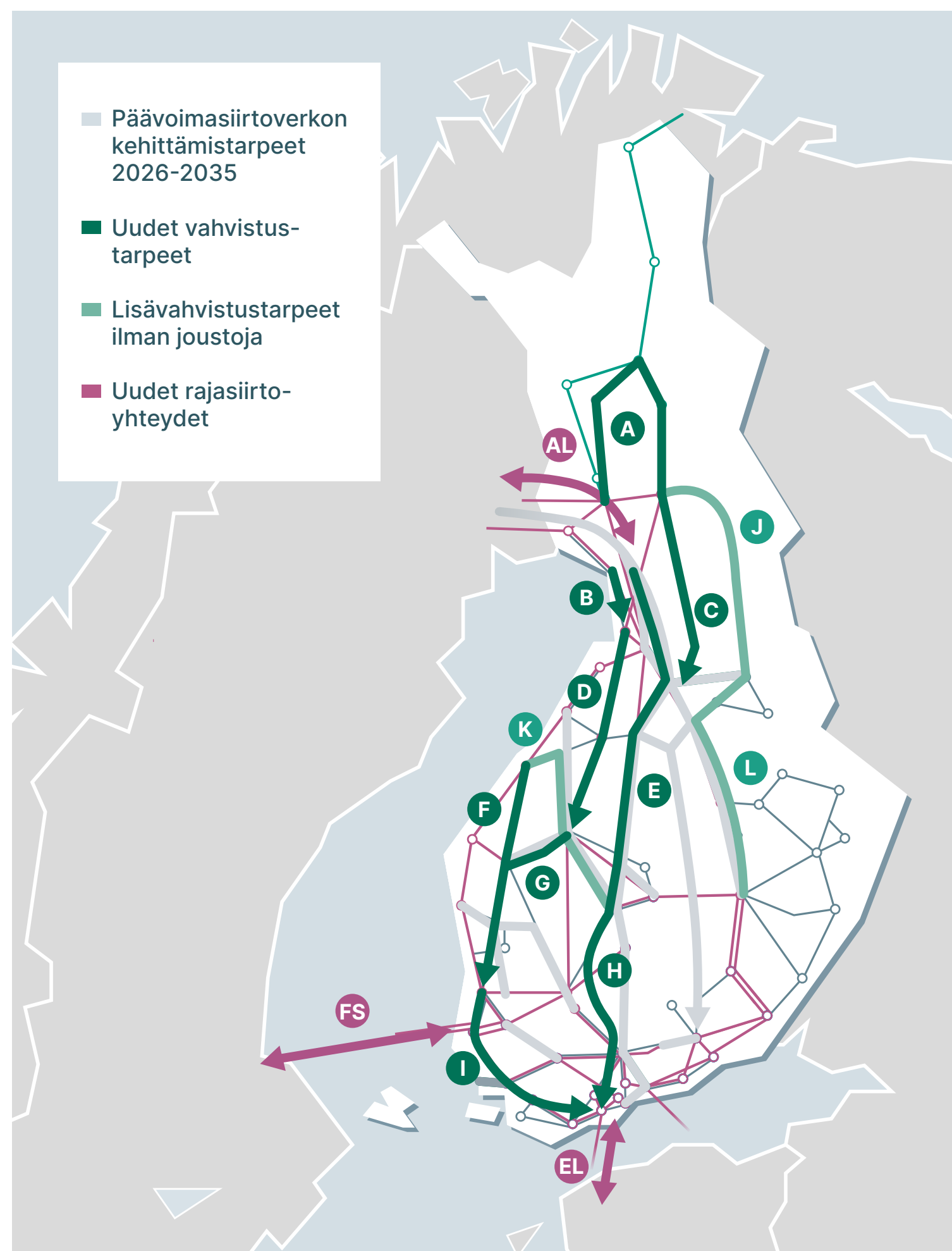
Kuva 10 esittää Sähköä dataksi -skenaariossa tunnistetut uudet kantaverkon vahvistustarpeet kehittämissuunnitelmassa tunnistettujen vahvistustarpeiden lisäksi. Sähköä dataksi -skenaariossa tarkasteltiin tapausta, jossa poikkileikkausten siirtokapasiteettia on rajattu perustuen nykyiseen investointitahtiin ja siirtohuippujen aikana hyödynnetään sähköjärjestelmästä saatavia joustoja. Tällöin johtoinvestointien kokonaismääräksi kertyy 3000 kilometriä (kartassa tummanvihreällä).

Mikäli joustoja ei ole saatavilla ja siirtohuippuihin varaudutaan verkkoinvestoinneilla, skenaarioissa tarvitaan johtoinvestointeja 1000 kilometriä lisää (kartassa vaaleanvihreällä). Yhteensä johtoinvestoinnit ovat siis 4000 kilometriä, jos joustoja ei ole saatavilla siirtohuippujen tasoittamiseen. Tämä tarkoittaisi investointitahdin kaksinkertaistamista seuraavan 10 vuoden kehittämissuunnitelmaan nähden, mikä on erittäin haastavaa toteuttaa yhden johtoinvestoinnin kestäessä keskimäärin 6–8 vuotta luvitus huomioiden. Näin useiden johtoinvestointien toteutus ei ole myöskään toivottavaa maankäytön näkökulmasta, jos ne olisivat ratkaistavissa muilla keinoin tehokkaasti.

Pohjoisen ylijäämän siirtämiseksi etelään verkkoratkaisussa tarvitaan niin kutsuttu Lapin lenkki kahdella virtapiirillä ja kaikkiaan yhteensä yhdeksän Kemi-Oulujoen poikkileikkauksen ylittävää 400 kV:n siirtojohtoa. Näistä poikkileikkauksen vahvistuksista viisi kuuluu jo nykyiseen verkkoon tai on huomioitu kehittämissuunnitelman vahvistuksissa, mikä tarkoittaa edelleen neljän uuden siirtojohdon rakentamista. Mikäli kaikki siirrot hoidetaan verkkoratkaisuilla joustojen sijaan, tarvitaan poikkileikkauksen yli kaksi siirtojohtoa lisää ja siirtojohtojen määrä nousee yhteensä yhteentoista.

Keski-Suomen poikkileikkaukseen tarvitaan skenaariossa kaiken kaikkiaan yhteensä kaksitoista 400 kV:n siirtojohtoa. Näistä viisi kuuluu nykyiseen verkkoon ja kuusi on jo tunnistettu kehittämissuunnitelman vahvistuksissa, joiden lisäksi tarvitaan siis yksi lisävahvistus. Nämä investoinnit mahdollistaisivat skenaarion mukaisen pohjois-eteläsuuntaisen siirron joustojen kanssa. Mikäli joustoja ei ole saatavilla, tarvitaan vielä kaksi siirtojohtoa lisää ja poikkileikkauksen johtojen yhteismäärä nousee neljääntoista. Suurin siirtopaine kohdistuu Pirttikoski–Nuojuankangas–Petäjävesi–Hikiä välille. Tällä yhteydellä skenaariossa tarvittavat uudet vahvistustarpeet haastavat suuresti maankäyttöä, sillä maastokäytäviin on haastavaa saada useampaa johtoa tiiviin asutuksen vuoksi.

Etelä-Suomessa erityisesti Rauma–Inkoo ja Hikiä–Inkoo yhteyksillä on siirtopainetta pääkaupunkiseudun suuntaan ja lounaisrannikolla vahvistuksia tarvitaan Honkajoki–Rauma välille. Näillä investoinneilla tuulivoima saadaan siirrettyä teollisuuden tarpeisiin. Investoinnit mahdollistaisivat merkittävän teollisuuskulutuksen kasvun etelään sekä kasvavan sähkönn viennin Baltian maihin Estlink 3 -yhteyden kautta.



Sähköä dataksi verkkovahvistukset 2040

Tunnistetut päävoimasiirtoverkon lisävahvistukset

- A Lapin lenkki
- B Yhteydet Meri-Lapista etelään
- C Yhteys Pirttikokselta etelään
- D Jokilinjojen uusinta
- E Metsälinjan vahvistus
- F Yhteys Kokkolasta Satakuntaan
- G Seinäjoki-Alajärvi vahvistus
- H Yhteys Keski-Suomesta pääkaupunkiseudulle
- I Lounaisleikkauksen vahvistus
- J Yhteys Pirttikokselta Kainuuseen
- K Yhteydet Toholammilta Keski-Suomeen ja Kokkolaan
- L Järvinlinjan vahvistus
- FS Fenno-Skan 3 yhteys Keski-Ruotsiin
- EL Estlink 3 yhteys Viroon
- AL Aurora Line 2 yhteys Pohjois-Ruotsiin

Uudet vahvistustarpeet
3000 km

Lisävahvistustarpeet ilman joustoja
1000 km

Kuva 10 Sähköä dataksi -skenaariossa tunnistetut uudet vahvistustarpeet

4.4 Verkkovahvistukset: Vedystä valtavirtaa

Vedystä valtavirtaa -skenaariossa tuotannon kasvu painottuu pääasiassa Itä-Suomeen sekä länsirannikolle ja Pohjanmaalle. Uutta kulutusta tulee eniten Etelä-Suomeen sekä länsirannikolle. Länsi- ja etelärannikolle tulevan tuotannon on kasvavissa määrin oletettu toteutuvan hybridiliityntöinä, jossa kulutus ja tuotanto ovat saman liityntäpisteen takana. Tämän liityntäpisteen tehoa on myös rajattu siten, että vaikutus verkkoon on vähäisempi.

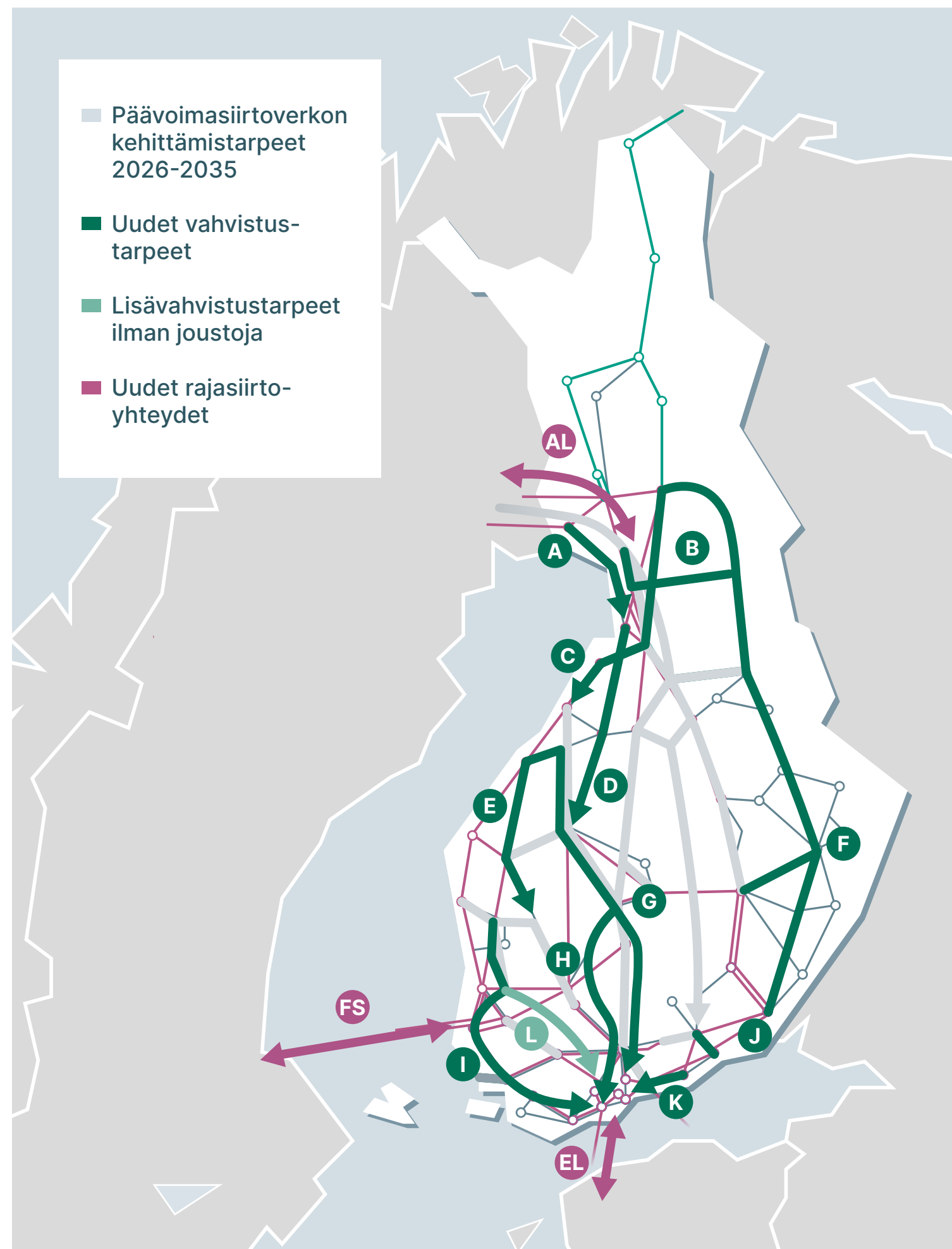
Kuva 11 esittää Vedystä valtavirtaa -skenaarion tarvitsemat verkkovahvistukset. Kehittämissuunnitelmassa tunnistettujen vahvistustarpeiden lisäksi tarvitaan 3100 kilometriä uutta voimajohtoa, kun siirtohuiput pystytään tasoittamaan joustoilla. Vahvistustarpeet kasvavat yhteensä 3500 kilometriin, mikäli siirtohuippuihin varaudutaan verkkoratkaisuilla.

Kantaverkkoa on vahvistettava merkittävästi etenkin länsirannikolla. Keminmaalta tarvitaan uusi yhteys Kemi-Oulujoen poikkileikkauksen yli Ouluun, josta lähtevät Jokilinjat tulee vahvistaa Keski-Suomen poikkileikkauksen vahvistamiseksi. Länsirannikon hybridiliityntöjen mahdollistamiseksi tarvitaan yhteydet Kokkolasta etelään sekä Keski-Suomeen Lakeuslinjan tuplauksella. Lakeuslinjan tuplaus vaatii myös yhteyksiä Keski-Suomesta etelään päin Tampereelle ja Hausjärvelle. Lounais-Suomeen skenaariossa tulee merkittäviä vahvistuk-

sia Lounaisleikkaukseen, hybridiliityntöjen mahdollistamiseksi ja sähkön siirtämiseksi Uudellemaalle.

Itä-Suomen tuuli- ja aurinkovoima aiheuttaa merkittävän investointitarpeen Kemijärveltä aina Lappeenrantaan asti, jotta uusi tuuli- ja aurinkovoima saadaan liitettyä kantaverkkoon. Tällä yhteydellä saadaan myös syötettyä Kymenlaakson ja Etelä-Karjalan uutta kulutusta ja muuta Etelä-Suomea. Koska skenaariossa uutta tuotantoa tulee sekä Itä- että Länsi-Suomeen nousee tarve myös itä-länsisuuntaisille yhteyksille. Esimerkiksi Kemijärveltä tarvitaan yhteys Kalajoelle Kemi-Oulujoen poikkileikkauksen yli sähkön siirtämiseksi Lapista ja Koillismaalta Pohjois-Pohjanmaalle. Lisäksi tarvitaan yhteydet Koillismaalta Meri-Lappiin ja Pohjois-Karjalasta Etelä-Savoon, Huutokosken asemalle. Skenaariossa on voimajohtojen lisäksi tarve merkittävälle jännitetuelle etenkin Etelä-Suomessa.





Vedystä valtavirtaa verkkovahvistukset 2040

Tunnistetut päävoimasiirtoverkon lisävahvistukset

- A** Yhteys Keminmaalta Ouluun
- B** Yhteydet Pirttikokselta etelään
- C** Yhteys Muhokselta Kalajoelle
- D** Jokilinjojen uusinta
- E** Yhteys Kokkolasta Pirkanmaalle
- F** Yhteys Kainuusta Etelä-Karjalaan
- G** Toholampi-Hausjärvi vahvistus
- H** Yhteys Keski-Suomesta pääkaupunkiseudulle
- I** Lounaisleikkauksen vahvistus
- J** Kymenlaakson vahvistus
- K** Pääkaupunkiseudun vahvistus
- L** Lounaisleikkauksen lisävahvistus
- FS** Fenno-Skan 3 yhteys Keski-Ruotsiin
- EL** Estlink 3 yhteys Viroon
- AL** Aurora Line 2 yhteys Pohjois-Ruotsiin

Uudet vahvistustarpeet
3100 km

Lisävahvistustarpeet ilman joustoja
400 km

Kuva 11 Vedystä valtavirtaa -skenaariossa tunnistetut uudet vahvistustarpeet

4.5 Verkkovahvistukset: Notkeaa kehitystä

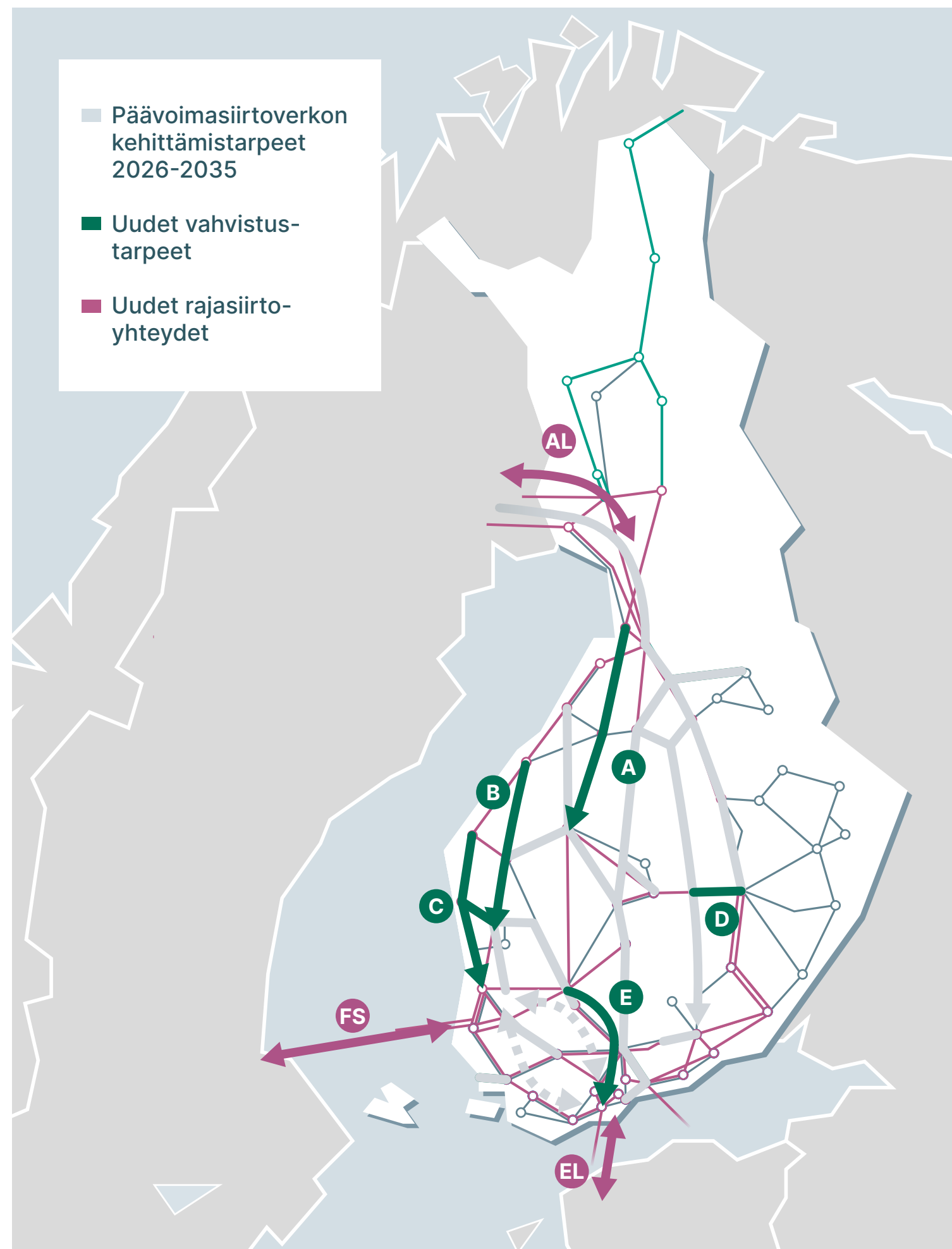
Notkeaa kehitystä -skenaariossa siirtotarpeet jäävät maltillisemmiksi kuin korkeamman kasvun skenaarioissa. Pohjois-eteläsuuntainen siirto jää Keski-Suomen leikkauksessa myös Fingridin verkon suunnitteluskenaarion vuoden 2035 siirtoja pienemmäksi. Siten skenaariossa ei tarvita merkittäviä investointeja päävoimansiirtoverkon poikkileikkauksiin, vaan tunnistetut verkkoratkaisut muodostuvat enemmän uuden tuotannon ja kulutuksen aiheuttamista paikallisista tarpeista verkon vahvistamiseksi. Skenaariolle ominaista on merituu-
livoiman kasvu erityisesti länsirannikon alueella, mikä näkyy myös tarvittavissa verkkovahvistuksissa.

Kuva 12 ja sen viereinen taulukko esittävät Notkeaa kehitystä -skenaariossa tunnistetut uudet kantaverkon vahvistustarpeet. Arvioitu vahvistustarve investointisuunnitelmassa olevien hankkeiden lisäksi on kokonaisuudessaan noin 1000 johtokilometriä. Tämä tarve vastaa lähestulkoon aiempaa Fingridin selvitystä merituu-
livoiman liittamisestä¹⁶. Skenaariossa saadaan liitettyä hieman enemmän merituu-
livoimaa, sillä liittämistä helpottaa hybridiliitynnät. Näissä liitynnöissä kulutusta ja tuotantoa on liitetty saman liityntäpisteen taakse, jolloin vaikutus kantaverkkoon on vähäisempi ja hankkeiden liitettävyyden sen myötä paranee.

¹⁶ Merituuliselvitys 2024. [Merituulivoimaselvitys - Fingrid](#)

Tarkemmin lisäverkkovahvistuksia tarvitaan Vaasan ja Seinäjoen seuduilta Satakuntaan ja edelleen Pirkanmaalta Kanta-Hämeen kautta pääkaupunkiseudulle. Näissä merkittävänä tekijänä voi nähdä uuden merituu-
livoiman, joka on kytketty valtaosin länsirannikolle. Lisäksi verkkotarkasteluissa todettiin tarve vahvistaa Järvilinjan läntinen virtapiiri ja itä-länsi-suuntainen Pieksämäen ja Huutokosken välinen yhteys.





Notkeaa kehitystä verkkovahvistukset 2040

Tunnistetut päävoimasiirtoverkon lisävahvistukset

- A** Toisen Jokilinjan vahvistus
- B** Yhteys Kokkolasta Satakuntaan
- C** Pohjanmaan ja Satakunnan vahvistukset
- D** Huutokoski-Pieksämäki vahvistus
- E** Yhteys Tampereelta pääkaupunkiseudulle
- FS** Fenno-Skan 3 yhteys Keski-Ruotsiin
- EL** Estlink 3 yhteys Viroon
- AL** Aurora Line 2 yhteys Pohjois-Ruotsiin

Uudet vahvistustarpeet
1000 km

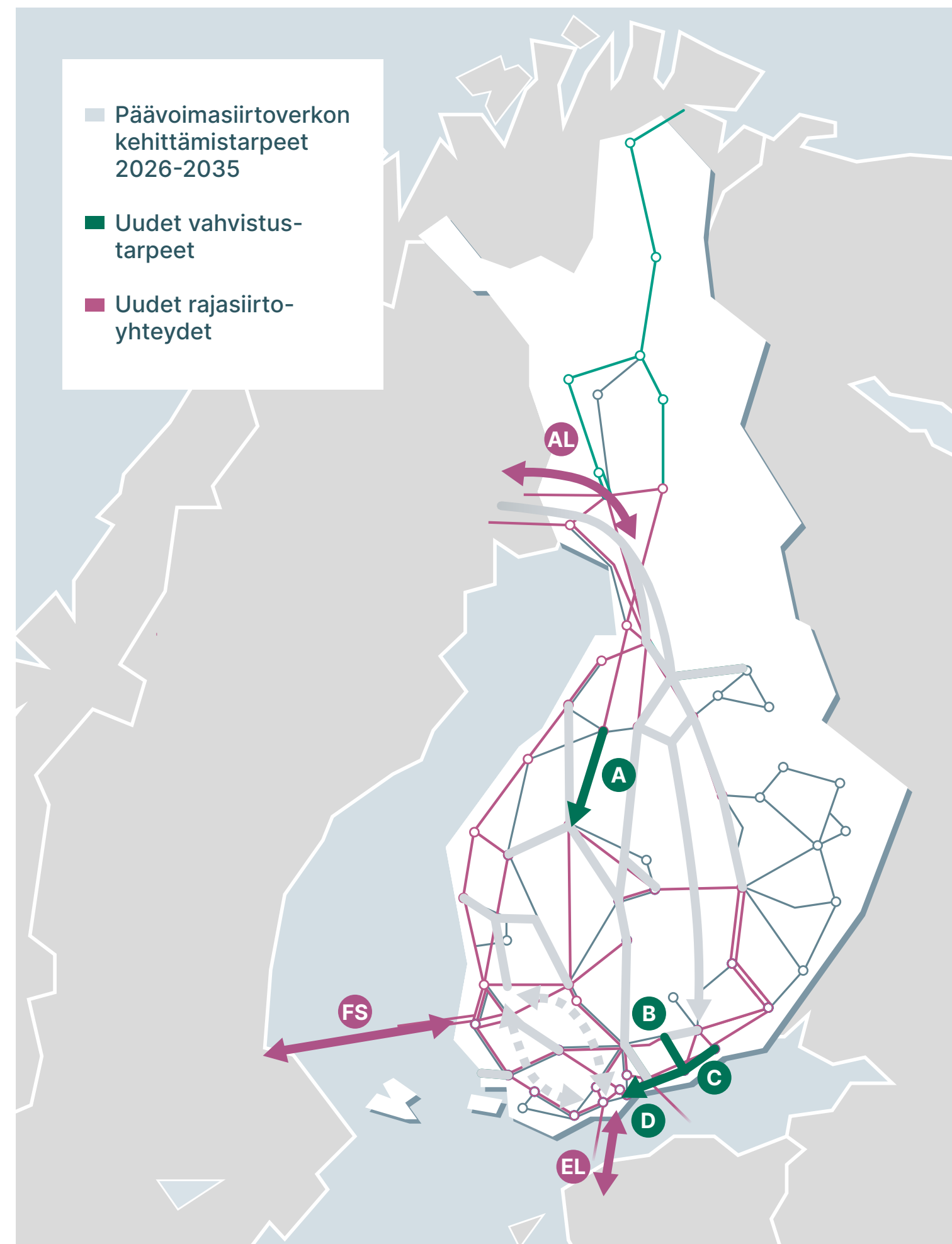
Kuva 12 Notkeaa kehitystä -skenaariossa tunnistetut uudet vahvistustarpeet

4.6 Verkkovahvistukset: Voimaa vakaasti

Voimaa vakaasti -skenaarion siirrot jäävät pienemmiksi verrattuna muihin skenaarioihin, mukaan lukien kehittämissuunnitelmassa tunnistettujen vahvistustarpeiden pohjalla olevan verkon suunnitteluskenaarioon, johtuen verrattain maltillisesta kehityksestä. Ainoastaan Kemi-Oulujoen ja pääkaupunkiseudun alueella maksimisiirrot ylittävät Fingridin verkon suunnitteluskenaarion tason.

Kuva 13 ja sen viereinen taulukko esittävät Voimaa vakaasti -skenaariossa tunnistetut uudet kantaverkon vahvistustarpeet. Kokonaisvahvistustarve on noin 350 johtokilometriä. Käytännössä merkittävin lisäverkkovahvistustarve muodostuu uusien ydinvoimalaitosten kantaverkkoliitynnöistä, sillä skenaariossa sijaintipaikaksi valittu Loviisa on lähellä Uudenmaan ja Kymenlaakson suuria kulutuskohteita. Ainoa lisävahvistustarve pääsiirtoleikkauksissa on Uusnivala–Alajärven välin läntisellä johto-osalla.





Voimaa vakaasti verkkovahvistukset 2040

Tunnistetut päävoimasiirtoverkon lisävahvistukset

- A** Uusnivala-Alajärvi vahvistus
- B** Yhteys Loviisasta Orimattilaan
- C** Kymi-Anttila vahvistus
- D** Pääkaupunkiseudun vahvistus
- FS** Fenno-Skan 3 yhteys Keski-Ruotsiin
- EL** Estlink 3 yhteys Viroon
- AL** Aurora Line 2 yhteys Pohjois-Ruotsiin

Uudet vahvistustarpeet
400 km

Kuva 13 Voimaa vakaasti -skenaariossa tunnistetut uudet vahvistustarpeet

4.7 Verkostolaskenta

Verkostotarkastelujen tavoitteena on löytää N-1-kestoinen¹⁷ pääsiirtoverkko jokaisessa skenaarioissa. Sähköjärjestelmävision verkostanalyysijä varten laskentaohjelmistoon luotiin pohjamalli, jossa on kuvattuna nykyisen kantaverkon lisäksi myös Fingridin investointisuunnitelman mukaiset verkkovahvistukset vuosilta 2025–2035. Pohjamalliin on lisätty skenaarioiden mukaisesti uutta kulutusta ja tuotantoa. Näiden liittämiseksi malliin on lisätty uusia sähköasemia ja 400/110 kV muuntajia. Uuden sähköntuotannon liityntöjä ei kuitenkaan ole mallinnettu yksityiskohtaisesti.

Yhteisestä pohjamallista luodaan simuloidut verkon käyttötilanteet kunkin skenaarion jokaiselle vuoden tunnille käyttäen markkinamallinnuksen tuloksia. Vuoden aikana toteutuvia tilanteita analysoimalla havaitaan kunkin skenaarion haasteet, ja niitä ratkaistaan lisäämällä malliin tarpeellisia kantaverkon vahvistuksia, jotta mallinnuksessa saavutetaan riittävä siirtokyky. Skenaarioiden läsiirtotarpeita lähdettiin ratkaisemaan lisäämällä 400 kV:n voimajohtoja¹⁸ käyttäen sarjakompensointia pääsiirtoleikkauksissa.

Rinnakkaiskompensoinnin tarvetta ei ole yksityiskohtaisesti selvitetty sen paikallisen luonteen vuoksi. Tutkittujen verkkoratkaisujen kohdalla on oletettu, että rinnakkaiskompensointia tarvitaan tulevaisuudessa nykyistä selkeästi suurempi

määrä ottamatta kantaa tarkkaan määrään tai sijoittumiseen. Rinnakkaiskompensoinnin toteuttaminen on olennaisesti nopeampaa kuin voimajohdon rakentaminen, joten rinnakkaiskompensoinnin tarkempi analysointi on jätetty tarkastelujen ulkopuolelle.

Visiossa on tunnistettu skenaariokohtaisia vahvistustarpeita investointisuunnitelman lisäksi. Nämä esitetyt verkon vahvistustarpeet kuvaavat siirtotarvetta asemien välillä. Esitysteknisesti siirtotarpeisiin vastaavien vahvistusten esittämisessä on hyödynnetty nykyisiä johtokatuja niillä osuuksilla, joilla verkkoa on jo rakennettu. Voimajohtojen käytännön toteutettavuutta, kuten tarkkaa reittiä tai maankäytöllistä näkökulmaa ei ole kuitenkaan erikseen tarkasteltu.

Vahvistustarpeita tarkastellessa on hyvä myös huomioida, että todellisuudessa verkko rakentuu vaiheittain, ja vaiheittain rakentuessa esitetyt ratkaisut voivat vaatia myös esimerkiksi liityntöjä tai käyttövarmuutta palvelevia johtoja, joita ei ole skenaariotyössä havaittu. Myös maankäyttö voi asettaa rajoitteita sille, minne johdot rakentuvat. Visiossa esitettäviä verkkovahvistuksia tarkasteltaessa tulee myös huomioida, että skenaarioissa on tehty oletuksia tulevasta kulutuksen ja tuotannon sijoittumisesta, mikä luonnollisesti vaikuttaa esitettyihin vahvistusehdotuksiin.

¹⁷ N-1 kestoisuus tarkoittaa, että järjestelmä kestää tavanomaiset yksittäiset viat ja vikaantuneen komponentin irtoamisen. N-0 kestoisuus taas kuvaa järjestelmän olevan kestävä ehjässä tilassa, vikatilanteita huomioimatta.

¹⁸ Uudet johdot on verkkotarkasteluissa oletettu Fingridin 400 kV:n verkon perusratkaisun mukaisiksi 3-Finch -virtajohtimilla toteutetuiksi portaalipylväsjohdoiksi.



5

Kantaverkon tehokas hyödyntäminen

Tässä luvussa investointien sijainnin vaikutusta siirtotarpeisiin on pyritty havainnollistamaan vaihtoehtoisilla teollisuuden ja sähkövarastojen sijoittumisella korkeamman kasvun skenaarioissa. Näissä herkkyystarkasteluissa investointien sijainti on lähtökohtaisesti epäsuotuisampi kuin viime luvuissa esitetyissä pohjaskenaarioissa, mitä on käytetty verkon vahvistustarpeiden laskemiseen. Lisäksi luvussa on tarkasteltu alueellisen tuotantotariffin ja sähkö- ja vetyverkon yhteispelin vaikutusta huippusiirtoihin.



5.1 Yhteenveto

Uusien teollisuusinvestointien sijainnilla on keskeinen vaikutus sähkönsiirron tarpeisiin ja kantaverkon tehokkaaseen hyödyntämiseen. Jatkossa yhä suurempi osa sähköntuotannosta sijaitsee pohjoisemmassa, kun taas kulutus keskittyy etelään. Korkeimpien kasvuskenaarioiden toteuttamiseksi uusia teollisia investointeja ja sähkövarastoja tulisi ainakin joiltain osin ohjata ja kannustaa sijoittumaan kantaverkon kannalta suotuisiin sijainteihin lähemmäs tuotantoa, jolloin sähköjärjestelmän liityntä- ja siirtokapasiteettia pystyttäisiin hyödyntämään tehokkaasti.

Siirrot epäsuotuisissa herkkyystarkasteluissa poikkileikkauksien yli kasvavat 4–8 GW pohjaskenaarioihin nähden, mikä tarkoittaa merkittäviä lisäinvestointitarpeita sähköverkkoon ja käytännössä useita uusia pohjois-eteläsuuntaisia voimajohtoja. Näin ollen sekä datakeskusten että vedyntuotantolaitosten sijoittaminen lähemmäs sähköntuotannon painopistealueita – erityisesti pohjoisempaan Suomeen – sekä niiden kyky tarjota joustoa huipputilanteissa, on ratkaisevaa siirtohuippujen hallitsemiseksi ja kustannustehokkaan sähköjärjestelmän varmistamiseksi.

Investointien sijaintiin liittyy suuria epävarmuuksia ja siihen olisi tärkeää pystyä vaikuttamaan, jotta korkean kasvun skenaariot ovat mahdollisia. Kehitysnopeus on silti hyvin haastava, mutta sijainnin ohjauskeinoilla ne olisivat realistisempia toteuttaa myös kantaverkkoinvestointien puitteissa.

Fingrid pyrkii tekemään aktiivisesti yhteistyötä asiakkaiden kanssa, jotta kulutushankkeita saadaan ohjattua kantaverkon liittämiskyvyn kannalta hyviin sijainteihin ja kantaverkkoa kehitettyä ennakoivasti ja oikea-aikaisesti. Tämän lisäksi investointeja voitaisiin kannustaa markkinakeinoin sijoittumaan suotuisiin sijainteihin esimerkiksi alueittain eriävällä tariffilla tai liittymismaksulla.

Kantaverkon tehokkaalle hyödyntämiselle on myös edellytyksenä, että sähköjärjestelmässä on saatavilla joustoja oikeassa paikassa ja oikeaan aikaan korkeimpien huippusiirtotilanteiden varalta. Yksi keskeinen keino on kulutuksen ajoittaminen, esimerkiksi optimoimalla sähkövarastojen käyttöä ja sähköautojen latausta siten, että ne tukevat verkon tasapainoa siirtotilanteiden mukaan. Fingridin ehdottamat joustavat liittynnät voisivat myös olla osa ratkaisua, jolla varmistetaan jouston saatavuus. Lisäksi alueellisesti eriytetty liittymismaksut tai kantaverkkotariffi voivat ohjata sekä investointeja että kulutusta oikeille alueille. Viimesijaisena vaihtoehtona siirtohuippujen hallitsemiseen on myös ns. ajojärjestyksen uudelleenmäärittely, mikä tosin edellyttää riittävästi säädettävää kapasiteettia oikealla alueella ja voi osoittautua kalliiksi ratkaisuksi.

Luvituksen ja taloudellisen sääntelyn tulee mahdollistaa tarvittavat investoinnit kantaverkkoon, ja lisäksi kantaverkon tehokasta käyttöä mahdollistavat toimenpiteet tulee olla

mahdollista toteuttaa, jotta vältetään merkittävien pullonkaulojen muodostuminen verkkoon. Merkittävät ja pitkäaikaiset rakenteellisista pullonkaulaloista aiheutuvat siirtorajoitukset voisivat äärimmillään johtaa eurooppalaisen regulaattorin päätökseen tarjousaluerakenteen tarkastelusta. Fingridin tavoitteena on ratkaista haasteet ennakoivasti ja oikea-aikaisesti pitäen Suomi yhtenä tarjousalueena.

5.2 Investointien sijainnin vaikutus

Fingrid on saanut kulutuksen liityntäkyselyitä noin 70 gigawatin edestä, joista valtaosa koskee vetyteollisuutta ja datakeskuksia. Tämän lisäksi liityntäkyselyitä sähkövarastoista on noin 30 gigawatin edestä. Näiden maantieteellisellä sijoittumisella on siten merkittävä vaikutus siirtoihin ja kantaverkon kehittämiseen. Herkkyystarkasteluihin valikoitiin kulutusinvestointien osalta korkeimpien kasvuskenaarioiden voimakkain kasvusegmentti: Sähköä dataksi -skenaariossa datakeskukset ja Vedystä valtavirtaa -skenaariossa vetyteollisuus. Sähkövarastojen sijainnin vaikutusta tarkasteltiin Sähköä dataksi -skenaariossa, missä niiden määrä kasvoi selvästi eniten.

Kaikki herkkyystarkastelut, joissa on siirretty investointien sijaintia etelämmäksi kasvattavat siirtoja pohjaskenaarioon verrattuna sekä nostavat lisäksi siirtojen huippua merkittävästi. Tämä lisää merkittävästi tarvetta investoinneille kantaverkkoon siirtokapasiteetin kasvattamiseksi. Uusien teollisten investointien ja sähkövarastojen tulisi niiltä osin kuin mahdollista sijoittua kantaverkon kannalta suotuisiin sijainteihin lähemmäs tuotantoa. Sijainnin ohjaamiseen tulisi olla käytössä työkaluja ja kannusteita, jotta sähköverkon kehitys ei muodostu pullonkaulaksi korkeiden kasvuskenaarioiden toteutumiselle.

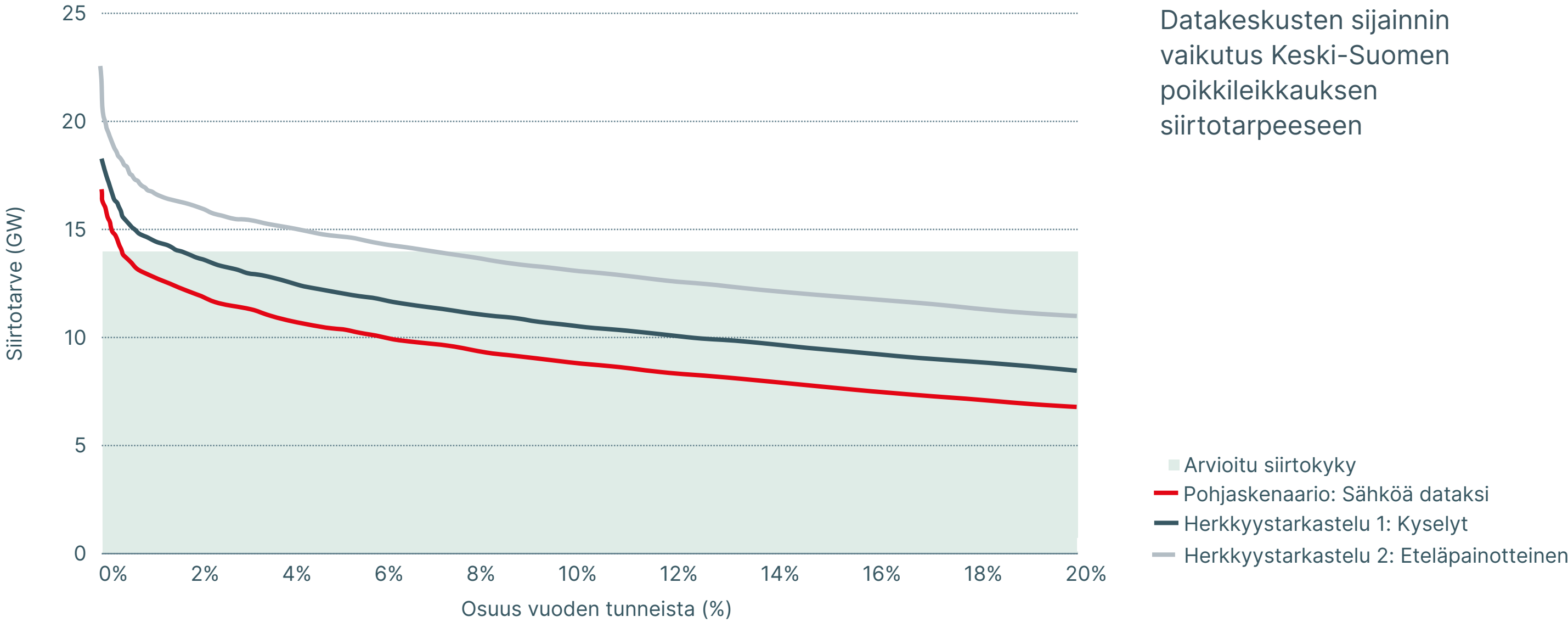


Datakeskukset

Aiemmin kuvatun kaltaisesti datakeskukset sijaitsevat Sähköä dataksi -skenaariossa melko tasaisesti ympäri Suomea. Taulukko 16 esittää kuinka herkkyystarkasteluissa painotettiin datakeskusten sijaintia eri tavoin. Ensimmäisessä herkkyystarkastelussa datakeskukset on jaettu poikkileikkausten jakamiin alueisiin Fingridille tulneiden liityntäkyselyjen suhteessa, ja toisessa herkkyystarkastelussa datakeskuksia on painotettu vielä vahvemmin etelään ääripään löytämiseksi. Liityntäkyselyihin perustuvassa herkkyystarkastelussa lähes kaksi kolmasosaa datakeskuksista sijoittuu Keski-Suomen poikkileikkauksen eteläpuolelle, kun taas eteläpainotteisessa tarkastelussa lähes 90 % sijaitsee tämän leikkauksen eteläpuolella.

Kuva 14 esittää datakeskusten sijainnin vaikutuksen Keski-Suomen poikkileikkauksen siirtotarpeeseen. Pohjaskenaariossa arvioidun siirtokyvyn ylitykset olisivat hoidettavissa joustoilla esimerkiksi Etelä-Suomessa sijaitsevasta huippuvoimakapasiteetista (noin 5 GW). Datakeskusten sijoittuminen etelämmäksi kuitenkin kasvattaa sekä pohjois-eteläsuuntaisia siirtomääriä että siirtojen huippuja. Kyselyiden mukaan painotetussa herkkyystarkastelussa huippusiirtotarve nousee 1,6 GW:llä pohjaskenaariosta, jolloin tunnistetut joustot eivät riitä vastaamaan korkeimpiin siirtotilanteisiin ja tarvittaisiin lisävahvistuksia.

Vahvasti eteläpainotteisessa herkkyystarkastelussa siirrot pohjoisen ja etelän välillä ylittävät pohjaskenaarion huipun noin 6 GW:lla, yltäen korkeimmillaan yli 22 GW tasolle. Käytännössä tämä tarkoittaisi vähintään kuuden uuden pohjois-eteläsuuntaisen johdon rakentamista jo tunnistettujen mittavien vahvistusten lisäksi tai merkittävää uutta joustokykä. Tämä osoit-



Kuva 14

Datakeskusten sijainnin vaikutus Keski-Suomen poikkileikkauksen siirtotarpeeseen

Sijainti suhteessa Keski-Suomen poikkileikkaukseen	Pohjaskenaario: Sähköä dataksi	Herkkyystarkastelu 1: Kyselyt	Herkkyystarkastelu 2: Eteläpainotteinen
Pohjoispuolinen alue	58 %	37 %	12 %
Eteläpuolinen alue	42 %	63 %	88 %

Taulukko 16

Datakeskusten sijainnin herkkyystarkastelut

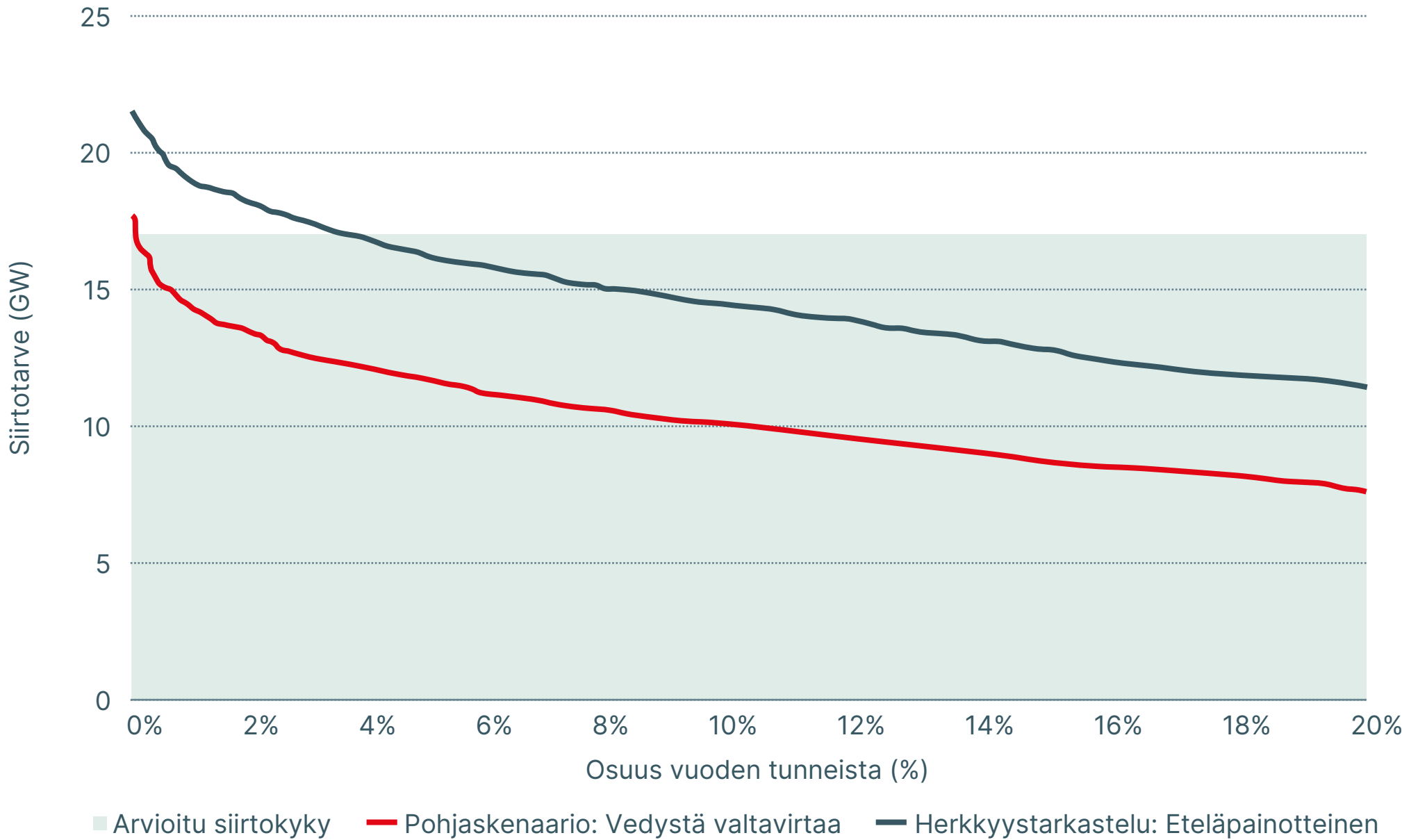
taa, että näin voimakas kulutuksen kasvun mahdollistaminen sähkön siirron kannalta järkevästi vaatii joko datakeskusten

sijoittumista myös pohjoisemmaksi tai etelään sijoittuvien datakeskusten kykyä tarjota joustoa huippusiirtojen hallisemiseksi.

Vetyteollisuus

Vedystä valtavirtaa -skenaariossa herkkyystarkastelu tehtiin vedyntuotantolaitosten sijainnista. Taulukko 17 esittää vedyntuotantolaitosten eli tässä tapauksessa elektrolyysereiden sijainnin painotukset pohjaskenaariossa sekä eteläpainotteisessa herkkyystarkastelussa. Eteläpainotteinen herkkyystarkastelu vastaa tilannetta, jossa sähköteholtaan noin 5 GW elektrolyyserikapasiteettia on siirretty Keski-Suomen poikkileikkauksen eteläpuolelle pohjaskenaarioon verrattuna.

Kuva 15 näyttää, että vedyntuotantolaitosten sijainnilla on suuri vaikutus sähkön siirtotarpeeseen. Mikäli vedyntuotannon sähkönkulutus painottuu pohjaskenaarion oletuksia voimakkaammin Etelä-Suomeen, sähkön huippusiirtotarve Keski-Suomen poikkileikkauksen yli kasvaa noin 4 GW ja yhteensä yli 21 GW tasolle. Tämä edellyttäisi karkean arvion mukaan neljää uutta pohjois-eteläsuuntaista siirtoyhteyttä pohjaskenaariossa tunnistettujen mittavien vahvistustarpeiden lisäksi.



Kuva 15 Vedyntuotanto-laitosten sijainnin vaikutus Keski-Suomen poikkileikkauksen siirtotarpeeseen

Sijainti suhteessa Keski-Suomen poikkileikkaukseen	Pohjaskenaario: Sähköä dataksi	Herkkyystarkastelu: Eteläpainotteinen
Pohjoispuolinen alue	57 %	30 %
Eteläpuolinen alue	43 %	70 %

Taulukko 17 Vedyntuotantolaitosten sijainnin herkkyys-tarkastelut

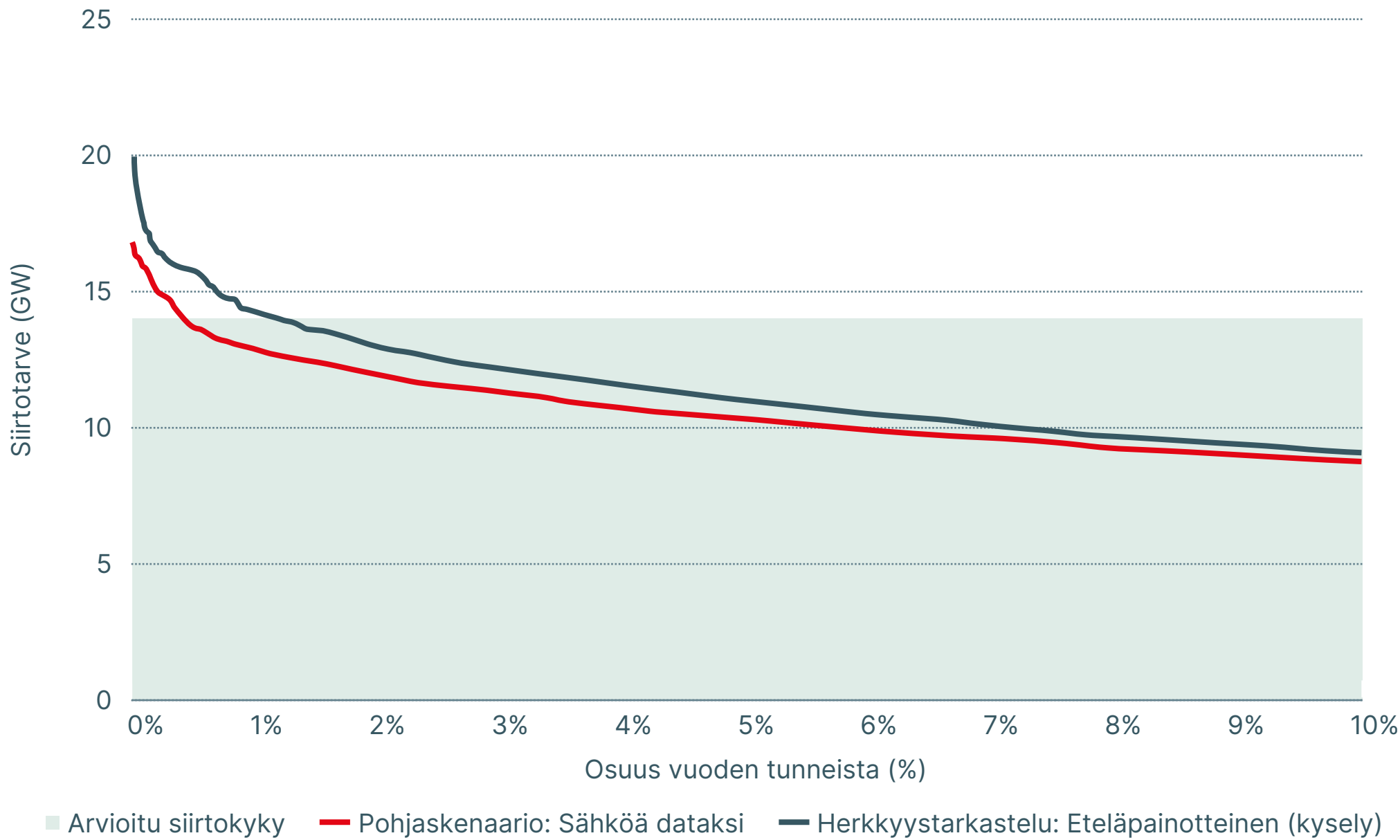
Sähkövarastot

Sähkövarastojen painopiste on Sähköä dataksi -skenaariossa Keski-Suomen poikkileikkauksen pohjoispuolella tuotanto-painotteisella alueella. Tarkemmin ottaen skenaariossa 70 % sähkövarastoista sijaitsee poikkileikkauksen pohjoispuolel-la. Sähkövarastojen sijainnista on tehty herkkyystarkastelu siirtämällä sähkövarastoja etelämmäksi Fingridille tulleiden liittymiskyselyiden suhteessa, jolloin valtaosa sähkövaras-toista sijaitsee Keski-Suomen poikkileikkauksen eteläpuolella.

Kuva 16 näyttää sähkövarastojen sijainnilla olevan merkittä-vä vaikutus siirtotarpeisiin. Sähkövarastojen painottaminen etelään kasvattaa merkittävästi siirtoja Keski-Suomen poik-kileikkauksen yli ja lisäksi heikentää kulutushankkeiden lii-tettävyyttä Etelä-Suomessa. Koska sähkövarastot latautuvat ja purkautuvat tuuli- ja aurinkovoimatuotannon vaihteluiden mukaan, niiden painottaminen tuotantopainotteiselle ja siten ylijäämäiselle alueelle vaikuttaa parhaalta ratkaisulta. Säh-kövarastot olisi kokonaisuuden kannalta järkevää sijoittaa pääosin lähemmäksi sähkön tuotantoa kuin alueita, joille suunnitellaan sähköä käyttäviä investointeja.

Lisäksi sähkövarastojen liittäminen samaan pisteeseen vaih-televan tuuli- ja aurinkovoimatuotannon kanssa tasaisi kan-taverkon siirtoja ja parantaisi niiden liitettävyyttä. Tällöin on huolehdittava liityntäpisteen mitoituksesta ja optimoidusta käytöstä liityntäpisteen kapasiteetti huomioiden. Tuuli- ja au-rinkovoiman yhteissijoittumisen vaikutusta liitettävyyteen sekä akustoliityntöjen vaikutusta kantaverkon siirtojenhallintaan on tutkittu tarkemmin Fingridin teettämissä diplomitöissä¹⁹.

¹⁹ Thermal Capacity Analysis of Regional Transmission Grids for Integrating Renewables in Finland. Nortamo (2023). & Akustoliityntöjen vaikutus kantaverkon siirtojenhallintaan. Väisänen (2024).



Kuva 16 Sähkövarastojen sijainnin vaikutus Keski-Suomen poikkileikkauksen siirtotarpeeseen

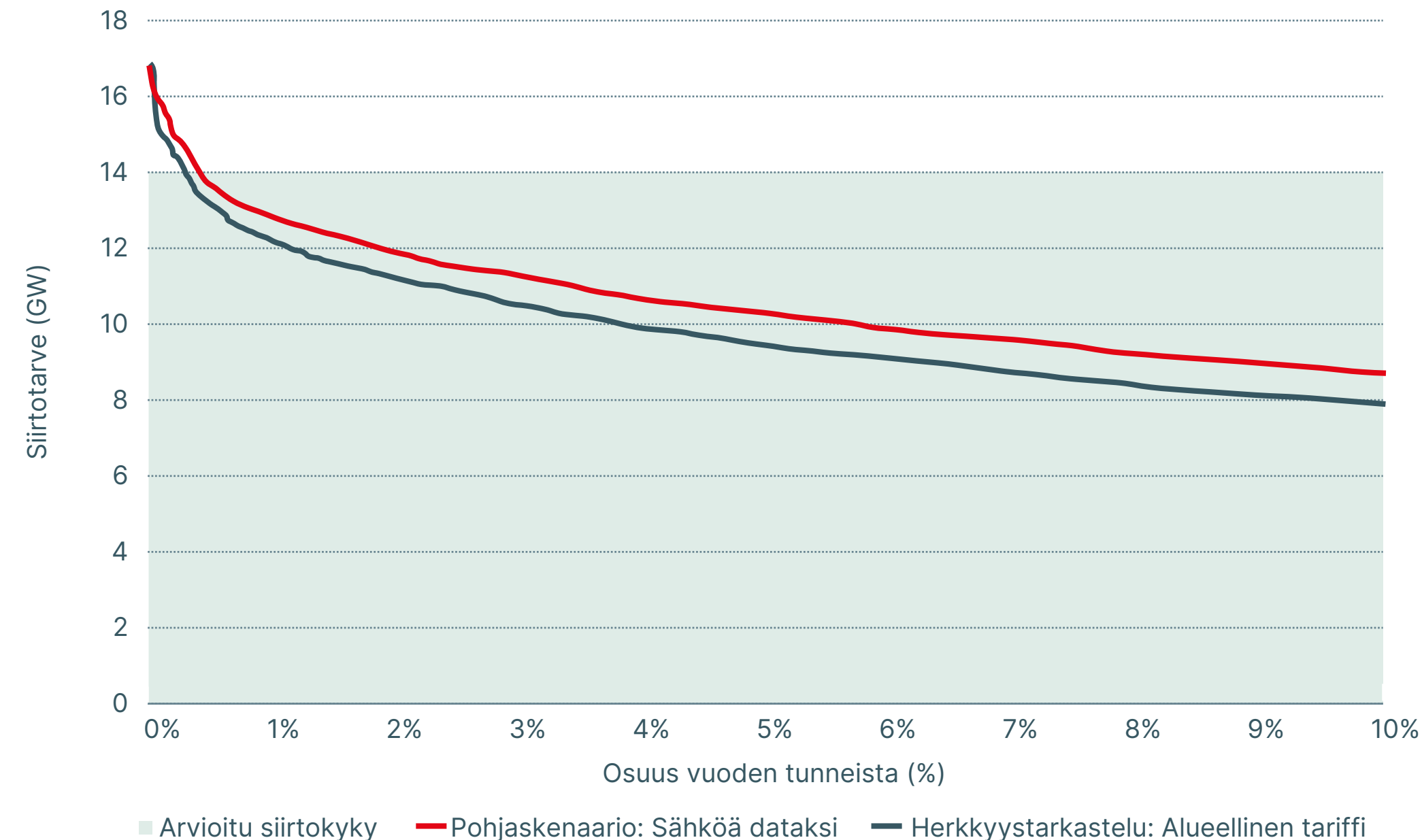
Sijainti suhteessa Keski-Suomen poikkileikkaukseen	Pohjaskenaario: Sähköä dataksi	Herkkyystarkastelu: Eteläpainotteinen (kyselyt)
Pohjoispuolinen alue	70 %	37 %
Eteläpuolinen alue	30 %	63 %

Taulukko 18 Sähkövarastojen sijainnin herkkyystarkastelut

5.3 Alueellisen tuotantotariffin vaikutus

Investointien sijainnin lisäksi on tarkasteltu kuinka siirtoihin vaikuttaisi tariffirakenne, jossa tuotanto pohjoisessa maksaisi enemmän siirrosta kuin etelässä. Tämä herkkyystarkastelu on toteutettu mallissa siten, että tuulivoiman tuotantoa rajoitetaan eri hintatasoilla riippuen sen sijainnista. Käytännössä ylituotantotilanteissa, jolloin sähkön hinta on alhainen, tuotantoa rajoitetaan ensiksi pohjoisessa.

Kuva 17 esittää alueellisen tuotantotariffin vaikutuksen siirtotarpeisiin. Tuloksista havaitaan, että kokonaisuudessaan siirtomäärä pohjois-eteläsuunnassa poikkileikkauksen yli laskee ja siirtokapasiteetin ylittävien siirtotuntien määrä vähenee hieman. Pohjois-eteläsuuntaisen siirron korkeimpiin huippuihin ei yksinkertaisella tuotantotariffin muutoksella kuitenkaan ole juuri vaikutusta, vaan sen lisäksi tarvittaisiin myös muita keinoja siirtohuippujen hallitsemiseen. Alueellinen tuotantotariffi kuitenkin lyhentäisi sähkön siirtomatkoja ja siten myös verkon häviöitä edistämällä kantaverkon tehokasta käyttöä.

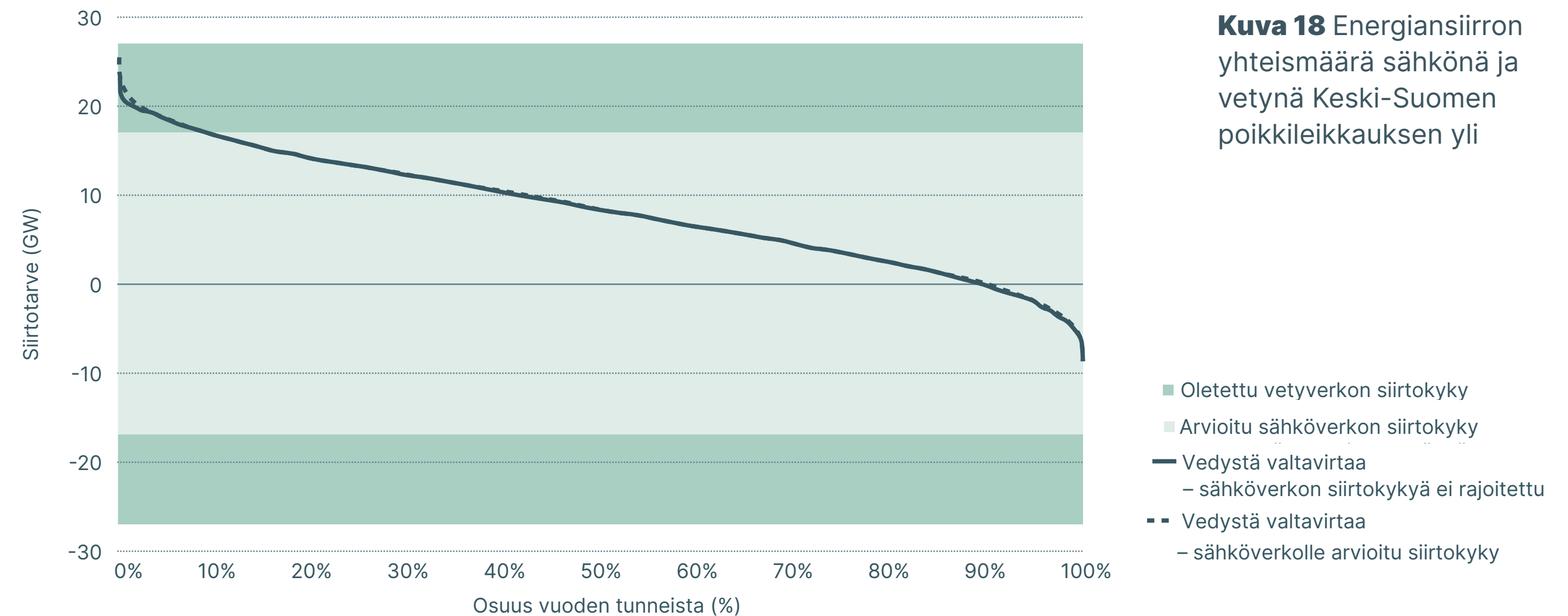


Kuva 17 Alueellisen tuotantotariffin vaikutus Keski-Suomen poikkileikkauksen siirtotarpeeseen

5.4 Sähkö- ja vetyjärjestelmän joustojen vaikutus

Vedystä valtavirtaa -skenaariossa tarkasteltiin, kuinka sähkö- ja vetyverkkoa yhdessä vedyntuotannon joustojen kanssa voidaan hyödyntää tehokkaasti energiansiirron optimoimiseksi. Skenaariosta tehtiin kaksi tarkastelua: toisessa sähköverkon siirtokykyä ei ole rajoitettu, toisessa se vastaa arvioitua siirtokykyä nykyisellä investointitahdilla (luku 3.4). Molemmissa tarkasteluissa skenaariossa on oletettu kapasiteetiltaan suuri vetyverkko²⁰ sekä yhtenevät alueelliset tuotanto- ja kysyntäoletukset sähkölle ja vedylle.

Kuva 18 osoittaa energiansiirron²¹ kokonaismäärän Keski-Suomen poikkileikkauksen yli pysyvän käytännössä samalla tasolla huolimatta sähköverkon siirtokyvyn rajauksesta. Skenaariossa, jossa sähköverkon siirtokykyä on rajattu, saadaan vetyjärjestelmän joustoa ja vedyn putkisiirtoa hyödynnettyä tehokkaasti sähköjärjestelmän rinnalla. Sähkö- ja vetyverkko yhdessä riittävät hyvin kattamaan pohjois-eteläsuuntaiset siirtotarpeet. Tällöin ajoittaisissa sähköverkon pullonkautilanteissa vedyntuotantoa siirretään etelästä pohjoiseen. Siirtokapasiteettia hyödynnetään tehokkaammin, kun energiaa siirretään sähkön lisäksi vetynä pohjoisesta etelän vetyä hyödyntävälle teollisuudelle tai jatkojalostukseen.



Kuva 18 Energiansiirron yhteismäärä sähköä ja vetynä Keski-Suomen poikkileikkauksen yli

Sen sijaan tarkastelussa, jossa sähköverkon siirtokykyä ei ole rajoitettu, energia siirtyy pääosin sähköä pohjoisesta etelään, jolloin sähköverkon kuormitus kasvaa ja vetyverkon ja vedyntuotannon kapasiteettia jää hyödyntämättä. Mikäli sähkö- ja vetyverkon ei käytetä tehokkaasti yhdessä, sähkön siirtohuiput voivat nousta 18 GW tasolle eli noin 5 GW

pohjaskenaariota korkeammaksi. Käytännössä osa luvussa 4.4 tunnistetuista lisävahvistuksista voitaisiin välttää hyödyntämällä sähkö- ja vetyjärjestelmän siirtokykyä ja joustoja tehokkaasti. On tärkeää, että sähkö- ja vetymarkkinoiden mekanismit tukevat yhteiskunnan kokonaisuutta, kuten myös aiemmassa Fingridin ja Gasgridin selvityksessä²² on havaittu.

²⁰ Vetyverkon siirtokvyksi on oletettu 7,2 GW vetynä.

²¹ Siirretty energiamäärä on esitetty sähkötehon suhteessa. Tällöin esitetty siirtotarve = sähkönsiirto + (vedynsiirto / 0.7), jossa 0.7 vastaa elektrolyysereille oletettua 70 % hyötysuhdetta. Vastaavasti oletettu vetyverkon siirtokyky on muutettu vastaamaan siirtoa sähköä vedyntuotantoa varten.

²² Fingrid & Gasgrid: Energian siirtoverkot vetytalouden ja puhtaan energijärjestelmän mahdollistajina - Loppuraportti.pdf <https://www.sttinfo.fi/files/69819787/70052344/34362/fi>

5.5 Toimenpiteet kantaverkon siirto- ja liittämiskyvyn varmistamiseksi

Ensisijaisen tärkeää skenaarioiden toteutumiselle on kantaverkon ennakoiva ja oikea-aikainen kehitys. Taloudellisen sääntelyn tulee mahdollistaa kantaverkon kehitys vastaamaan asiakastarpeisiin. Luvituksen sujuvuudesta tulee pitää huolta niin uusille johtohankkeille kuin myös tuotanto- ja kulutushankkeille, jotta skenaarioissa kuvattu siirtymä kohti puhdasta energiajärjestelmää on toteutettavissa.

Verkkoinvestointien ohella tarvitaan muita toteutettavia toimenpiteitä kantaverkon siirto- ja liittämiskyvyn varmistamiseksi erittäin korkeissa kasvuskenaarioissa. Kasvavat epävarmuudet sähköintensiivisen teollisuuden investointien toteuttamisessa ja erityisesti suurten hankkeiden sijainnissa haastavat verkon kehittämistä. Tässä luvussa esiteltujen toimenpiteiden tehokas käyttö mahdollistaisi useampien asiakashankkeiden liittämisen kantaverkkoon vähemmällä investoinnilla skenaarion edellyttämällä kehitysnopeudella. Kantaverkon tehokkaaksi hyödyntämiseksi olisi tärkeää pystyä tekemään toimenpiteitä sekä sijainnin ohjaamiseksi että siirtotarpeita helpottavien joustojen aikaansaamiseksi.

Uusia kulutushankkeita tulisi mahdollisuuksien mukaan ohjata tuotantopainotteiselle alueelle siltä osin, kun tätä ei rajoita esimerkiksi muu infrastruktuuri, työvoiman saatavuus sekä jo olemassa oleva teollisuuden tai asiakkaiden sijainti. Ensisijai-

sen tärkeää on ylläpitää hyvää keskusteluyhteyttä Fingridin ja asiakkaiden välillä liittymismahdollisuuksista²³, mikä voi myös osaltaan toimia ohjaavana tekijänä ja nopeuttaa verkkoliittymän saatavuutta.

Sijainnin ohjaamiseen kannusteena voisi toimia alueellinen liittymismaksu, mikä olisi edullisempi tuotantopainotteisella alueella kulutushankkeille ja vastaavasti kulutuspainotteisella alueella tuotantohankkeille. Hybridiliittymät, joissa saman liityntäpisteen takana olisi sekä tuotantoa että kulutusta, vähentävät myös kantaverkkoon näkyvää vaikutusta ja tehostavat sen käyttöä, jolloin myös liittämismahdollisuudet paranevat. Tämän lisäksi kulutushankkeiden liitettävyyttä voitaisiin parantaa määrittelemällä rajattu määrä teollisuuskeskittymiä, joiden vaatimia laajoja verkkoinvestointeja voisi helpommin toteuttaa etupainotteisesti. Tällöin verkkoinvestoinnin toteutus olisi riskittömämpää, sillä ne eivät olisi esimerkiksi yhden suuren hankkeen toteutumisesta kiinni.

Joustoja on tulossa sähköjärjestelmään ja niitä tarvitaan kasvavissa määrin myös siirtotarpeiden hallintaan. Osana ratkaisua voisivat toimia Fingridin ja asiakkaiden väliset joustavat liittymät. Joustavissa liittymäissä asiakas hyväksyy ajoittaiset rajoitukset siirrossa ennalta sovituin ehdoin, millä voitaisiin varmistaa jouston saatavuus verkon kannalta

haastavissa tilanteissa. Joustavilla liittymillä voitaisiin mahdollistaa asiakkaiden liittäminen ennen verkkovahvistuksien valmistumista tai jopa pysyvänä ratkaisuna, jolloin voitaisiin välttää verkkoinvestointeja, millä varaudutaan hyvin epätoennäköisiin vika- ja siirtotilanteiden yhdistelmiin.

Mikäli verkkoon pääsee muodostumaan pullonkauloja, on myös mahdollista hankkia siirtohuipuissa tarvittavat joustot ajojärjestyksen uudelleenmäärittelyllä²⁴. Tämä kuitenkin vaatii, että soveltuvia resursseja joustoon on saatavilla oikeissa kohdissa verkkoa, ja nykyisinkin haasteena on löytää tarvittava määrä ylössäätokykyä etelästä. Skenaarioissa ei ole arvioitu joustavan kapasiteetin saatavuutta vastakauppatarpeisiin. Vastakaupan toteutettavuuteen liittyy merkittäviä epävarmuuksia erityisesti verkon kannalta haastavimmissa herkkyytstarkasteluissa ja se voi osoittautua kalliiksi ratkaisuksi, etenkin mikäli soveltuvia resursseja on rajattu määrä. Äärimmäisessä tapauksessa merkittävät pullonkaulat voivat johtaa eurooppalaisen regulaattorin päätökseen Suomen tarjousaluerakenteen tarkastelusta. Esimerkiksi Saksassa ja Ruotsissa on viime vuosina selvitetty uuden tarjousaluejaon mahdollisuutta²⁵. Fingridin tavoitteena on ratkaista haasteet ennakoivasti ja oikea-aikaisesti sekä verkko- että joustoratkaisuilla pitäen Suomi yhtenä tarjousalueena. Tähän tarvitaan tiivistä yhteistyötä niin Fingridin ja asiakkaiden välillä kuin myös laajemmin kansallista tahtotilaa ja hyvää yhteistyötä viranomaisilta.

²³ Fingrid myös ylläpitää liityntämahdollisuuksien tarkasteluun verkkokiikaria, joka tarjoaa suuntaa-antavaa tietoa kantaverkon liityntämahdollisuuksista eri aikajaksoilla. [Tarkastele liityntämahdollisuuksia - Fingrid](#)

²⁴ Ajojärjestyksen uudelleenmäärittelyllä tarkoitetaan sähkönsiirtojen hallintaan tehtyjä erikoissääntöjä, joilla voidaan hoitaa verkon lyhytaikaisia pullonkauloja.

²⁵ ENTSO-E (2025). Bidding Zone Review of the 2025 Target Year. Saatavilla: [ENTSO-E](#)

6

Muut skenaarioiden toteutumisen edellytykset

Fingrid hyödyntää skenaarioita työssään ymmärtääkseen paremmin muuttuvaa toimintaympäristöä ja varmistaakseen, että se voi omalta osaltaan mahdollistaa myös kunnianhimoisimpien skenaarioiden toteutumisen. Energiamurros koskettaa kuitenkin koko energiasektoria, ja toivomme, että skenaariot tarjoavat hyötyä laajasti kaikille alan toimijoille tukien oman toimialan tulevaisuuden kehitystarpeiden arviointia.

Toivomme, että keskustelu Suomen kilpailukyvyn edellytyksistä ja sähkömarkkinoiden kehityksestä jatkuu energia-alalla ja johtaa konkreettisiin toimiin, joiden avulla sähköjärjestelmän mittava muutos voidaan toteuttaa. Pelkästään kantaverkon vahvistaminen ja sen tehokas hyödyntäminen eivät riitä skenaarioiden toteutumiseen. Alla on esitetty keskeisiä teemoja, jotka nousivat esiin skenaariotyössä ja jotka ovat ratkaisevia koko Suomen energiajärjestelmän kehityksen kannalta.



6.1 Yhteenveto

Suomella on vahva kilpailuetu sähköintensiivisen teollisuuden investointien houkuttelussa, perustuen puhtaan ja edullisen sähkön saatavuuteen sekä monipuoliseen tuotantorakentamiseen. Maatuulivoiman potentiaali on erityisen suuri, ja sen kustannuskilpailukyky tukee investointien vetovoimaa. Sähkön hintataso pysyy kilpailukykyisenä kaikissa tarkastelluissa skenaarioissa, mutta sen edullisuus ja vakaus riippuvat tuotannon lisärakentamispotentiaalista sekä kulutuksen joustavuudesta.

Skenaariot osoittavat, että joustava kulutus mahdollistaa edullisemman ja tasaisemman hintatason, kun taas joustamaton kulutus lisää hintavaihtelua ja nostaa keskihintaa. Investointien näkökulmasta suurimmat kysyntä- ja tuotantoinvestoinnit toteutuvat skenaarioissa, joissa sähkön kulutus kasvaa voimakkaasti ja tuotantoa voidaan lisätä kustannustehokkaasti. Erityisesti datakeskukset ja vetyteollisuus korostuvat investointikohteina.

Sähkön riittävyys ja sähköjärjestelmän tasapainon ylläpitäminen edellyttävät joustoa sekä tuotanto- että kulutuspuolella. Kulutusjousto, energian varastointi ja älykäs sähköautojen lataus ovat keskeisiä keinoja vastata sääriippuvan tuotannon vaihteluihin. Markkinoiden rooli korostuu investointien ohjaisessa, mutta epävarmuus voi hidastaa päätöksentekoa. Tarvittaessa voidaan harkita myös kapasiteetin tukemista, joilla varmistetaan sähkön riittävyys myös epäsuotuisissa kehityskuluissa tai pienellä todennäköisyydellä tapahtuvissa tilanteissa.



6.2 Kilpailukyky

Suomen kilpailuetu: puhtaan ja edullisen sähkön saatavuus

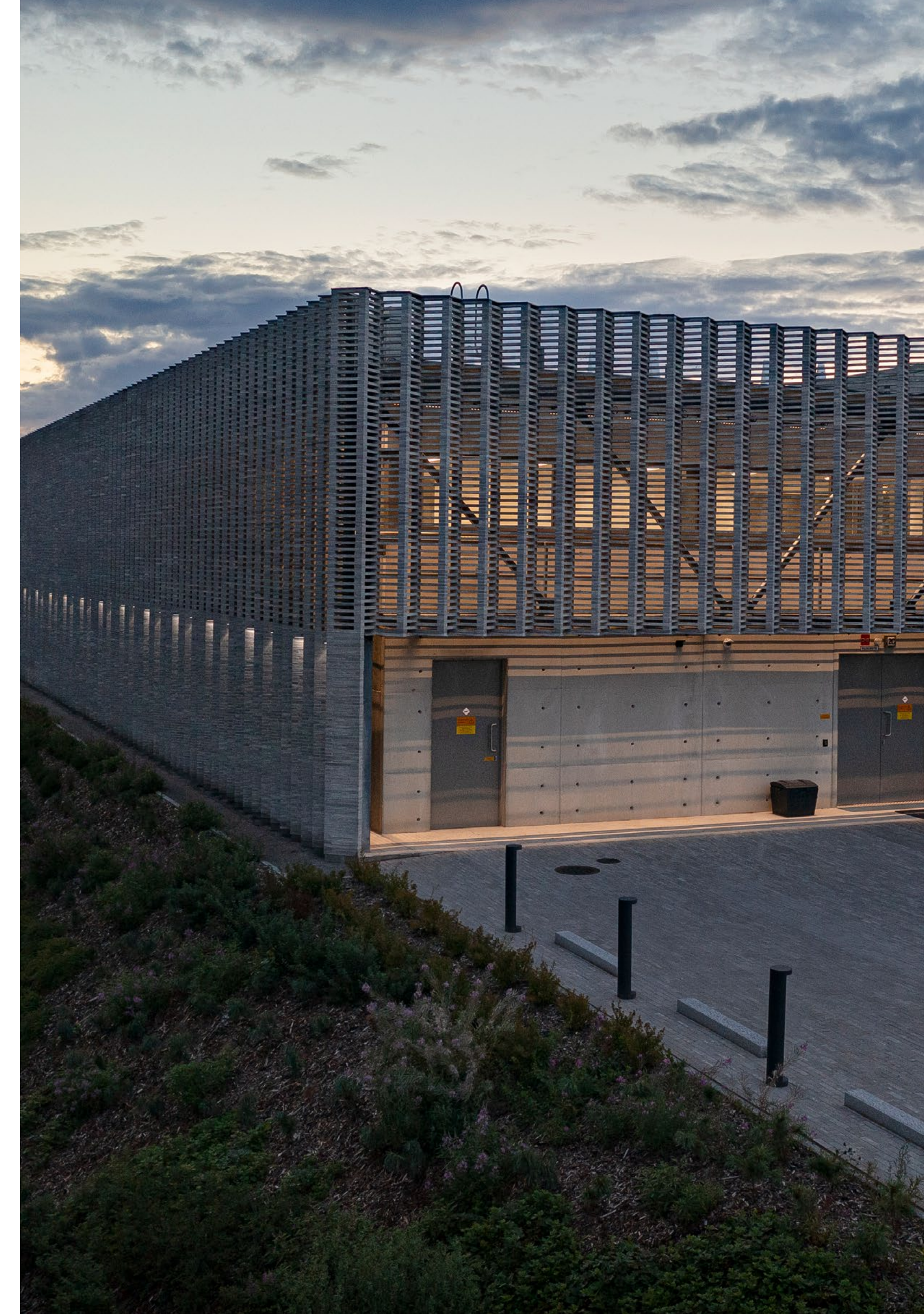
Puhtaan sähkön hinta ja saatavuus ovat keskeisiä sähköintensiivisen teollisuuden toimintaympäristöön tulevaisuudessa vaikuttavia tekijöitä. Lisäksi sähkön siirron ja jakelun korkea toimitusvarmuus on edellytys sähkön kulutukselle ja tuotannolle. Erittäin korkean tuuli- ja aurinkovoimapotentialinsa vuoksi Suomella on erinomaiset edellytykset menestyä kilpailussa toimialan investoinneista. Vuoden 2025 alussa Fingrid on saanut lähes 400 000 MW:n edestä kyselyitä liittää sähköntuotantoa kantaverkkoon. Noin puolet hankkeista on maatuulivoimaa, jonka kustannuskilpailukyky on erinomainen. Myös aurinkovoiman potentiaali Suomessa on merkittävä, etenkin käytettävissä olevan maapinta-alan näkökulmasta. Näiden lisäksi pohjoismainen vesivoima, ydinvoima ja bioenergia ovat resursseja, joita kaikilla Suomen kilpailijamailla ei ole käytössä.

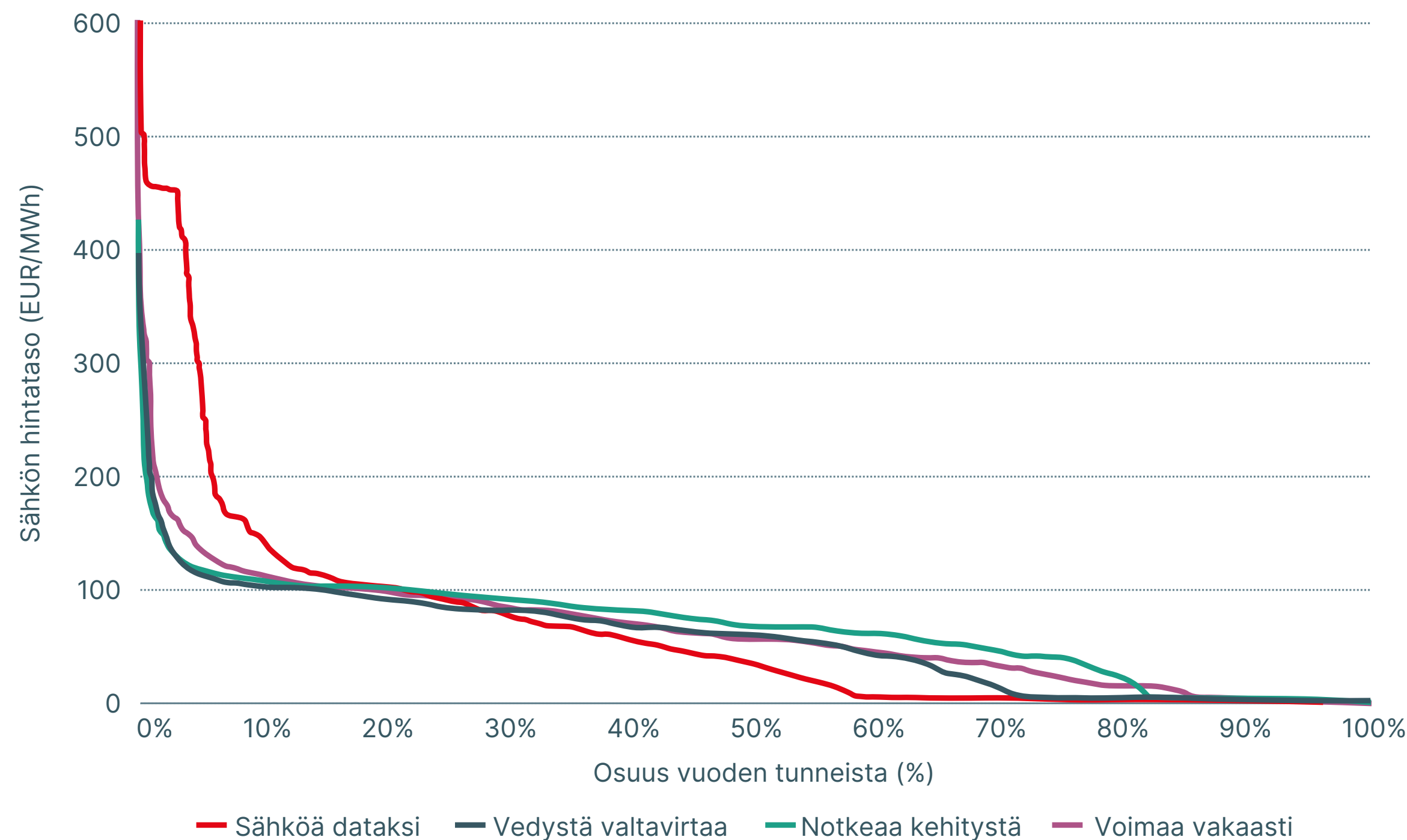
Vastaavasti monissa Keski-Euroopan maissa maatuulivoiman lisärakentaminen on hankalaa, vesivoiman osuus on matala ja ydinvoima on saatettu sulkea kategorisesti ulos sähköjärjestelmästä. Lisäksi fossiilisen tuotannon osuus sähkö- ja energiajärjestelmässä on monessa Euroopan maassa olennaisesti Suomea suurempi, jolloin uusiutuvan tuotannon rakentamisesta suurempi osa menee tämän osuuden korvaamiseen.

Sähkön hintataso

Suomella on erinomaiset edellytykset lisätä puhtaan ja edullisen sähkön tuotantoa siten, että sähkön hinta säilyy kilpailukykyisenä myös kulutuksen kasvaessa merkittävästi. Tämä on ratkaisevaa teollisille toimijoille, jotka suunnittelevat pitkäjänteisiä ja strategisia miljardi-investointeja. Hankkeiden sijoittuminen Suomeen edellyttää näkymää puhtaan ja edullisen sähkön riittävästä saatavuudesta pitkälle tulevaisuuteen. Toisin sanoen tuotannon ja kulutuksen täytyy kasvaa yhtäaikaaisesti pitäen sähkön hinnan kilpailukykyisenä, sillä muutoin kasvunäkymät eivät ole realistisia. Skenaario, jossa sähköntuotantoa ei saada lisättyä ja kulutus kasvaisi, johtaen kalliiseen sähkön hintaan, ei ole realistinen.

Järjestelmävision skenaarioissa sähkön kulutuksen kasvu on riippuvaista kilpailukykyisestä sähkön hinnasta, minkä mahdollistajana edullinen sähköntuotanto toimii. Joustoratkaisut puolestaan määrittävät, miten hyvin edullista sään mukaan vaihtelevaa tuotantoa voidaan hyödyntää. Siten skenaarioissa sähkön hintataso on riippuvainen sähköntuotannon lisärakentamismahdollisuuksista sekä joustavuudesta, jota täytyy saada joko tuotanto- tai kulutuspuolelta. Kuva 19 esittää skenaarioiden sähkön hintatason pysyvyysskäyränä korkeimmasta hintatasosta edullisimpaan hintatasoon.





Kuva 19 Skenaarioiden sähkön hintatason pystyvyyskäyrä²⁶

²⁶ Huomiona, että Sähköä dataksi ja Voimaa vakaasti -skenaarioiden hintatason pystyvyyskäyrät eivät sisällä skenaarioissa oletettujen sähköntuotannon tukien kustannuksia. Lisätietoa oletetuista kustannuksista on ydinvoiman osalta tässä luvussa ja huippuvoiman osalta seuraavassa luvussa.

Korkeamman kasvun skenaarioissa sähkön hintataso on kaikista kilpailukykyisin. Näissä yhdistyvät erityisesti maatuulivoiman merkittävä lisärakentaminen, mikä mahdollistaa sähkön tuottamisen edullisesti.

Vedystä valtavirtaa -skenaariossa joustava sähkönkulutus mahdollistaa vaihtelevan tuotannon tehokkaan hyödyntämisen. Toisaalta on hyvä huomioda, että Vedystä valtavirtaa -skenaariion kulutusjousto vaatii myös omat investointinsa, mistä aiheutuvat kustannukset eivät täysin heijastu mallinnettuun sähkön hintatasoon.

Sähköä dataksi -skenaariossa tukeudutaan maltillisemman kulutusjouston vuoksi erityisesti sähkövarastoihin ja pumppuvoimoihin. Suhteessa pidempikestoiseen kulutusjoustoon tämä hankaloittaa vaihtelevan tuotannon hyödyntämistä, mikä näkyy suurempana hintavolatiliteettina Vedystä valtavirtaa -skenaarioon nähden. Skenaariossa tarvitaan myös eniten uutta huippuvoimaa, mikä saattaa tarvita tukea toteutuakseen.

Maltillisemman kasvun skenaariot eivät ole kilpailukyvyltään samalla tasolla korkeampien kasvuskenaarioiden kanssa. Selittävänä tekijänä tälle on erityisesti skenaarioiden rajallisempi puhtaan ja edullisen uusiutuvan tuotannon kasvupotentiaali, mikä heikentää näkymiä edullisen sähkön saatavuudesta.

Notkeaa kehitystä -skenaariossa investoinnit suuntautuvat merituulivoimaan, mikä on kustannuksiltaan maatuulivoimaa kalliimpaa. Kulutuksen jousto auttaa tasapainottamaan tuotantoa ja kulutusta, mikä vähentää hintapiikkejä ja laskee keskihintaa.

Voimaa vakaasti -skenaariossa sähkön hintataso on skenaarioista korkein, vaikka sähkön kulutuksen kasvu on matalinta. Tätä selittävät rajallisin uusiutuvien kasvu sekä uuden kulutuksen joustamattomuus. Skenaariossa rakennettavat uudet ydinvoimalaitosyksiköt eivät näyttäydy markkinaehtoisesti kannattavalta, joten niiden on oletettu vaativan tukijärjestelyn. Taustaoletuksena investoinnit on mahdollistettu sähkön käyttäjiltä perittävän tuotantotuen avulla, joka tuo kokoluokaltaan 10 €/MWh lisäkustannuksen sähkön hintaan²⁷.

Kaikissa skenaarioissa sähkön hinta Suomessa on Euroopan edullisimpien joukossa, mutta kilpailuetu kapenee, jos edullisen tuotannon lisärakentaminen on rajallista. Kulutuksen joustamattomuus heikentää kilpailukykyä erityisesti, jos oletetaan sen olevan ongelma vain Suomessa. Todennäköisesti joustamattomuus koskee myös muita maita, jolloin hintapiikit ja volatiliteetti olisivat yleisiä koko Euroopassa. Esimerkiksi mikäli joustamaton kulutusinvestointi tehtäisiin Ruotsiin, se nostaisi Ruotsin hintavolatiliteettia ja vaikutukset näkyisivät todennäköisesti myös Suomessa.

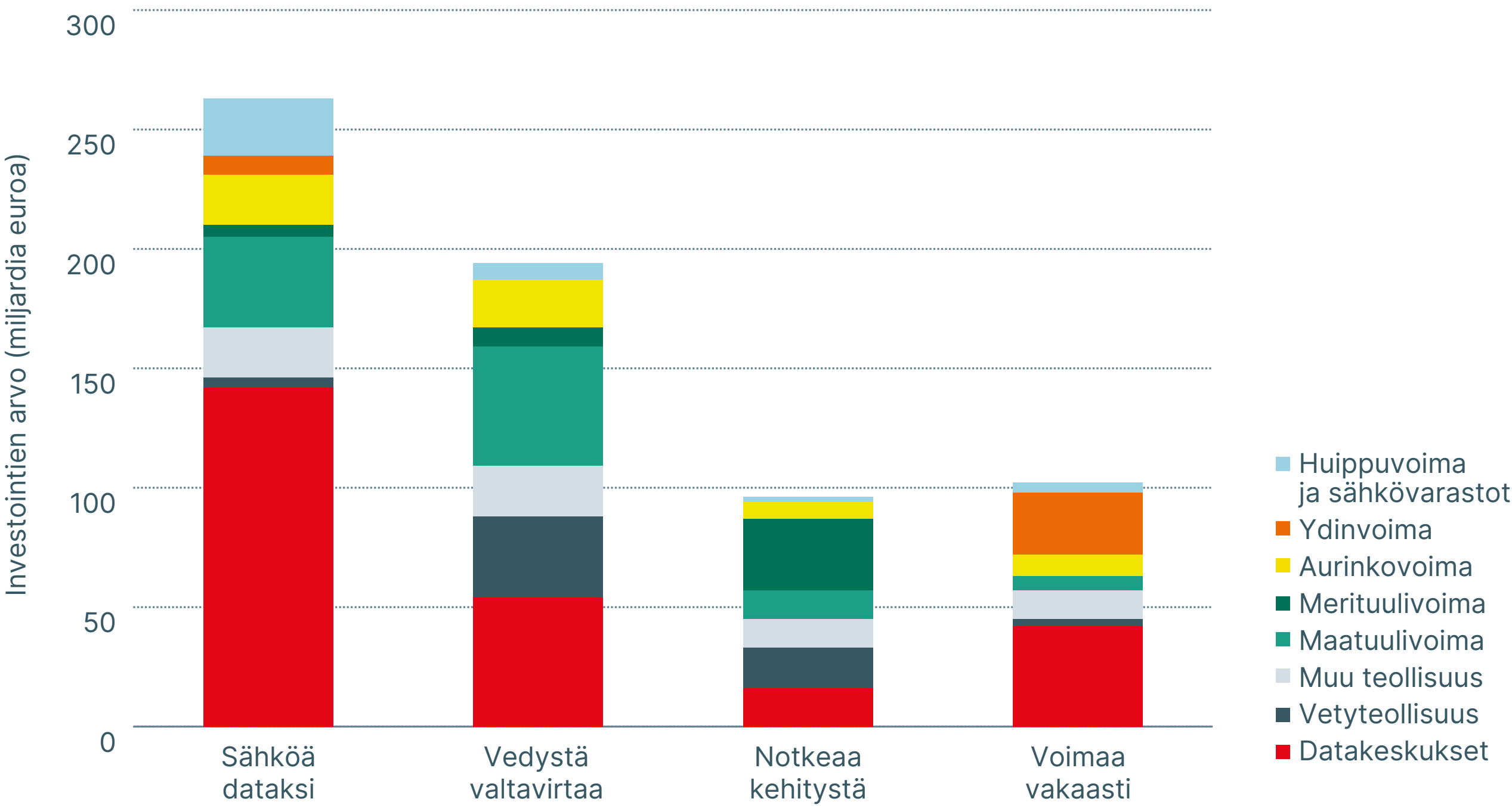
²⁷ Ydinvoiman tarvitsema vuosituotto on NVE:n kustannusdatan (<https://www.nve.no/energi/analyser-og-statistikk/kostnader-for-kraftproduksjon/>, viitattu 4.9.2025) perusteella 1026 M€/GW. Skenaariossa uudet ydinvoimalayksiköt (2 x 1,3 GW) saavat vuosittain markkinoilta tuottoa alle puolet tästä. Loppuosa investoinnin tarvitsemasta tuotosta on oletettu rahoitettavan sähkön käyttäjien maksamalla tuotantotuella, joka jaettuna skenaarion 139 TWh kulutuksella asettuu noin 10 €/MWh tasolle.



Mahdollistetut investoinnit

Kantaverkkoinvestointeja toteutetaan yhteiskunnan ja asiakkaiden tarpeeseen ja siten kantaverkon kehitys mahdollistaa uusia investointeja. Kuva 20 havainnollistaa skenaarioissa mahdollistettujen investointien suuruusluokkaa. Arvio sisältää investoinnit sähköntuotantoon ja -varastointiin sekä sähköintensiiviseen teollisuuteen, mukaan lukien teollisuuden sähköistyshankkeisiin²⁸. Arviossa on huomioitava, että erityisesti sähköintensiivisen teollisuuden investointien osalta käytetyt yksikkökustannukset ovat suuntaa antavia²⁹.

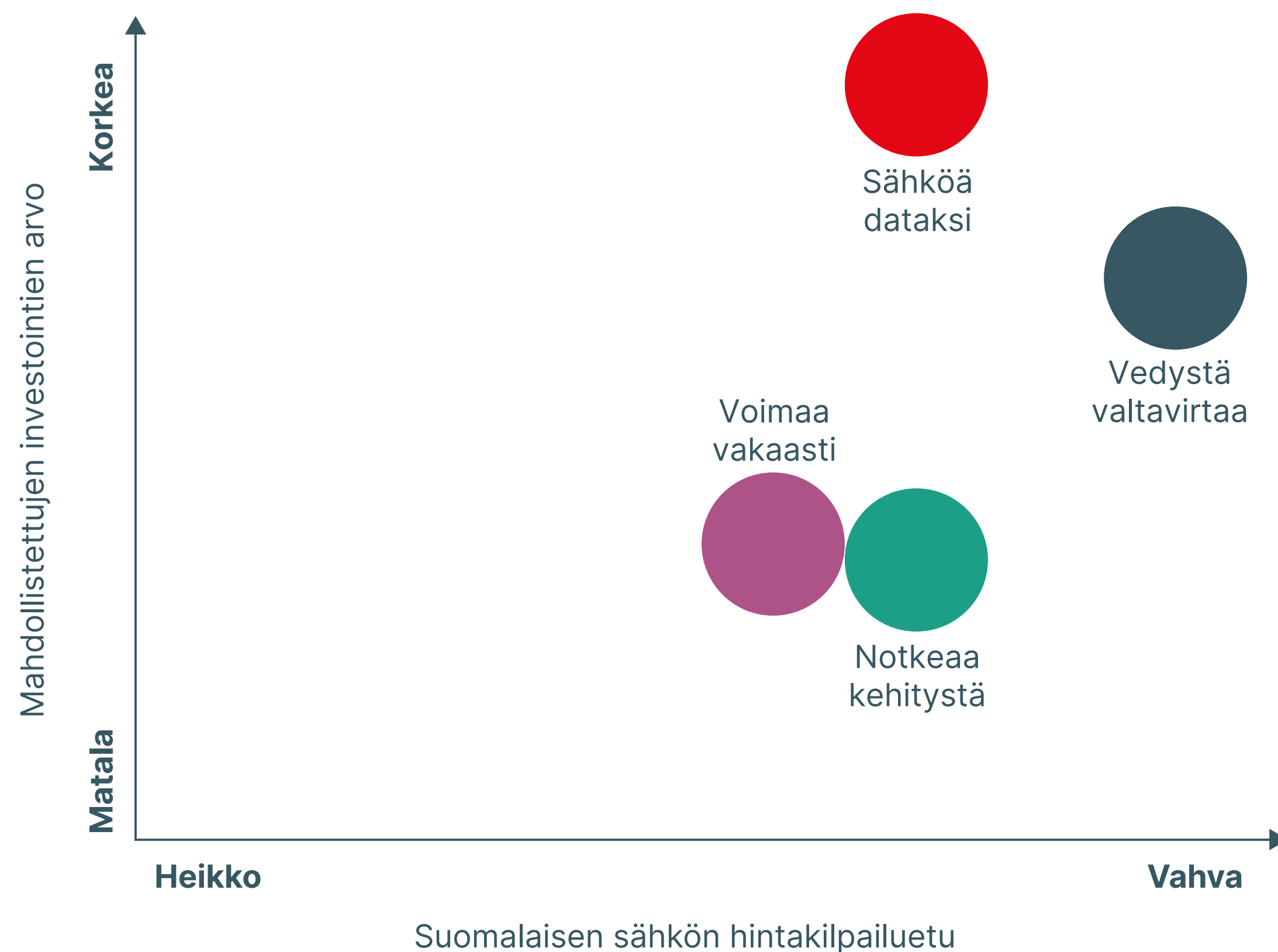
Korkeamman kasvun skenaarioissa mahdollistetut investoinnit ovat 200–250 miljardin euron kokoluokkaa. Sähköä dataksi -skenaariossa investointien kokonaisarvo on korkein, mitä selittävät erityisesti kysyntäpuolen yli 150 miljardin investoinnit valtaosan koostuessa datakeskuksista. Vedystä valtavirtaa -skenaariossa kysyntäinvestointien arvo on myös yli 100 miljardia euroa vety- ja sähköpolttoainehankkeiden sekä datakeskusten vetämänä. Molemmissa skenaarioissa sähkön tuotanto- ja varastoinvestoinnit ovat lisäksi 80–100 miljardin luokkaa. Sähköä dataksi -skenaariossa kokonaisarvoa kasvattaa erityisesti sähkövarastoinvestoinnit.



Kuva 20 Arvio skenaarioissa mahdollistettujen investointien arvosta

²⁸ Arvio ei sisällä teollisuuden käyttö- ja korvausinvestointeja, lämmityksen ja liikenteen sähköistymisen investointeja, sähkön kanta- ja jakeluverkkoinvestointeja eikä vetyverkkoinvestointeja.

²⁹ Esimerkiksi datakeskusinvestointien arvoon liittyy huomattavaa epävarmuutta datakeskustyyppistä ja prosessorien huomioinnista investointikustannuksissa. Laskelmassa on käytetty keskimääristä 12 MEUR/MW datakeskusten investointikustannusta vuosille 2025–2040, kun tällä hetkellä kustannusten arvioidaan vaihtelevan välillä 8–20+ MEUR/MW (lähde: <https://thundersaidenergy.com/downloads/data-centers-the-economics>). Vastaavasti muun teollisuuden osalta investointikustannuksena on toimialasta riippuen käytetty 4–10 MEUR/MW. Sähkön tuotannon osalta oletukset investointikustannuksista on esitetty raportin liitteessä.



Maltillisemman kasvun skenaarioissa mahdollistetut investoinnit ovat 100 miljardin euron kokoluokkaa. Investoinnit jakaantuvat skenaarioissa lähes tasan teollisten kulutushankkeiden ja sähkön tuotanto- ja varastohankkeiden välillä, eli molemmat ovat noin 50 miljardin euron kokoluokkaa. Tässä kokoluokassa huomionarvoisia ovat investoinnit Notkeaa kehitystä -skenaariossa merituulivoimaan ja Voimaa vakaasti -skenaariossa ydinvoimaan. Ylipäättään skenaarioiden pienempi sähkön tuotannon ja kulutuksen kasvu selittää, miksi investoinnit jäävät alhaisemmalle tasolle.

Suomella on poikkeuksellisen hyvät edellytykset houkutella sähköintensiivisen teollisuuden investointeja, ja samalla mahdollistaa edullinen sähkön hintataso. Kuva 21 havainnollistaa skenaarioissa mahdollistettujen investointien arvoa suhteessa sähkön hintaan. Sähkön edullinen hinta ei ole vain toivottava tavoite, vaan välttämätön edellytys uusien investointien toteutumiselle. Suomen kilpailukyky perustuu mahdollisuuteen rakentaa lisää sähköntuotantoa alhaisilla tuotantokustannuksilla, mikä puolestaan mahdollistaa investointien vetämän kasvun ja edullisen sähkön hinnan toteutumisen samanaikaisesti. Toisaalta edullinen sähkön hinta ja verkkokapasiteetin saatavuus eivät yksin riitä investointien voittamiseen, vaan investointiedellytyksiin ja kilpailuedun muodostumiseen vaikuttavat useat muutkin tekijät.

Kuva 21 Havainnollistus mahdollistettujen investointien arvon ja sähkön hinnan välisestä suhteesta skenaarioissa

6.3 Sähkön riittävyys ja tehotasapainon hallinta

Yhteiskunta on yhä enemmän riippuvainen keskeytymättömästä sähkönsaannista, mikä edellyttää jatkuvaa tasapainoa sähkön tuotannon ja kulutuksen välillä. Sähkön varma saatavuus on ehdottoman tärkeää investointiympäristölle sekä siten skenaarioiden toteutumiselle. Suomen kilpailuedun perustussa erityisesti sääriippuaiseen tuuli- ja aurinkovoimaan joustolle on kasvava tarve. Perinteisesti joustoa on saatu vesivoimasta ja polttoaineisiin perustuvasta lämpövoimasta, mutta sään mukaan vaihtelevan uusiutuvan tuotannon kasvu ja fossiilisen tuotannon väheneminen lisäävät tarvetta uudelle huippuvoimalle, energian varastoinnille ja kulutusjoustolle.

Lähtökohtaisesti sähköstä on skenaarioissa niukkuutta vain harvoina tunteina ja keskimäärin sähkön hinta pysyy edullisena. Suomen monipuolinen sähköntuotantorakenne, mukaan lukien ydinvoima, vesivoima ja yhteistuotanto tukevat sähkön riittävyyttä. Haasteeksi muodostuvat erityisesti harvoin toistuvat kylmät ja vähätuuliset jaksot, poikkeuksellisen suuret ennustevirheet sekä pienellä todennäköisyydellä tapahtuvat useiden suurten voimalaitosten ja siirtoyhteyksien vikaantumiset. Tämä korostaa tarvetta riittävälle säätökykyiselle kapasiteetille.

Tehotasapainon hallitsemiseksi kaikissa skenaarioissa tarvitaan yhtä lailla joustoa, mutta keskeisenä muuttujana on kulutusjousto: sen kasvu määrittää, onko tasapainotus tuo-

tannon varassa vai ohjautuuko myös kulutus hinnan mukaan. Korkeamman kulutusjouston skenaarioissa erityisesti lämmön ja vedyn varastointi ovat suuressa roolissa. Matalamman kulutusjouston skenaarioissa tarve joustavalle tuotannolle, kuten puhtaita polttoaineita käyttävälle huippuvoimalle ja sähkövarastoille sekä pumppuvoimaloille korostuu.

Sähkön hinnan vaihtelu, joka voimistuu sääriippuvaisen tuotannon yleistyessä, luo kannusteita investoimaan kulutuksen joustokykyyn, energian varastointiin sekä säädettävään huippuvoimaan. Korkeimpien sähkön hintojen välttäminen tuo säästöjä sähkön käyttäjille, mikä kannustaa joustavaan kulutuskäyttäytymiseen hinnan ohjaamana. Kulutuksen kykyä joustaa voidaan nostaa esimerkiksi investoimalla lämpö- tai vetyvarastoon. Uudet investoinnit säädettävään huippuvoimaan lisäävät myös joustokykyä, mutta voivat vaatia tukea toteutuakseen tarvittavissa määrin.



Huippuvoiman tarve

Sähkön riittävyys muodostuu skenaarioissa haasteeksi harvoin ja pienellä todennäköisyydellä toistuvissa tilanteissa. Erityisesti Sähköä dataksi -skenaariossa tarve uudelle huippuvoimalle korostuu korkean kulutuksen kasvun ja vähäisen kulutusjouston myötä. Skenaariossa tarvitaan uutta huippuvoimaa noin 5 GW edestä, jotta sähköä riittää myös harvinaisen kylminä säävuosina³⁰. Vastaavasti Vedystä valtavirtaa -skenaariossa tarvitaan uutta huippuvoimaa, mutta selvästi pienempi määrä.

Kummassakaan korkean kasvun skenaariossa uusi huippuvoima ei ole täysimääräisesti markkinaehtoisesti kannattavaa, jolloin kapasiteetti vaatii tukimekanismin toteutuakseen. Tämä johtuu siitä, että tuotantokustannuksiltaan kalliille huippuvoimalle on tarvetta suhteellisen harvoin. Siten tuotantokustannuksiltaan kalliin huippuvoiman vuorokausimarkkinalta saama tuotto vaihtelee eri vuosien välillä merkittävästi. Sitä kuitenkin tarvitaan sähkön riittävyyden varmistamiseksi esimerkiksi erittäin kylminä ja vähätuulisina jaksoina. Sähköä dataksi -skenaariossa laaditun karkean arvion mukaan tuen suuruus jyvitettyinä sähkön käyttäjien maksettavaksi tuotantotueksi tarkoittaisi noin 1 €/MWh lisäystä sähkön hintaan³¹.

Jouston lähteet

Sähköjärjestelmän kulutuksen ja tuotannon täytyy olla tasapainossa joka hetki, minkä vuoksi sähköjärjestelmässä tarvitaan joustoja tasapainon ylläpitämiseksi. Joustoille on kasvava tarve siirtyessä kohti puhdasta, vaihteleviin uusiutuviin painottuvaa sähköjärjestelmää. Käytännössä joustoja on tällöin saatava sekä tuotanto- että kulutuspuolelta. Skenaarioissa varioitiin erityisesti kulutuksen joustoja, jotta nähdään kuinka eri joustoilla voidaan vastata kasvavaan tarpeeseen. Kuva 22 kuvaa skenaarioittain jouston eri lähteitä ja niistä korkeimmillaan saatavilla olevaa joustomäärää³².

Korkeamman kulutusjouston Vedystä valtavirtaa ja Notkeaa kehitystä -skenaarioissa valtaosa joustomäärästä, karkeasti noin 65–75 %, saadaan kulutuspuolelta. Kulutuspuolella suurin osa joustoista saadaan teollisuudesta ja lämmityksestä. Näissä erityisesti lämmön, vedyn tai vedystä valmistettujen tuotteiden varastointi mahdollistaa pidempikestoisen jouston sähkökattiloille ja elektrolyysereille. Tämän lisäksi tarvetta on kuitenkin myös tuotantopuolen joustoille, joita saadaan erityisesti jo olemassa olevasta vesi- ja lämpövoimasta ja lisäksi Vedystä valtavirtaa -skenaariossa uusista vetyä käyttävistä moottorivoimaloista.



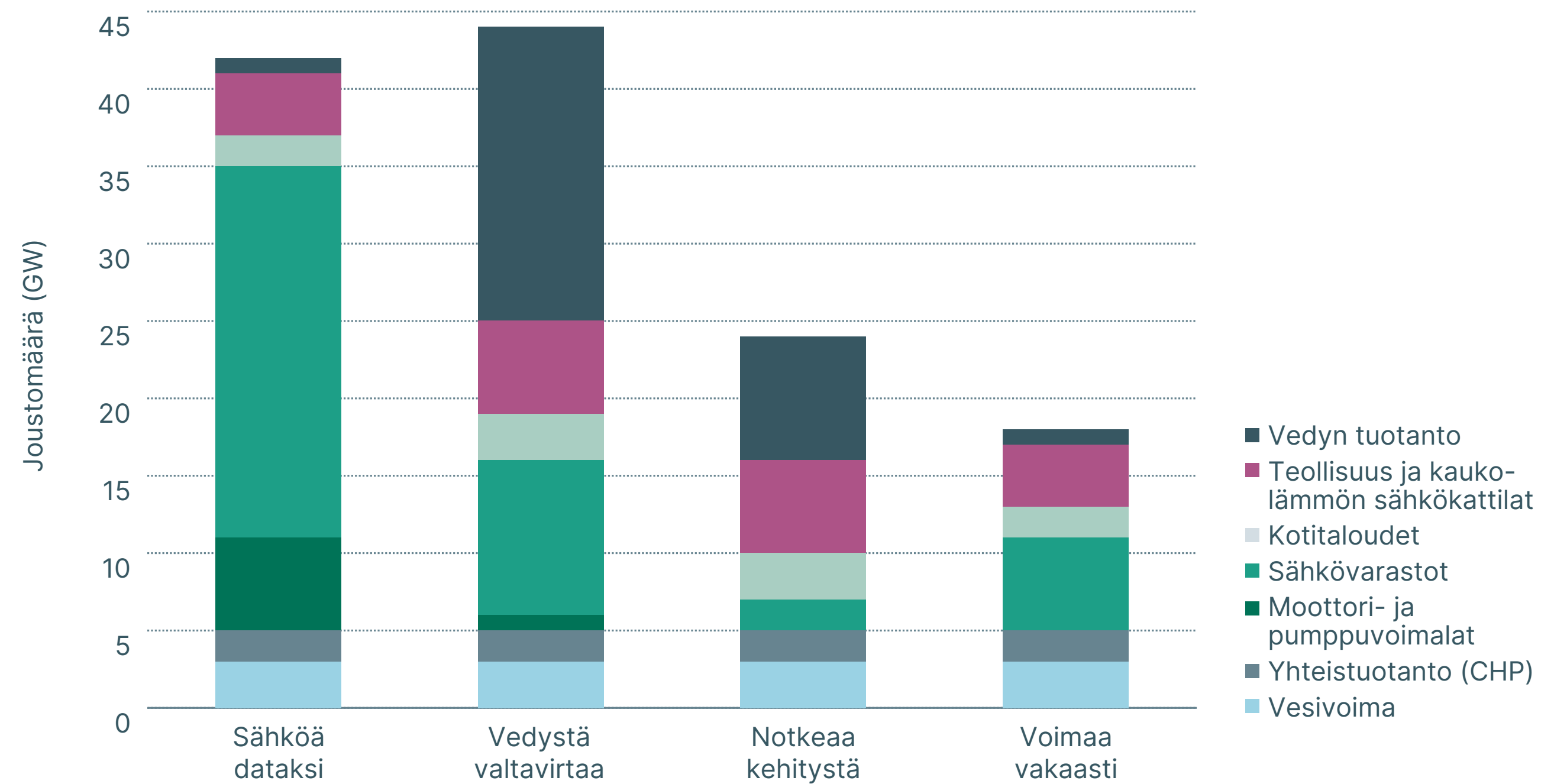
³⁰ Sähköjärjestelmävisiossa ei ole tehty tarkempaa sähkön riittävyydshallinnusta, joka huomioisi voimalaitosten ja siirtoyhteyksien yhtäaikaista vikaantumisia, joita sähköjärjestelmässä tapahtuu pienellä todennäköisyydellä. Tällaisiin tilanteisiin varautumiseksi kapasiteettitarve olisi suurempi.

³¹ Huippuvoiman tuotot painottuivat vahvasti pienelle osalle mallinnuksessa käytetyistä säävuosista ja olivat useimpina vuosina lähellä nollaa. Laskelmissa käytettiin sen vuoksi vuorokausimarkkinalta saatua mediaanituottoa ja verrattiin sitä vaadittuun tuottoon investointikustannusten kattamiseksi. Laskelmissa ei huomioitu tuottoa reserveistä tai muilta markkinoilta, mikä laskisi tarvittavan tuen määrää ja siten kustannusta. Tuki oletettiin maksettavan koko 5,1 GW:lle uutta huippuvoimaa ja jyvitetiin skenaarion 213 TWh sähkön kulutusta vasten. Todellisuudessa osa huippuvoimasta voisi olla myös saatavissa esimerkiksi skenaarion suuren datakeskuskapasiteetin varavoimasta, jolloin kustannukset sähkön käyttäjille olisivat pienemmät. Lisäksi uuden huippuvoiman on oletettu käyttävän puhtaita polttoaineita, mitkä nostavat voimalaitosten tuotantokustannusta ja siten niiden tulot saattavat olla pienemmät kuin mahdollisesti edullisempia polttoaineita käyttävät voimalaitokset.

³² Joustomäärä on laskettu perustuen korkeimpaan mahdolliseen resurssin joustokykyyn. Esimerkiksi kulutusjoustokohteella joustokyky vaihtelee sekä kulutuksen että ajoittaisen joustokyvyn mukaan, mikä voi olla riippuvainen esimerkiksi varaston täyttöasteesta. Vastaavasti joustavalla tuotantokohteella voi olla esteitä kapasiteetin käytölle esimerkiksi vikaantumisen vuoksi.

Matalamman kulutusjouston Sähköä dataksi ja Voimaa vakaasti -skenaarioissa tuotannon ja sähkövarastojen tarjoamien joustojen rooli korostuu. Sähköä dataksi -skenaariossa niistä saadaan noin 85 % ja Voimaa vakaasti -skenaariossa noin 60 % joustoista. Vesi- ja lämpövoiman lisäksi tasapainoa sähköjärjestelmään tarjoavat uudet sähkövarastot, moottorivoimalat ja pumppuvoimalat. Näitä tarvitaan merkittäviä määriä erityisesti Sähköä dataksi -skenaariossa, jossa yhdistyvät voimakas kulutuksen kasvu ja vähäinen kulutusjouston määrä. Skenaariossa tarvitaan kuitenkin myös kulutusjoustoja ja energian varastointia. Moottorivoimalaitokset hyödyntävät vetyä tai sen johdannaisia, joita täytyy varastoida voimalaitosten ajoa varten. Voimaa vakaasti -skenaariossa joustotarpeet jäävät vähäisemmäksi maltillisemman kulutuksen ja toisaalta vähäisemmän vaihtelevan uusiutuvan tuotannon vuoksi. Skenaariossa korostuvatkin rajasiirtoyhteyksien mahdollistamat joustot.

Taulukko 19 esittää kulutusjouston lähteitä ja niiden ominaisuuksia eri skenaarioissa. Perinteinen teollisuus voi joustaa muutamista tunneista muutamiin päiviin, kun sähkön hinta on korkea. Maltillisemman kulutusjouston skenaarioissa oletettiin, että uusista teollisuushankkeista ei ole saatavissa joustoa. Myöskään datakeskusten ei oleteta joustavan missään skenaarioissa. Vedyn tuotannossa vetyvarastot yhdistettynä vedyn loppukulutusta korkeampaan elektrolyyserikapasiteettiin mahdollistaa joustoa sähkön hinnan mukaan. Joustavissa skenaarioissa suuret vetyvarastot ja vetyverkostot mahdollistavat useammankin päivän jouston. Tämän lisäksi vedyn loppukysynnän eli teollisuuskäytön tai jatkojalostuksen on oletettu joustavan hieman hinnan mukaan.



Kuva 22 Markkinasimuloinneissa huomioidut jouston lähteet ja korkeimmillaan saatavilla oleva joustomäärä skenaarioissa. Ei sisällä V2G-teknologiasta saatavaa joustokykyä.

Lämmitys tarjoaa joustoja sähkökattiloiden, lämpöpumppujen ja kotitalouksien sähkölämmityksen muodossa. Varsinkin joustavissa skenaarioissa iso osa kaukolämmöstä tuotetaan sähköllä, mikä edellyttää lämpövarastoja sähkökattiloiden joustaessa koko tehollaan. Kaukolämmön lämpöpumput hyödyntävät teollisuuden hukkalämpöjä, mutta joustavat vain pienellä osalla kokonaistehostaan. Kotitaloudet voivat taas siirtää omaa kulutustaan muutamilla tunneilla. Liikenne sähköistyy kaikissa skenaarioissa, mutta sen joustokyky vaihtelee skenaarioittain. Korkeamman jouston skenaarioissa älykäs ja kaksisuuntainen lataus kasvattaa jouston määrää, kun taas maltillisemmän jouston skenaarioissa vain pieni osa sähköautoista ladataan älykkäästi.

Taulukko 19
Kulutusjouston lähteet ja ominaisuudet skenaarioissa

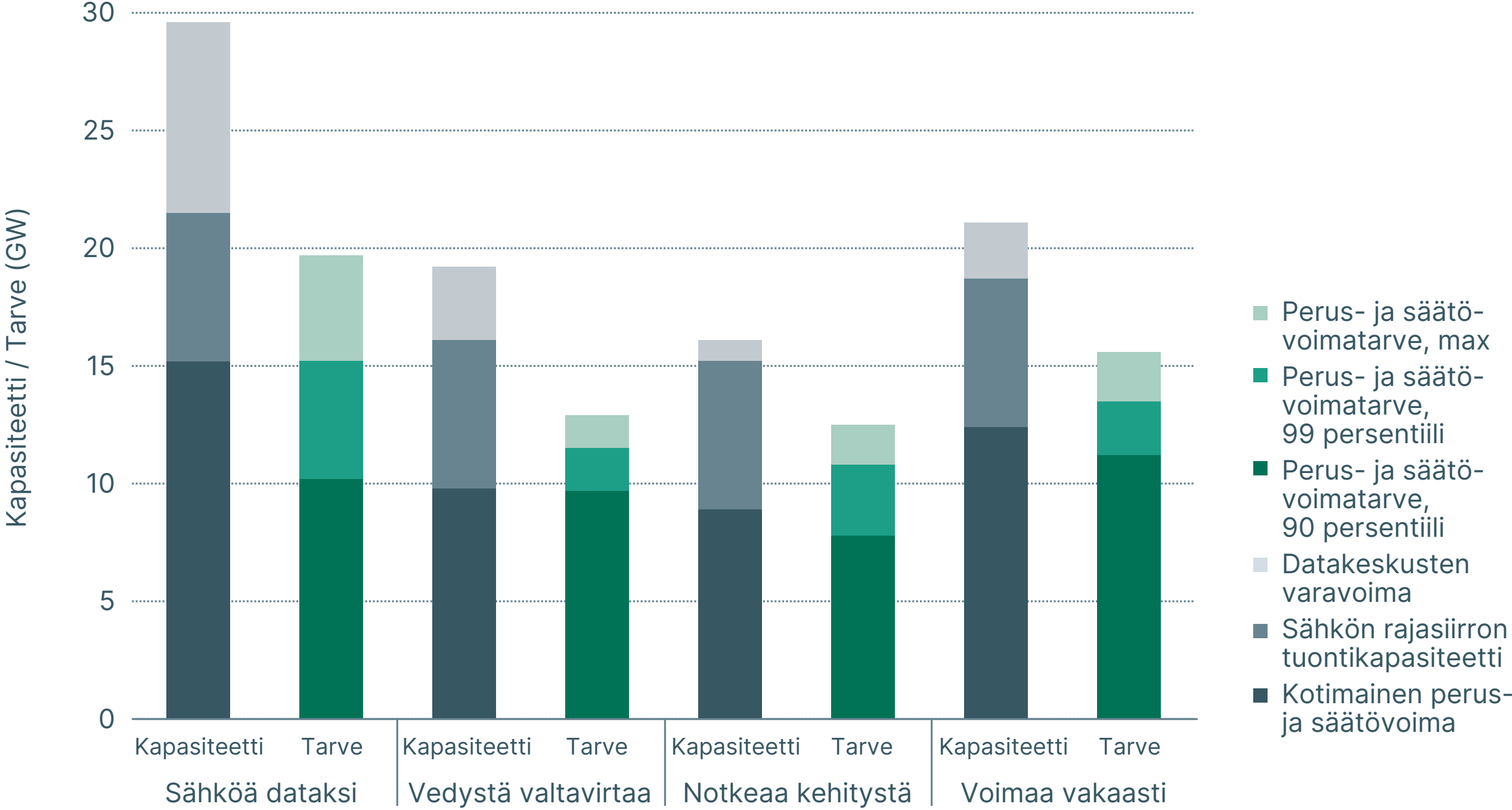
Lähde	Skenaario	Joustava osuus	Joustohinta	Kesto
Perinteinen teollisuus	Sähköä dataksi	16 %	Korkea	Muutamia tunteja – Muutamia päiviä
	Vedystä valtavirtaa	23 %		
	Notkeaa kehitystä	26 %		
	Voimaa vakaasti	21 %		
Vedyn tuotanto	Sähköä dataksi	60 %	Vaihtelee	Muutamia tunteja
	Vedystä valtavirtaa	100 %		Muutamia päiviä
	Notkeaa kehitystä	100 %		Muutamia päiviä
	Voimaa vakaasti	60 %		Muutamia tunteja
Sähkökattilat	Sähköä dataksi	100 %	Matala	Useita päiviä
	Vedystä valtavirtaa			
	Notkeaa kehitystä			
	Voimaa vakaasti			
Lämpöpumput	Sähköä dataksi	30 %	Kohtalainen	Muutamia päiviä
	Vedystä valtavirtaa			
	Notkeaa kehitystä			
	Voimaa vakaasti			
Kotitalouksien sähkölämmitys	Sähköä dataksi	26 %	Vaihtelee	Muutamia tunteja
	Vedystä valtavirtaa	41 %		
	Notkeaa kehitystä	41 %		
	Voimaa vakaasti	26 %		
Sähköautojen lataus	Sähköä dataksi	20 %	Vaihtelee	Muutamia päiviä
	Vedystä valtavirtaa	80 %		
	Notkeaa kehitystä	80 %		
	Voimaa vakaasti	20 %		

Joustokyvyn riittävyys

Koska yksittäisen tunnin kannalta joustavaa tehoa on kaikis-
sa skenaarioissa saatava riittävästi, on järkevää tarkastella
joustoressurssien riittävyyttä myös pitemmällä aikajaksolla.
Tällöin lyhytkestoiset joustot, kuten sähkövarastot, voidaan
sivuuttaa tarkastelusta, koska niiden varastointikyky on tyy-
pillisesti vain joitain tunteja.

Kuva 23 esittää perus- ja säätövoiman kapasiteetin määrää
ja sen tarvetta pidemmällä aikajaksolla eri skenaarioissa.
Tarpeen määrittämiseksi sähkön viikkotason³³ sähkönku-
lutuksesta on vähennetty tuuli- ja aurinkovoimantuotannon
määrä sekä aktivoituneet kulutusjoustot. Tällöin saadaan
kulutus, joka on katettava joko kotimaisella perus- ja säätö-
voimalla eli vesi-, ydin- tai muulla lämpövoimalla tai sähkön
tuonnilla.

³³ Tarkastelussa on 35 säävuodelta 52 viikkoa eli yhteensä 1820 viikkoa.
³⁴ Kapasiteetti esitetty ilman huoltojen vaikutusta. Datakeskusten varavoiman
määrän on oletettu vastaavan datakeskusten keskimääräistä sähkönkulutus-
ta. Varavoiman määrä voi olla keskimääräistä sähkönkulutusta pienempi tai
suurempi riippuen esimerkiksi datakeskuksen käyttötarkoituksesta.



Kuva 23 Pitkäkestoinen perus- ja säätövoiman kapasiteetin määrä sekä tarve eri skenaarioissa³⁴

Skenaarioissa kotimaiset resurssit riittävät kattamaan skenaariosta riippuen noin 90–99 prosenttia viikoista. Korkein osuus on Sähköä dataksi -skenaariossa, mihin vaikuttaa erityisesti huippuvoiman suuri määrä. Toisaalta kapasiteetin tarve on skenaariossa myös erittäin piikkimäinen, sillä korkein 10 % viikoista kasvattaa tarvetta jopa 10 GW. Tämä johtuu skenaarion korkeasta lämmityksen sähköistyksestä, mutta matalasta kulutusjoustosta. Kylminä pakkasjaksoina sähkön lämmityskulutus nousee erittäin korkeaksi, mutta muu sähkönkulutus ei jousta kuten korkeamman kulutusjouston skenaarioissa. Siten kylmien vuosien yksittäisillä viikoilla säätövoiman tarve nousee hyvin korkeaksi. Skenaariossa olisi siksi hyödyllistä saada myös datakeskusten arvioitu varavoimakapasiteetti tarjoamaan joustoa ja siten turvaamaan sähkön riittävyyttä haastavimmissa tilanteissa.

Matalin kotimaisten resurssien kattavuus on Vedystä valtavirtaa -skenaariossa. Tämä johtuu osaltaan siitä, että pitkäkestoiset kulutusjoustot on tarkastelussa huomioitu aktivoitumisen perusteella, jolloin kulutusjoustoissa voi joissain tilanteissa olla vielä ”pelivaraa” siten, että korvattaisiin kotimaista vedyntuotantoa tuontivedyllä. Kaikissa skenaarioissa kotimainen tuotantokapasiteetti ja sähkön rajasiirtokapasiteetti kykenevät yhdessä kattamaan 100 prosenttia aineiston viikoista.

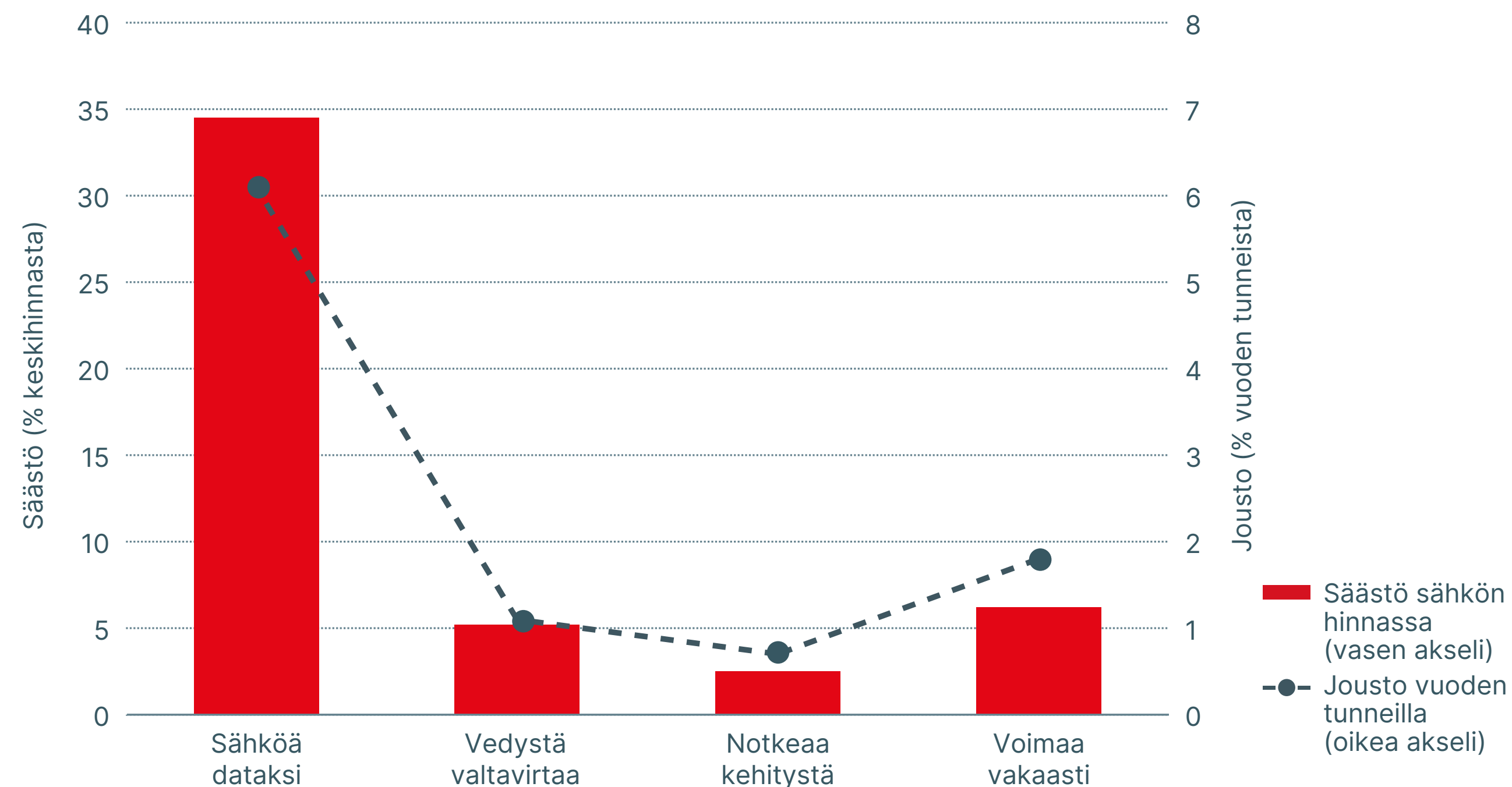
Jouston arvo

Sähkön hintavaihtelu lisää kannusteita investoida kulutuksen joustoon. Skenaarioissa kulutuksen joustavuus oli kuitenkin ennalta asetettu joko korkealle tai matalalle tasolle. Siten kulutusjouston määrää ei joustamattoman kulutuksen skenaarioissa nostettu, vaikka se olisi vaikuttanut erittäin kannattavalta. Käytännössä tämä johti tilanteeseen, jossa erityisesti Sähköä dataksi -skenaariossa kulutusta huippuhinnoilla leikkaava kulutusjousto muodostuu erittäin kannattavaksi.

Kuva 24 havainnollistaa miten sähköä tasaisesti käyttävän kuluttajan³⁵ saavuttama sähkön keskihinta vuorokausimarkkinalla muuttuisi, mikäli kyseinen kuluttaja vähentäisi sähkön käyttönsä nollaan yli 200 EUR/MWh sähkön hinnalla. Sähköä dataksi -skenaariossa näin korkeita hintoja on noin 6 % ajasta, ja joustamalla näillä tunneilla kuluttajan sähkön keskihinta laskee 35 %. Tällöin skenaariossa saavutettu hintataso on kaikista skenaarioista selvästi edullisin. Muissa skenaarioissa sähkön hinta ei ole yhtä korkealla kauan aikaa. Tämän vuoksi esimerkin kuluttaja joustaisi noin 1–2 % ajasta ja saavuttaisi tällä 2–6 % säästöt sähkön keskihinnassa. Matalin hyöty on Notkeaa kehitystä -skenaariossa, jossa on jo valmiiksi korkeat oletukset kulutusjoustosta.

³⁵ Kuluttajan sähkön käyttö olisi siis luonteeltaan täysin tasaista, ilman vaihtelua vuodenajan tai vuorokaudenajan mukaan.





Kuva 24 Jouston arvo kuluttajalle: Esimerkki kulutusjoustosta yli 200 EUR/MWh hintatasolla

Vastaava trendi Sähköä dataksi -skenaarion korkeasta jouston arvosta on havaittavissa myös esimerkiksi sähkökattiloiden saavuttamasta keskihinnasta, joka on olennaisesti edullisempi kuin muissa skenaarioissa. Tätä selittää erityisesti hintatasojen pysyvyyskäyrästä (Kuva 19) nähtävissä olevat edulliset ajanjaksot. Tällöin sähkökattiloita voidaan hyödyntää joustavasti ja lämmön kysyntään vastaamisen lisäksi ladata esimerkiksi kaukolämpöverkkojen lämpövarastoja hetkiä varten, jolloin sähkön hinta on korkeammalla. Toisaalta lyhytaikainen, kulutuksen ajoittamiseen vuorokauden sisällä tähtäävä jousto on suurin piirtein yhtä arvokasta kaikissa skenaarioissa.

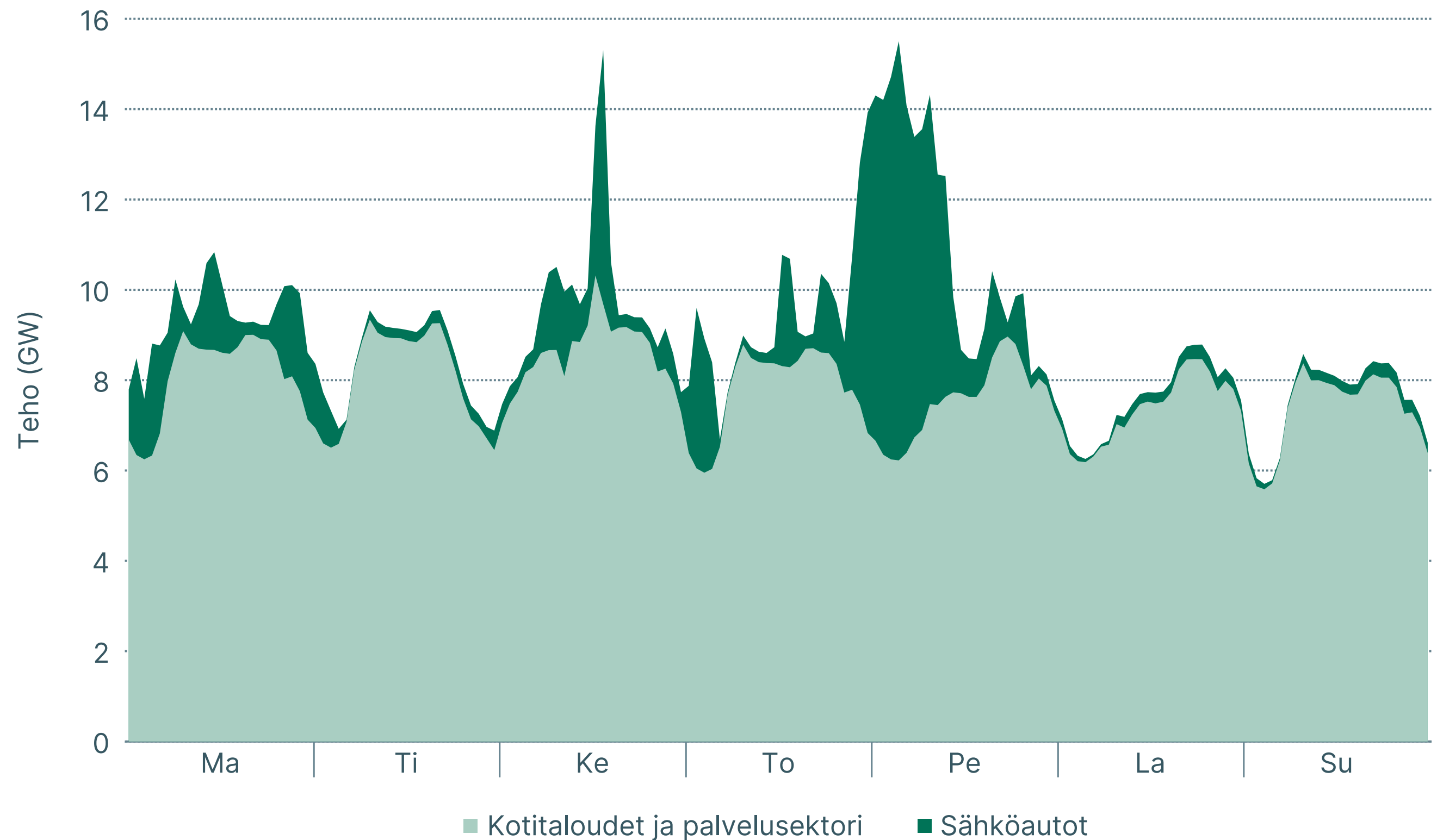
Sähkön kulutuksen joustolla on skenaarioissa selkeä arvo, vaikka niissä esimerkiksi lyhytaikaista kulutusjoustoa voidaan osin korvata sähkövarastoilla ja pitkäaikaista joustoa saadaan myös tuotantopuolelta. Kulutusjoustolla voidaan myös vastata sellaisiin tilanteisiin, mihin energiavarastot ja sähköntuotanto eivät pysty helposti vastaamaan.

Joustojen vaikutus verkkoon

Joustojen arvo muodostuu sähkön hinnan vaihteluista ja siksi myös mallinnuksessa joustot seuraavat hintasignaaleja. Kulutusjoustossa koitetaan välttää korkeita hintoja ja hyödyntää edullisimpia hintoja. Skenaarioissa esimerkiksi sähköautojen älykäs lataus ajoitetaan edullisimpiin ajankohtiin. Tälle on asetettu tiettyjä rajoitteita akkukapasiteetin, ajojen ja latausajankohtien mukaan. Vaikutusta verkkoon ei ole kuitenkaan suoraan huomioitu.

Kuva 25 esittää esimerkkiviikon Notkeaa kehitystä -skenaariosta ja pyrkii havainnollistamaan sähköautojen hintajoustavan latauksen ja V2G-teknologian keskinäistä vaikutusta verkkoon. Esimerkissä on huomioitu lisäksi kotitalouksien ja palvelusektorin kulutus. Kuvasta nähdään, että sähköautojen lataus muodostaa hyvin suuren osan tehopiikeistä. Nämä tehopiikit vaikuttavat suoraan etenkin jakeluverkkojen ja siten myös kantaverkon tarvitsemiin vahvistuksiin.

Talvella erityisesti lämmitystarve on suurta ja nostaa kulutusta. Haastavin siirtotilanne kantaverkossa muodostuu hetkinä, jolloin erittäin kylmä sää johtaa suureen lämmitystarpeeseen, mutta samaan aikaan on tuulista ja siten sähkön hinta on edullinen. Tällöin lämmityksen ja muun joustavan kulutuksen yhtäaikainen aktivoituminen voi haastaa verkon siirtokykyä. Tämän vuoksi esimerkiksi sähköautojen älykkäässä latauksessa tulisi sähkön hinnan lisäksi ottaa huomioon verkon kapasiteetti. Tähän ohjaisi esimerkiksi tehohinnoittelu, jolla voisi hillitä piikkitehoja. Pelkästään sähköautojen älykkään latauksen ohjaamisella tai lataustehon tasoittamisella kuvassa nähtäviin hetkiin, jolloin muu kulutus on pienempää, voitaisiin tarvittavaa huipputehoa laskea huomattavasti.



Kuva 25 Esimerkki verkkoon kohdistuvasta kulutuksesta talviviikkoina

Liite A

Skenaarioiden mallinnus ja taustatekijät

Skenaarioiden mallinnustapa ja taustatekijät ovat keskeisiä skenaarioiden rakentamisessa. Tässä luvussa olemme avanneet skenaarioiden mallinnustapaa sekä merkittävimmät taustatekijät ja tehdyt oletukset sähkön kulutuksen, tuotannon, rajasiirtoyhteyksien ja ympäröivän maailman osalta.



A.1 Skenaarioiden mallinnus

Skenaarioiden mallinnus on tehty mallintamalla resurssien käyttäytymistä tuntitasolla vuorokausimarkkinalla useilla eri säävuosilla huomioiden Suomen lisäksi muu Itämeren alue sekä osat Länsi- ja Keski-Euroopasta. Reservimarkkinoita ja esimerkiksi siirtojenhallintamarkkinoita ei ole suoraan mallinnettu, mutta esimerkiksi tasesähkökustannuksia on pyritty huomioimaan vaihtelevalla tuotannolla ja vastaavasti näitä kustannuksia vastaavien tuottojen muodostumista säätökykyiselle kapasiteetille kuten sähkövarastoille.

Skenaarioita rakennettaessa on mallin annettu ensin minimoida järjestelmäkustannukset rakentamalla optimaaliset kapasiteetit annettua kysyntää vasten, huomioiden eri tuotantomuodoille asetetut kustannustasot sekä skenaariokohtaiset ja skenaariotarinoiden mukaiset rajoitteet tuotantomuotojen kasvulle. Mallinnuksen seuraavassa vaiheessa kapasiteettirakennetta on iteroitu kapasiteetin tuntitasonmallinnuksessa saamia nettotuloja vasten siten, että kaikki investoinnit ovat kannattavia kustannusparametreihin nähden. Poikkeuksina kannattavuusvaatimuksesta ovat eri skenaarioiden taustaoletukset mahdollisista tukijärjestelmistä esimerkiksi ydin- ja huippuvoimalle.



A.2 Sähkön kulutus

Datakeskukset

Datakeskusten kasvua on tarkasteltu kahden eri muuttujan perusteella: datakeskusmarkkinan arvioitu kasvu Euroopassa kokonaisuutena sekä tästä Suomelle arvioitu osuus.

Euroopan datakeskusmarkkinan kehityksen myötä datakeskusten käyttämän sähkön kasvuksi on arvioitu:

- 1. **Nopea kasvu:** Datakeskusten sähkön käyttö on noin 710 TWh vuonna 2040.
- 2. **Maltillinen kasvu:** Datakeskusten sähkön käyttö on noin 270 TWh vuonna 2040.

Nopea kasvu vastaa keskimäärin 20 % kasvuvauhtia vuodessa seuraavan 5 vuoden ajan, minkä jälkeen kasvuvauhti hidastuu keskimäärin 10 % vuositasolle 2030-luvulla. Maltillinen kasvu vastaa 10 % kasvuvauhtia vuodessa seuraavan 5 vuoden ajan, jonka jälkeen kasvuvauhti hidastuu keskimäärin 5 % vuositasolle 2030-luvulla.

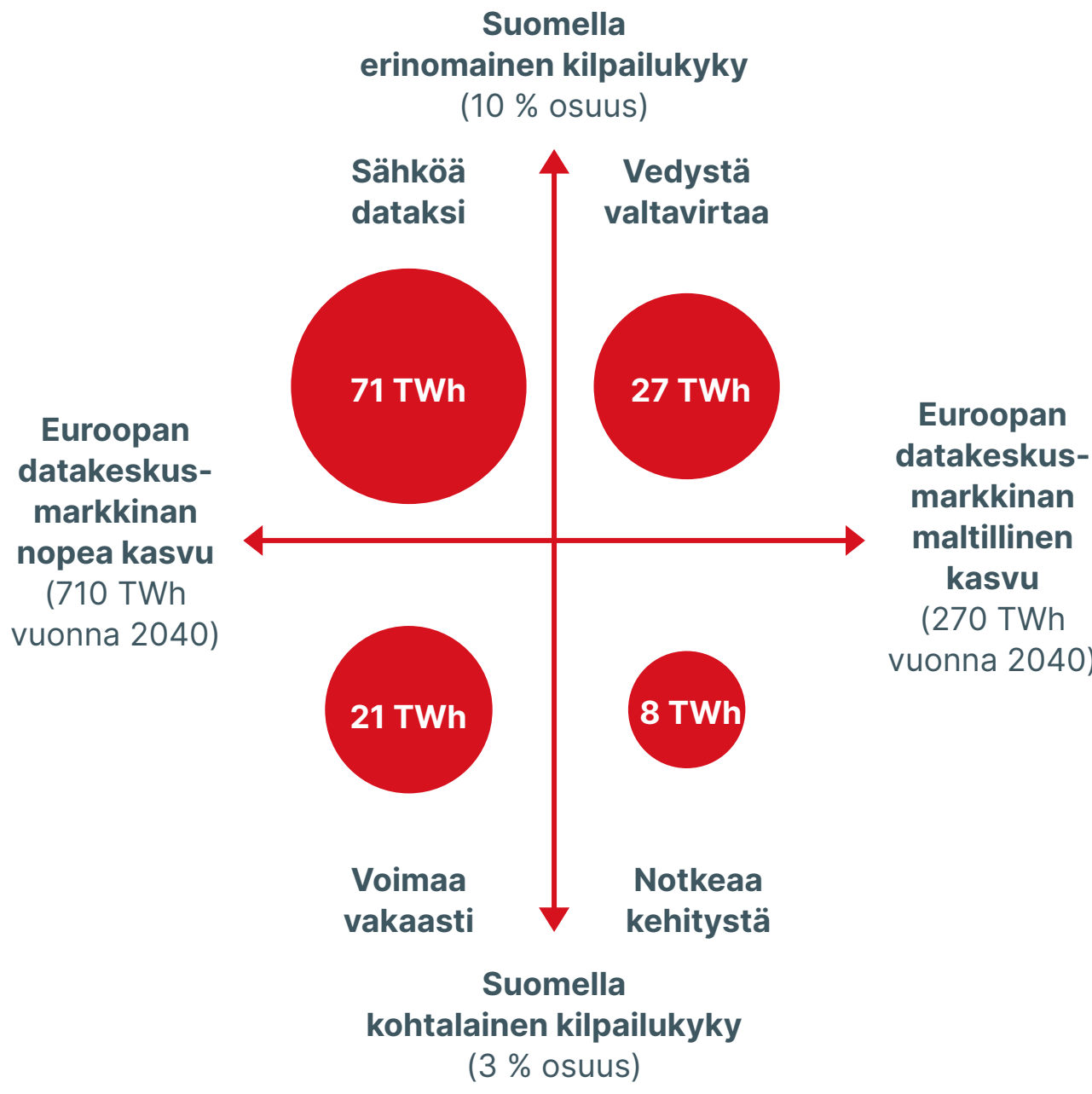
Suomen markkinaosuus on arvioitu Suomen kilpailukykyyn pohjautuen seuraavasti:

A. Erinomainen kilpailukyky: Suomen osuus on 10 % Euroopan datakeskusmarkkinasta.

B. Kohtalainen kilpailukyky: Suomen osuus on 3 % Euroopan datakeskusmarkkinasta.

Näistä 10 % osuus kuvastaa Suomen erinomaista kilpailukykyä puhtaan ja edullisen sähkön, kylmän ilmaston mahdollistaman energiatehokkuuden sekä hukkalämmön hyödyntämismahdollisuuksien vuoksi. Vastaavasti 3 % osuus vastaa Suomen osuutta Euroopan nykyisestä sähkönkulutuksesta ja heijastelee siten tilannetta, jossa Suomen kilpailukyky datakeskuksissa olisi kohtalainen.

Näin laskettuna datakeskusten sähkönkulutuksen haarukaksi Suomessa vuonna 2040 saadaan skenaarioissa 8–71 terawattituntia. Haarukan ylälaitaa käytetään Sähköä dataksi -skenaariossa ja haarukan alalaitaa Notkeaa kehitystä -skenaariossa. Haarukan väliin jäävissä skenaarioissa datakeskusten sähkönkulutus on 21 terawattituntia Voimaa vakaasti -skenaariossa ja 27 terawattituntia Vedystä valtavirtaa -skenaariossa.



Kuva 26 Datakeskusten kasvun taustatekijät skenaarioissa

Vedyntuotanto

Vetytalouden kasvua ja siten vedyntuotantoon sekä vedyn jatkojalostukseen käytetyn sähkön kasvua on tarkasteltu kahden eri muuttujan perusteella: elektrolyysivedyn tuotantomäärä EU:ssa sekä Suomen markkinaosuus EU:n vedyn ja vetyjalosteiden tuotannosta.

EU:n vetymarkkina on arvioitu ENTSO-E:n ja ENTSOG:n skenaarioiden perusteella. Elektrolyysereiden sähkönkulutukseksi EU:ssa vuonna 2040 on arvioitu kahdessa eri projektiossa:

- 1. Nopeampi kasvu:** 1050 TWh
- 2. Maltillisempi kasvu:** 600 TWh

Nopeampaa kasvua on käytetty joustavan kulutuskasvun Vedystä valtavirtaa ja Notkeaa kehitystä -skenaarioissa, ja hieman maltillisempaa kasvua joustamattoman kulutuskasvun Sähköä dataksi ja Voimaa vakaasti -skenaarioissa.

Suomen markkinaosuutta EU:n elektrolyysivedyn markkinasta³⁷ on vaihdeltu skenaarioittain:

- A. Vedystä valtavirtaa:** noin 10 % osuus vuonna 2023 asetetun tavoitteen³⁸ mukaan
- B. Notkeaa kehitystä:** noin 5 % osuus
- C. Sähköä dataksi:** noin 3 % osuus
- D. Voimaa vakaasti:** noin 1,5 % osuus

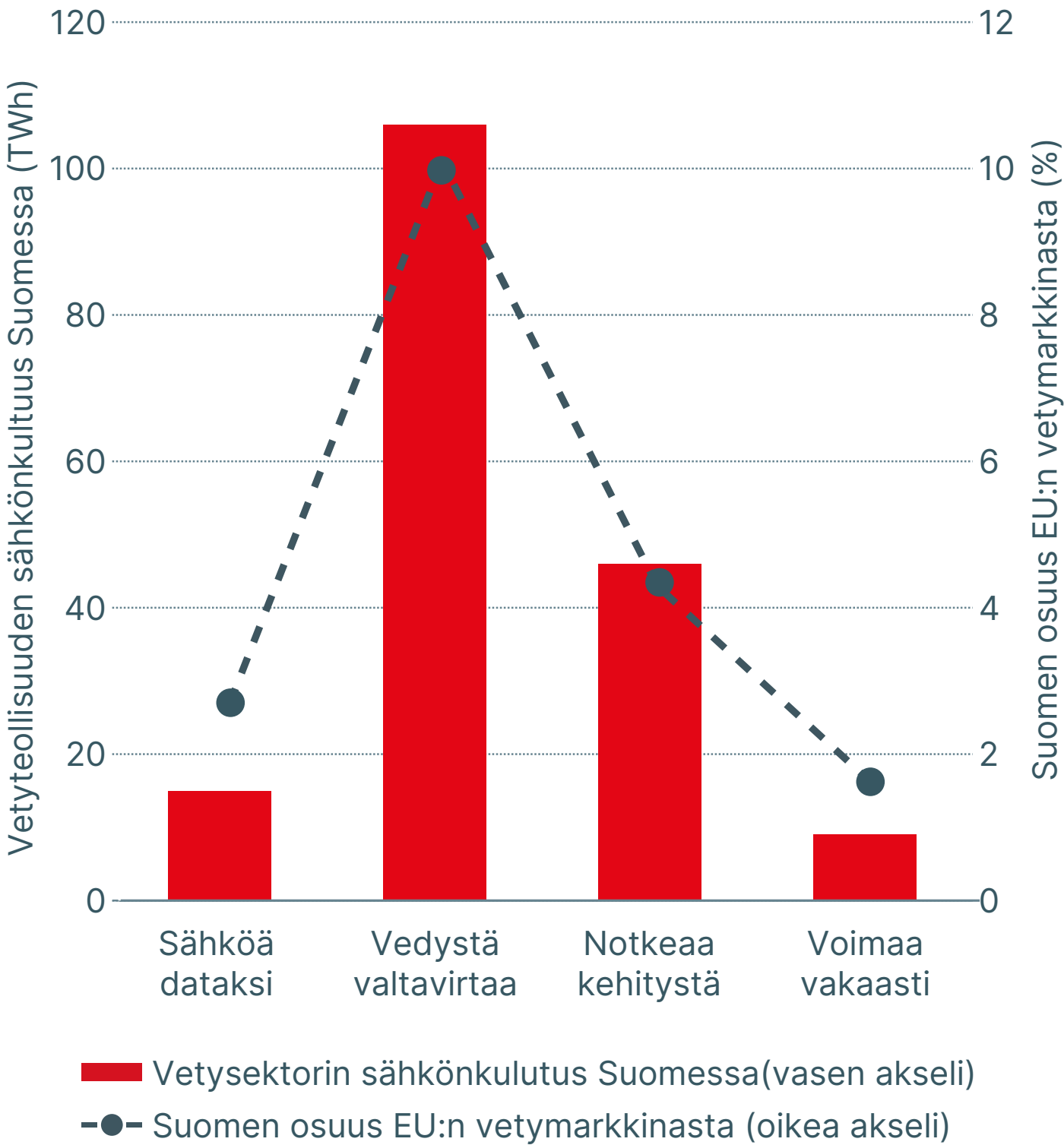
³⁷ Skenaarioissa markkinaosuudet on laskettu osuutena EU:n elektrolyysivedyn tuotantomääristä. TYNDP2024-skenaarioissa puhtaan vedyn kokonaismarkkina muodostuu Euroopassa tuotetun elektrolyysivedyn lisäksi vedyn ja vetyjohdannaisten tuonnista sekä sinisestä vedystä.

³⁸ <https://valtioneuvosto.fi/-/1410877/hallitus-hyvakysi-periaatepaatoksen-vedysta-suomella-edellytykset-valmistaa-10-prosenttia-eu-n-vihreasta-vedysta-2030>

³⁹ Gasgrid kehittää aktiivisesti vedyn putkiyhteyshankkeita. Lisätietoa: <https://gasgrid.fi/hankkeet>

Vieressä olevassa kuvassa on esitettynä vetysektorin sähkön kulutus Suomessa ja Suomen osuus EU:n elektrolyysivedyn markkinasta. Kasvu on voimakkainta Vedystä valtavirtaa -skenaariossa. Notkeaa kehitystä -skenaariossa Suomen vetysektorin sähkönkulutus jää hieman alle indikoidun markkinaosuuden. Tämä johtuu siitä, että osa vedystä tuodaan Pohjois-Ruotsista Suomeen jatkojalostusta varten, jolloin Suomessa ei käytetä yhtä paljon sähköä vedyn tuotantoon, vaikka osuus jatkojalostuksesta vastaa 5 %. Kaikki mainitut elektrolyysivedyn sähkönkulutusmäärät sisältävät vedyn jatkojalostuksen sähkönkulutuksen, jonka on arvioitu olevan keskimäärin 10 % vetyteollisuuden sähkönkulutuksesta.

Suurimmissa vetytalouden kasvuskenaarioissa, eli Vedystä valtavirtaa ja Notkeaa kehitystä -skenaarioissa, on oletettu kansallisen vetyverkon rakentaminen Suomeen. Molemmissa näistä skenaarioista rakennetaan lisäksi Suomen ja Ruotsin välinen vetyputkiyhteys ja Vedystä valtavirtaa -skenaariossa rakennetaan lisäksi vetyputkiyhteys Keski-Eurooppaan³⁹. Kaikkien Suomen vetyputkien kooksi on laskelmissa oletettu 7,2 GW vetyä. Sähköä dataksi- ja Voimaa vakaasti -skenaarioissa Suomeen ei rakenneta vetyverkkoa.



Kuva 27 Vetyteollisuuden kasvu Suomessa ja Suomen osuus EU:n elektrolyysivedyn markkinasta

Muu teollisuus

Muun teollisuuden osalta sähkönkulutuksen oletetaan kasvavan voimakkaimmin korkeamman kulutuskasvun Sähköä dataksi ja Vedystä valtavirtaa -skenaarioissa ja hitaammin maltillisemman kulutuskasvun Notkeaa kehitystä ja Voimaa vakaasti -skenaarioissa.

Skenaarioissa vaihteluväli on noin 40–60 TWh vuonna 2040, mikä edustaa 20–75 % kasvua verrattuna vuoden 2024 tasoon. Tämä teollisen kulutuksen kasvu perustuu prosessien sähköistämiseen nykyisessä metalli- ja kemianteollisuudessa ja uusiin teollisiin hankkeisiin. Lisäksi sähkökattiloiden käyttöä lisätään korvaamaan merkittävässä määrin muita polttoaineita teollisuuden tarvitseman lämmön ja höyryn tuotannossa.

Maltillisemman kulutuskasvun skenaarioissa kehitys rajoittuu Suomessa nykyisin toimivan teollisuuden sähköistämiseen, kun taas voimakkaamman kulutuskasvun skenaarioissa on huomioitu myös suunnitteilla olevia greenfield- eli uudishankkeita. Teollisuuden sähkökattiloiden kehitys on voimakkaampaa joustavan kulutuskasvun skenaarioissa.

Lämmitys

Skenaarioissa on vaihdeltu oletuksia sähkön käytöstä kaukolämmön tuotannossa. Joustavamman kulutuksen Vedystä valtavirtaa ja Notkeaa kehitystä -skenaarioissa sähkökattiloiden määrä on suurempi. Vastaavasti pääosin joustamattoman kulutuksen Sähköä dataksi ja Voimaa vakaasti -skenaarioissa

muiden lämmitysmuotojen, kuten ydinkaukolämmön ja CHP:n rooli korostuu. Kaukolämmön lämpöpumppujen rooli riippuu skenaariossa saatavilla olevien hukkalämpöjen määrästä, ja on sidoksissa datakeskusten ja vedyntuotannon sähkönkulutukseen. Kiinteistökohtaisen sähkölämmityksen oletukset ovat samat kaikissa skenaarioissa.

Liikenne ja muu kulutus

Liikenteen sähkönkulutus kasvaa noin 10 TWh tasolle kaikissa skenaarioissa. Joustavamman kulutuksen Vedystä valtavirtaa ja Notkeaa kehitystä -skenaarioissa sähköautojen lataus on oletettu pääosin joustavaksi, ja lisäksi kaksisuuntaisen latauksen (ns. Vehicle-to-Grid tai Vehicle-to-Home, V2G/V2H) on oletettu olevan yleisesti käytössä. Tätä kautta sähköautoista saadaan merkittävää säätökykyä tasapainottamaan sähkön tuotantoa ja kulutusta. Maltillisemman kulutusjouston Sähköä dataksi ja Voimaa vakaasti -skenaarioissa sähköautojen lataus on oletettu pääosin joustamattomaksi eikä kaksisuuntaista latausta ole käytössä.

Muu sähkönkulutus on oletettu samalle tasolle kaikissa skenaarioissa, pois lukien verkko- ja varastohäviöiden vaikutus.



A.3 Sähkön tuotanto

Kuhunkin kulutusskenaarioon on sähkömarkkinamallinnusten avulla mallinnettu sähköntuotanto- ja energiavarastorakenne, joka mahdollistaa kulutuksen⁴⁰ kattamisen markkinaehtoisesti ja tehokkaasti.

Tuotantorakenteen muodostumiseen vaikuttavista tekijöistä tärkeimpiä on mukautettu osana skenaariorakennusta:

1. **Vedystä valtavirtaa** -skenaariossa on oletettu laajamittaisen maatuuli- ja aurinkovoiman rakentamisen käynnistyminen Itä-Suomessa, mikä kasvattaa tuuli- ja aurinkovoiman rakentamispotentiaalia ja mahdollistaa paremman maantieteellisen hajautuksen. **Sähköä dataksi** -skenaariossa on oletettu suhteessa enemmän maatuulivoimarakentamista Lappiin. Lisäksi sähköä dataksi -skenaariossa on oletettu SMR-ydinvoiman kaupallistuvan CHP-tuotannossa sekä uutta pumppuvoimaa Pohjois-Suomeen.
2. **Voimaa vakaasti**- ja **Notkeaa kehitystä** -skenaariossa on rajoitettu maatuulivoiman rakentamismahdollisuuksia muita skenaarioita selvästi matalammalle tasolle.
3. **Voimaa vakaasti** -skenaariossa on oletettu perinteistä ydinvoimaa rakennettavan ydinvoimatuen avulla.
4. **Notkeaa kehitystä** -skenaariossa hajautettua, kotitalouksien omaa aurinkovoiman tuotantoa on runsaasti suhteessa muihin skenaarioihin. Lisäksi skenaariossa on oletettu merkittävää kasvua merituulivoiman rakentamisessa.

A.4 Sähkön rajasiirtoyhteydet

Sähkön rajasiirtoyhteyksien osalta kaikissa skenaarioissa on tehty toistaiseksi samat lähtöoletukset perustuen meneillä oleviin rajasiirtoyhteyshankkeisiin Fingridin ja Suomen naapurimaiden kantaverkkoyhtiöiden välillä.

Taulukko 20 Oletukset Suomen sähkön rajasiirtokapasiteetista skenaarioissa

Kapasiteetti (GW)	2040
Pohjois-Ruotsi (SE1)	2,8
Keski-Ruotsi (SE3)	1,6
Viro (EE)	1,7
Pohjois-Norja (NO4)	0,2
Yhteensä	6,3

Vaihtosähköyhteyksistä Pohjois-Ruotsin ja Suomen välille rakennetaan Aurora Line 1 ja Aurora Line 2 -siirtoyhteydet. Tasasähköyhteyksistä Etelä-Ruotsin ja Suomen välinen Fenno-Skan 1 -siirtoyhteys on oletettu korvattavan suuremmalla Fenno-Skan 3 -siirtoyhteydellä. Nettona nämä muutokset lisäävät siirtokapasiteettia 0,4 GW nykytilanteeseen verrattuna. Lisäksi Viron ja Suomen välille on oletettu rakennettavan uusi Estlink 3 -siirtoyhteys. Pohjois-Norjan ja Suomen välille on oletettu nykyisen vaihtosähköyhteyden muuttaminen 150 MW tasasähköyhteydeksi.

A.5 Ympäröivä maailma

Ympäröivän maailman osalta lähtötietoina on hyödynnetty soveltuvien osien ENTSO-E:n ja ENTSOG:n Ten Year Network Development Plan (TYNDP) -skenaariotyössä tehtyjä yhteiseurooppalaisia skenaarioita ja Itämeren alueen kantaverkkoyhtiöiltä saatuja tarkempia tietoja. Näitä tietoja on skenaariossa muokattu siten, että oletukset muulle Euroopalle ovat johdonmukaisia Fingridin Suomelle luomien skenaarioiden oletusten kanssa. Muun Euroopan kuvaus on ollut kaikissa skenaarioissa samankaltainen. Keskeisimpänä erona Voimaa vakaasti -skenaariossa on oletettu ydinvoiman lisärakentaminen Ruotsissa tukimekanismien mahdollistamana.

⁴⁰ Fingrid käyttää AFRY:n kehittämää kaupallista BID3-sähkömarkkinamallia skenaarioiden rakentamisessa ja mallintamisessa mm. verkon suunnittelua varten.

A.6 Laskelmissa käytetyt pääoma- ja käyttökustannukset sekä hyödykehinnat

Skenaarioiden rakennuksessa on hyödynnetty sähkömarkkinamallinnuksia, joiden avulla on optimoitu kuhunkin kulutusskenaarioon sopiva tuotantorakenne. Mallinnuksessa käytetyt

pääomakustannukset ja kiinteät käyttökustannukset (OPEX) on eritelty taulukossa. Muuttuvissa käyttökustannuksissa (OPEX) ei ole huomioitu tasapainotuskustannusta.

Laskelmissa käytetyt pääoma- ja käyttö-kustannukset vuonna 2040	CAPEX	Kiinteä OPEX	Rakennusaika	Käyttöikä	Muuttuva OPEX	Tasoitettu tuotantokustannus (LCOE)	Lähde
	EUR/kWe	EUR/kW/a	vuotta	vuotta	EUR/MWh	EUR/MWh	
Maatuulivoima	999	26	2	30	2	32	[1]*
Merituulivoima	2141	38	4	30	3	49	[1]*
Aurinkovoima	320	14	1	40	1	36	[1]*
Ydinvoima	10107	141	10	40	9	139	[2]
Huippuvoima**	452	9	1	25	450		[1]
Akkuvarasto	106 EUR/kW + 100 EUR/kWh	1	1	30			[1]
Elektrolyyseri (PEM)	1624	10	2	25			[1]****
Vetyvarasto	760	12	2	30			[3]***

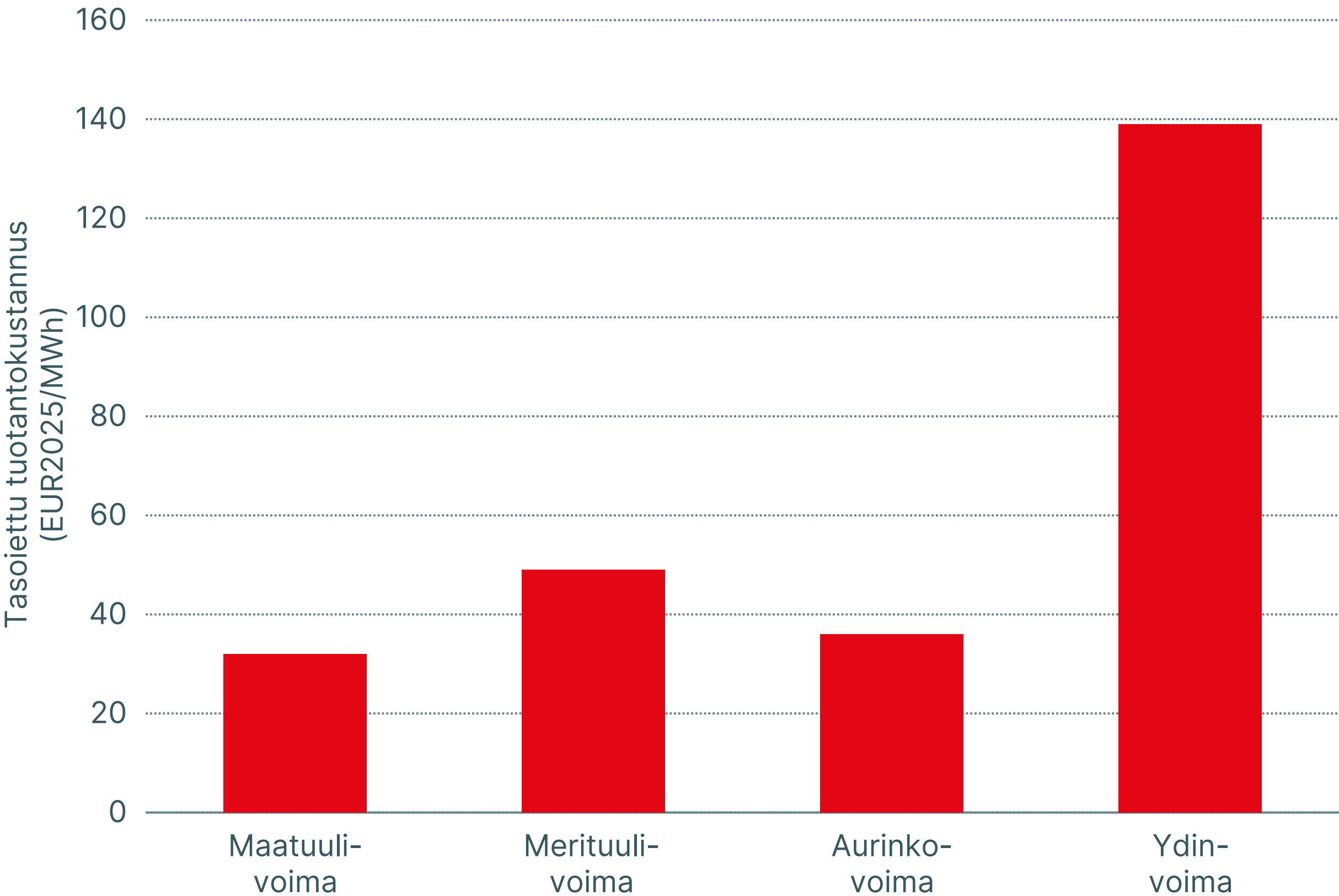
Taulukon viitteet

[1] ENS.dk technology catalogue. <https://ens.dk/en/analyses-and-statistics/technology-catalogues>
[2] NVE Kostnader for kraftproduksjon <https://www.nve.no/energi/analyser-og-statistikk/kostnader-for-kraftproduksjon/>
[3] Energian siirtoverkot vetytalouden ja puhtaan energijärjestelmän mahdollistajina. <https://gasgrid.fi/wp-content/uploads/Energian-siirtoverkot-vetytalouden-ja-puhtaan-energiajarjestelman-mahdollistajina-Loppuraportti.pdf>
*ENS.dk:n kustannusmallia on muokattu huomioimaan Suomen maanvuokra- ja kiinteistöverotasot
**Huippuvoimalan polttoaineeksi on oletettu sähköpolttoaine hinnalla 180 EUR/MWh ja 40% hyötysuhteella
***Vetyvarastona on käytetty 168 MWh/MW kalliokiviuolavarastoa. Fingridin ja Gasgridin yhteisselvityksessä käytettyä vetyvaraston kustannustasoa on tässä työssä skaalattu ylöspäin samassa suhteessa elektrolyyserien kustannusmuutoksen kanssa. Vetyvaraston kustannus on ilmoitettu vedyn ottotehon (kWh2) suhteessa.
**** Alkuperäinen, luonnosskenaarioissa käytetty lähde Ens.dk: 812 EUR/kW. Konsultaatiopalautteen perusteella lopullisissa skenaarioissa arvio kaksinkertaistettiin.

Kuva 27 esittää vertailun eri tuotantomuotojen tasoitetusta tuotantokustannuksesta (LCOE). Kaikki kustannukset ovat nykyrahassa, eli vuosien 2025–2040 välistä inflaatiota ei huomioida. Tasoitettun tuotantokustannuksen laskennassa on käytetty 6 % reaalista pääoman tuottovaadetta.

Simuloinneissa käytetyt hyödykehinnat perustuvat ENT-SO-E:n TYNDP-skenaarioihin. Päästöoikeuden hintana on käytetty 169 euroa tonnilta CO₂, maakaasun hintana 29,40 EUR/MWh ja kivihiilen hintana 6,60 EUR/MWh.⁴¹ Kaikki hyödykehinnat ovat reaalisia.

⁴¹ Lähde: ENTSO-E. Lähtöaineiston EUR2021 muunnettu nykyrahaksi.
<https://eepublicdownloads.blob.core.windows.net/public-cdn-container/clean-documents/sdc-documents/ERAA/2023/ERAA%202023%20Fuel%20and%20Carbon%20Pric%20Trajectory.pptx>



Kuva 27 Tasoitettu tuotantokustannus (LCOE) eri tuotantomuodoilla vuonna 2040

Fingrid välittää. Varmasti.

Fingrid Oyj

Läkkisepäntie 21, 00620 Helsinki
PL 530, 00101 Helsinki
Puhelin 030 395 5000

in



FINGRID