KIINTEISTÖ AKKU 2030

| | |
|---|---|
| **Tuotoksen nimi** | Kiinteistöakkujen vertailuanalyysi ulkomailta |
| **Tehtävä(t):** | T2.1-2.3, T2.5 |
| **Valmistelijat** | Suvi Karirinne |

Euroopan unionin osarahoittama

Elinvoimakeskus

## History of changes

| | date | referee(s) |
|---|---|---|
| Ensimmäinen versio kommenteille | 24.2.26 | |
| Toinen päivitetty versio kommenteille | | |
| Lopullinen versio | 25.5.26 | |
| | | |
| | | |
| | | |

## Sisällysluettelo

Lyhenteet ..... 4
Tiivistelmä ..... 6
Executive summary ..... 8
1. Globaali markkinamittakaava ja kehitys: taloudelliset ja fyysiset mittasuhteet ..... 10
1.1 Taloudellinen mittakaava ..... 10
1.2 Fyysinen mittakaava (kysyntä ja kapasiteetti) ..... 11
2. Teknistaloudelliset näkökulmat: akkukennoston ja -paketin hintadynamiikka ..... 12
2.1 Alueelliset kustannuserot ja Kiinan kustannusjohtajuus ..... 13
3. Keskeiset maantieteelliset markkinat, segmentit ja akkukemiat ..... 14
4. Keskeiset toimijat, raaka-aineet ja arvoketjuintegraatio ..... 17
5. Kiertotalous: kierrätys ja toisen elinkaaren markkinat ..... 18
5.1 Markkinakoko: toisen elinkaaren uudelleenkäyttö vs. kierrätys ..... 18
5.2 Haasteet ja "suoraan kierrätykseen" -dilemma ..... 21
6. Akkuenergiavarastojen (BESS) markkinat ..... 22
6.1 Suurmittakaavaiset BESS-sovellukset ja verkkoon integrointi ..... 22
6.2 Kulutuspisteen takaisen BESS:n kasvu (asuin- ja liikekiinteistöjen varastointi) ..... 22
6.3 Hajautetun varastoinnin esteet ..... 23
6.4 Tulovirtojen yhdistäminen ja BESS-liiketoimintamallit ..... 25
6.4.1 Sähkön arbitraasi ..... 25
6.4.2 Kuormansiirto (huipputehon leikkaus) ..... 26
6.4.3 Verkon lisäpalvelut ..... 26
6.4.4 Joustavuus ja kysyntäjoustomarkkinat ..... 26
6.4.5 Virtuaalivoimalaitokset (VPP) ..... 27
6.4.6 Vuorovaikutus netotuspolitiikan kanssa ..... 27

6.5 Alueelliset BESS-markkinarakenteet ja kehityssuunnat (EU, USA, Kiina, Aasia ja Pohjoismaat) ..... 27
6.5.1 Markkinan koko ja kasvu ..... 28
6.5.2 BESS-markkinakehityksen painopisteet ja liiketoimintamallit ..... 29
6.5.3 Sääntely- ja politiikkakehykset ..... 30
6.5.4 Haasteet ja mahdollisuudet ..... 31
6.5.5 Pohjoismaat: teknologinen kypsyys ja markkinoiden lähentyminen ..... 32
6.6 Energiayhteisöjen kehitys ja BESS-markkinat Euroopassa: yhteisöjen rooli ja sääntelykehykset ..... 33
6.6.1 Tanskan malli: yhteisomistus ja riskienhallinta ..... 33
6.6.2 Espanjan malli: yhteiskulutus ja kiinteistörekisteriin perustuva osallistuminen ..... 34
6.6.3 Saksan ja Italian mallit: taloudelliset kannustimet ja VPP-integraatio ..... 34
7. Järjestelmäintegraatio ja hajautetut energiaresurssit ..... 35
7.1 Tekninen perusta verkon joustavuudelle ..... 35
7.2 Energiayhteisöt: vaikutukset akkuvarastojen käyttöönottoon ..... 37
7.3 Aggregointi ja virtuaalivoimalaitokset ..... 38
7.4 Verkkosuunnittelu ja liityntävaatimukset ..... 39
7.5 Alueelliset parhaat käytännöt ja innovaatiot BESS-järjestelmissä ..... 39
8. Mahdollistavat toimintaympäristöt: politiikka, sääntely ja markkinoillepääsy ..... 41
8.1. Kansalliset aloitteet Euroopan johtavilla markkinoilla ..... 42
8.2. Kiinan teollisuusstrategia vs. Yhdysvaltojen politiikkamuutokset ..... 43
8.3. Euroopan unionin strateginen vastaus ..... 44
8.4. EU:n akkuasetus (EU) 2023/1542: uusi mittapuu ..... 44
8.4.1. Kestävyys ja hiilijalanjälki ..... 44
8.4.2. Digitaalinen akkupassi ..... 45
8.4.3. Kiertotalous ja vähimmäiskierrätyssisältö ..... 45
8.4.4. Turvallisuus ja huolellisuusvelvoite ..... 45
9. Sovellettavat hyvät käytännöt Suomessa ..... 46
11. Lähteet ..... 48

## Lyhenteet

**BESS (Battery Energy Storage System)**: Akkuenergiavarasto. Järjestelmä, joka varastoi sähköenergiaa akkuihin myöhempää käyttöä varten.

**BTM (Behind-the-Meter)**: Kulutuspisteen takainen tai kiinteistökohtainen. Viittaa varastointiin tai tuotantoon, joka sijaitsee sähkömittarin ja kulutuskohteen välissä (esim. kotitalousakut).

**CAPEX (Capital Expenditure)**: Investointikustannukset. Hankkeen alkuvaiheen hankinta- ja asennuskustannukset.

**DSO (Distribution System Operator)**: Jakeluverkonhaltija. Paikallinen sähköverkkoyhtiö, joka vastaa sähkön jakelusta loppukäyttäjille.

**EMS (Energy Management System)**: Energianhallintajärjestelmä. Ohjelmisto- ja laitteistoratkaisu, joka optimoi kiinteistön energian käyttöä, varastointia ja tuotantoa.

**EPR (Extended Producer Responsibility)**: Laajennettu tuottajavastuu. Valmistajan säädöksiin perustuva velvollisuus huolehtia tuotteen elinkaaren lopun hallinnasta ja kierrätyksestä.

**EV (Electric Vehicle)**: Sähköajoneuvo. Ajoneuvo, joka käyttää sähkömoottoria ja akkuja energianlähteenä.

**FCR (Frequency Containment Reserve)**: Taajuusohjattu käyttöreservi. Sähköverkon taajuuden vakauttamiseen käytettävä reservituote (sisältää esim. FCR-N ja FCR-D).

**GFM (Grid-Forming)**: Verkkoa muodostava teknologia. Suuntaajateknologia, joka pystyy itsenäisesti ylläpitämään verkon jännitettä ja taajuutta, mikä on kriittistä saarekekäytössä.

**IRA (Inflation Reduction Act)**: Yhdysvaltojen lainsäädäntöpaketti, joka sisältää merkittäviä tukia puhtaan energian ja akkuteknologian valmistukselle.

**kWh (Kilowatt-hour)**: Kilowattitunti. Sähköenergian kulutuksen tai varastoinnin perusyksikkö.

**LFP (Lithium Iron Phosphate)**: Litium-rautafosfaatti. Akkukemia, joka on suosittu BESS-sovelluksissa sen turvallisuuden, pitkän elinkaaren ja edullisuuden vuoksi.

**NMC (Nickel Manganese Cobalt)**: Nikkeli-mangaani-koboltti. Korkean energiatiheyden akkukemia, jota käytetään yleisesti sähköautoissa.

**NZIA (Net-Zero Industry Act)**: EU:n nettonollateollisuussäädös, jonka tavoitteena on vahvistaa Euroopan puhtaan teknologian valmistuskapasiteettia.

**PV (Photovoltaic)**: Aurinkosähkö. Teknologia, jolla auringon säteilyenergia muutetaan suoraan sähköksi.

**REC (Renewable Energy Community)**: Uusiutuvan energian yhteisö. Paikallinen yhteisö tai oikeushenkilö, joka tuottaa, kuluttaa ja jakaa uusiutuvaa energiaa jäsentensä kesken.

**SOH (State of Health)**: Akun kuntoisuus tai terveystila. Kuvaa akun nykyistä suorituskykyä ja kapasiteettia verrattuna uuteen akkuun.

**TWh (Terawatt-hour)**: Terawattitunti. Energian yksikkö (vastaa miljardia kilowattituntia), jota käytetään kuvaamaan globaalia kysyntää tai tuotantokapasiteettia.

**VPP (Virtual Power Plant)**: Virtuaalivoimalaitos. Pilvipohjainen ohjelmistoalusta, joka aggregoi suuren määrän hajautettuja energiaresursseja (kuten akkuja) toimimaan yhtenä hallittavana voimalaitoksena.

## Tiivistelmä

Tämä raportti on tuotettu osana Kiinteistöakku2030-hanketta ja toimii työpaketin 2 (Kiinteistöakkujen vertailuanalyysi ulkomailta) tuotosraporttina. Se tarjoaa kattavan analyysin globaalin akkuteollisuuden ja markkinan kehityksestä vuosina 2020–2025 ja hahmottelee keskeisiä kehityssuuntia vuoteen 2030 saakka. Ala on siirtynyt perustavanlaatuisesti marginaalisesta komponenttiteollisuudesta 2000-luvun energiajärjestelmän ydininfrastruktuuriksi, jota ohjaa sähköajoneuvojen (EV) massiivinen käyttöönotto ja akkuenergiavarastojen (BESS) kriittinen laajentuminen.

**Markkinadynamiikka ja teknistaloudelliset tekijät**
Globaali litiumioniakkujen valmistusmarkkina kasvoi poikkeuksellisella, yli 300 %:n vauhdilla vuosina 2020–2025, ja fyysinen kysyntä saavutti historiallisen 1 TWh:n rajapyykin vuonna 2024. Vaikka akkupakettien hinnat laskivat ennätyksellisen alas, alueelliset erot säilyvät; Kiina pitää edelleen merkittävää kustannusjohtajuutta, mikä muokkaa globaaleja toimitusketjustrategioita ja kilpailuasemia eurooppalaisille ja pohjoismaisille toimijoille.

**Sääntelymuutos ja kiertotalous**
Ala siirtyy vapaaehtoisesta kiertotaloudesta tiukasti säädeltyyn teolliseen velvoitteeseen, jota ohjaa erityisesti EU:n akkusäädöksen (2023/1542) "Brysselin vaikutus". Tämä sääntelykehys tuo käyttöön pakollisen digitaalisen akkupassin vuoteen 2027 mennessä ja asettaa kunnianhimoiset materiaalien talteenottotavoitteet. Nämä säädökset muuttavat elinkaaren lopun hallinnan suljetuksi teolliseksi järjestelmäksi, joka on keskeinen raaka-aineiden saatavuuden turvaamisessa ja toimitusketjujen resilienssin vahvistamisessa.

**BESS-kehitys ja hajautetut energiajärjestelmät**
BESS-sektori on keskeinen tukipilari uusiutuvan energian vaihtelevien verkkojen tasapainottamisessa. Vaikka suurmittakaavaiset hankkeet hallitsevat nykyisiä tuloja, kulutuspisteen takainen (Behind-the-Meter, BTM) segmentti kasvaa nopeasti. Nousevat mallit, kuten virtuaalivoimalaitokset (VPP) ja uusiutuvan energian yhteisöt (REC), toimivat katalyytteinä mahdollistamalla hajautettujen resurssien osallistumisen tukkumarkkinoille ja oheispalveluihin kehittyneiden "tulovirtojen yhdistämisen" (revenue stacking) strategioiden kautta.

**Strateginen tiekartta ja vientipotentiaali Suomelle**
Hajautetun varastoinnin onnistunut integrointi edellyttää, että Suomi siirtyy historiallisesti keskitetystä sähköjärjestelmästä kohti "järjestelmien järjestelmää" -lähestymistapaa. Tukemalla BESS-resurssien kotimarkkinoille pääsyä Suomi luo strategisen **"innovaatioalustan"** korkean lisäarvon teknologioille. Raportti tunnistaa merkittävän **globaalin vientipotentiaalin** suomalaiselle teknologiasektorille seuraavilla keskeisillä osa-alueilla:

- **Verkkovakauden ja verkonmuodostuksen teknologiat**: Laitteisto- ja ohjelmistoratkaisujen kehittäminen, jotka tarjoavat "synteettistä inertiaa" verkon vakauden ylläpitämiseksi pyörivän massan vähentyessä.

- **Tekoälypohjaiset EMS- ja VPP-alustat**: Älykkäiden ohjausjärjestelmien ja aggregointialustojen vienti, jotka mahdollistavat reaaliaikaisen markkinaoptimoinnin ja "mikroverkko palveluna" -ratkaisut.
- **Resilientti infrastruktuuri ja saarekekäyttö**: Erikoistuneiden järjestelmien paketointi autonomisiin paikallisverkkoihin ja saarekekäyttöön globaaleille markkinoille, jotka vaativat korkeaa luotettavuutta vaativissa tai kehittyvissä olosuhteissa.
- **Sääntely- ja sosiaaliset innovaatiot**: Joustavien jakomallien ja yhteisomistuksen hyödyntäminen sosiaalisen hyväksyttävyyden edistämiseksi ja hajautettujen resurssien markkinasyvyyden luomiseksi.

Yhteenvetona voidaan todeta, että sääntelyvalmiuden, digitaalisten ohjausjärjestelmien teknologisen johtajuuden ja hajautettuun resilienssiin siirtymisen yhdistelmä asettaa Suomen asemaan, jossa se voi paitsi turvata oman energiatulevaisuutensa, myös nousta johtavaksi digitaalisten ja järjestelmätason ratkaisujen viejäksi globaalissa energiasiirtymässä.

## Executive summary

This report has been produced as part of the Kiinteistöakku2030 project and serves as the output report for Work Package 2 (Comparative analysis of battery markets). It provides a comprehensive strategic analysis of the global battery industry's evolution between 2020 and 2025, while outlining key trajectories toward 2030. The industry has fundamentally transitioned from a niche component sector into the core infrastructure of the twenty-first-century energy economy, driven by the mass adoption of electric vehicles (EVs) and the critical expansion of Battery Energy Storage Systems (BESS).

**Market Dynamics and Technoeconomics**

The global lithium-ion manufacturing market witnessed an extraordinary growth rate of over 300% during the 2020–2025 period, with physical demand achieving a historic 1 TWh milestone in 2024. While battery pack prices reached record lows, regional disparities persist; China continues to hold a significant cost leadership, which shapes global supply chain strategies and competitive positioning for European and Nordic actors.

**Regulatory Shift and the Circular Economy**

The industry is moving from voluntary circularity toward a strictly regulated industrial mandate, primarily driven by the "Brussels Effect" of the EU Battery Regulation (2023/1542). This framework introduces the mandatory Digital Battery Passport by 2027 and establishes aggressive material recovery targets. These regulations are transforming end-of-life management into a "closed-loop" industrial system, essential for securing raw material supplies and enhancing supply chain resilience.

**BESS Evolution and Decentralized Energy Systems**

The BESS sector is a critical pillar for balancing volatile renewable energy grids. While utility-scale projects dominate current revenues, the Behind-the-Meter (BTM) segment is experiencing rapid growth. Emerging models, such as Virtual Power Plants (VPPs) and Renewable Energy Communities (RECs), serve as catalysts by enabling decentralized assets to participate in wholesale energy and ancillary service markets through advanced "revenue stacking" strategies.

**Strategic Roadmap and Export Potential for Finland**

To successfully integrate decentralized storage, Finland must transition from its historically centralized electricity system toward a "system-of-systems" approach. By supporting the domestic market entry of BESS assets, Finland creates a strategic **"innovation laboratory"** for high-value technologies. The report identifies significant **global export potential** for the Finnish technology sector in the following key areas:

- **Grid-Stabilizing and Grid-Forming Technologies**: Developing hardware-software solutions that provide "synthetic inertia" to maintain grid stability as traditional rotating mass decreases.
- **AI-Driven EMS and VPP Platforms**: Exporting intelligent control engines and aggregation platforms

capable of real-time market optimization and "Microgrid-as-a-Service" solutions.

- **Resilient Infrastructure and Islanding**: Packaging specialized systems for autonomous local grids and islanding capabilities for global markets requiring high reliability in harsh or developing conditions.
- **Regulatory and Social Innovation**: Leveraging flexible sharing models and co-ownership mandates to foster social acceptance and create market depth for distributed energy resources.

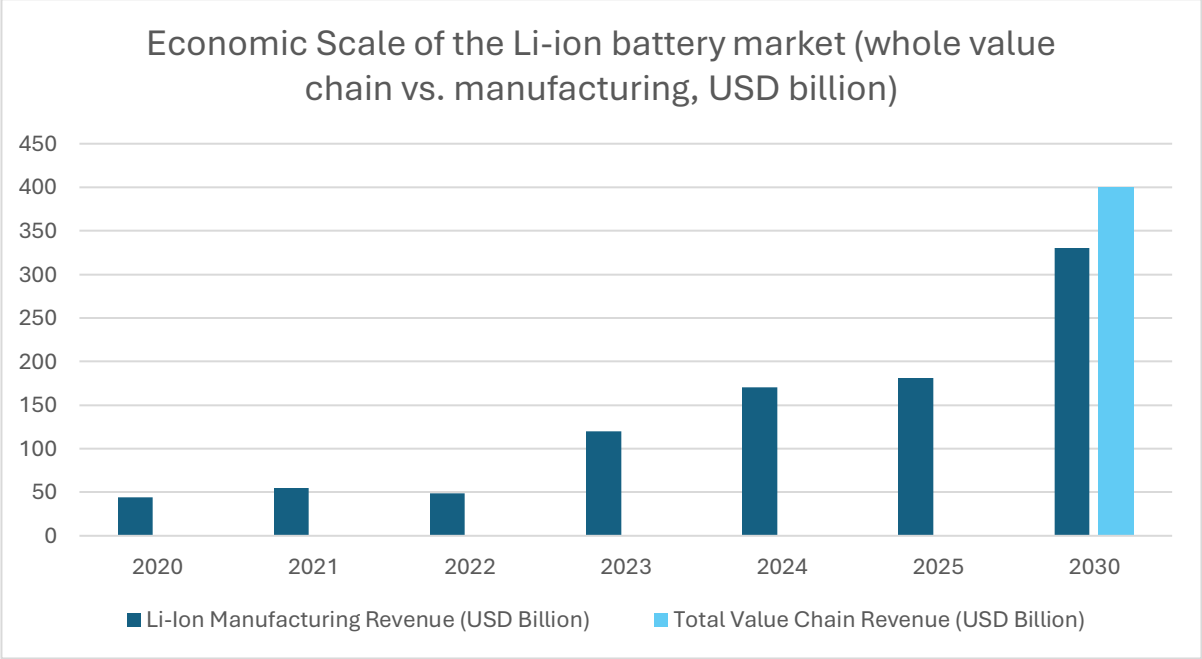
In conclusion, the convergence of regulatory readiness, technological leadership in digital control systems, and the shift toward decentralized resilience positions Finland not only to secure its national energy future but to become a leading exporter of the critical digital and system layers of the global energy transition.

# 1. Globaali markkinamittakaava ja kehitys: taloudelliset ja fyysiset mittasuhteet

Globaali akkuteollisuus on siirtynyt marginaalisesta komponenttialasta 2000-luvun energiajärjestelmän keskeiseksi infrastruktuuriksi. Vuosien 2020–2025 aikana ala koki täydellisen toimitusketjujen, teknologisten painopisteiden ja taloudellisen arvon uudelleenjärjestelyn. Tätä ajanjaksoa leimasi sähköajoneuvojen (EV) massiivinen käyttöönotto ja verkkomittakaavaisten akkuenergiavarastojen (BESS) kriittinen tarve. Vuoden 2026 alussa ala näyttäytyy kypsänä ja monimutkaisena kokonaisuutena, jolle on ominaista kova kilpailu, maantieteellinen keskittyminen ja nopea siirtymä kustannusoptimoituihin akkukemioihin [1–2].

## 1.1 Taloudellinen mittakaava

Globaali akkuteollisuus on kokenut huomattavan muutoksen sekä taloudellisessa arvossaan että fyysisessä tuotannossaan vuosien 2020–2025 aikana (Kuvio 1). Vuonna 2020 litiumioniakkujen valmistusmarkkinan arvo oli noin 44,2 miljardia Yhdysvaltain dollaria [3], mikä merkitsi alan nousua modernin energiajärjestelmän keskeiseksi osaksi. Vuoteen 2023 mennessä valmiiden akkupakettien maailmanlaajuinen kokonaisarvo nousi 120 miljardiin dollariin, mikä kuvastaa alan nopeaa laajentumista ja kysynnän kasvua [4]. Tämä ajanjakso 2020–2025 oli ominaista yli 300 %:n kasvuvauhdille, mikä korostaa alan siirtymistä marginaalisesta segmentistä globaalin teollisuus- ja energiapolitiikan keskiöön.



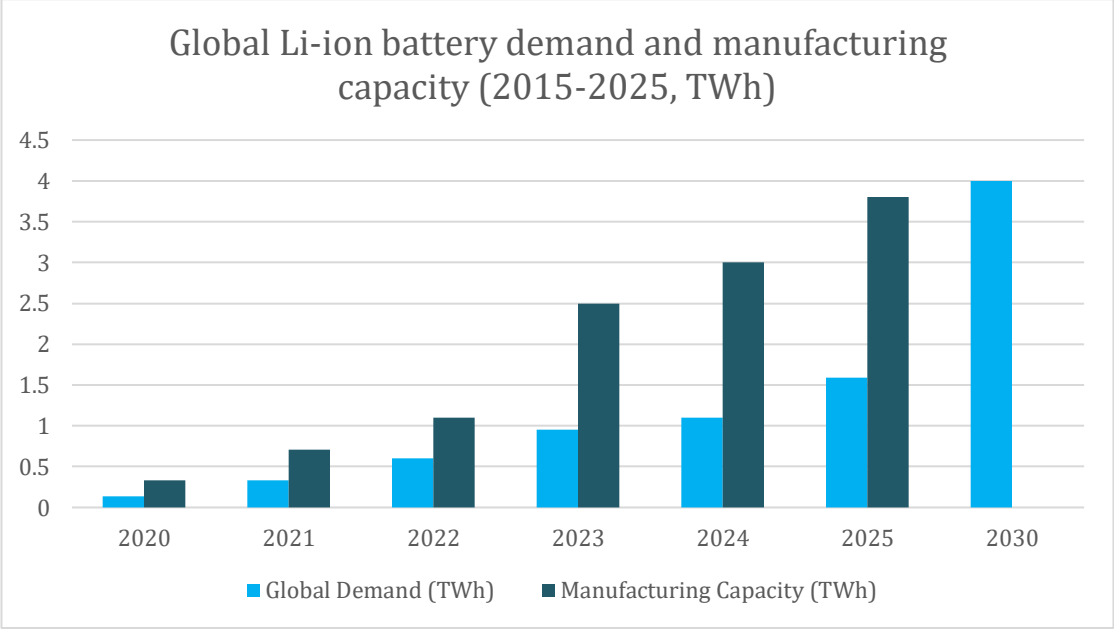

**Kuva 1**: Litiumioniakkujen valmistuksen taloudellinen mittakaava (USD miljardia) vuosina 2020–2030 [5, 13-15].

Tulevaisuuden ennusteet osoittavat jatkuvaa ja vahvaa kasvua. Vuoteen 2030 mennessä litiumioniakkujen valmistuksen maailmanlaajuisen markkinan arvon ennustetaan olevan 205–330 miljardia dollaria, riippuen markkinaskenaarioista ja teknologisesta kehityksestä [4–5]. Laajemmat arviot, jotka kattavat koko litiumioniarvoketjun, viittaavat siihen, että kokonaisliikevaihto voi ylittää 400 miljardia dollaria vuoteen 2030 mennessä [6–7], mikä korostaa alan kasvavaa vaikutusta myös muihin teollisuudenaloihin ja toimitusketjuihin.

Nämä rakenteelliset muutokset ovat vaikuttaneet merkittävästi kysynnän jakautumiseen alan sisällä. Energiasektori kattaa nyt yli 90 % litiumioniakkujen vuosittaisesta kysynnästä [8], mikä on dramaattinen muutos aiemmista vuosista, jolloin kulutuselektroniikka hallitsi markkinoita. Tämä kysynnän uudelleenjako kuvastaa sähköajoneuvojen ja verkkomittakaavaisten energiavarastojen kasvavaa merkitystä kansallisten turvallisuusstrategioiden, ympäristöpolitiikan ja infrastruktuurikehityksen kannalta maailmanlaajuisesti [8].

### 1.2 Fyysinen mittakaava (kysyntä ja kapasiteetti)

Globaali akkuteollisuus siirtyi gigawattituntien (GWh) mittakaavasta terawattituntien (TWh) mittakaavaan vuosien 2020–2025 aikana (kuvia 2). Ennen tätä ajanjaksoa, vuonna 2015, markkinaa hallitsi pääasiassa kulutuselektroniikka. Vuoteen 2016 mennessä sähköajoneuvojen akkukysyntä kuitenkin ohitti kannettavien laitteiden tarpeen, mikä merkitsi perustavanlaatuista muutosta markkinadynamiikassa [9–10]. Vuosi 2020 oli käännekohta, jolloin ensimmäiset megatehtaat aloittivat toimintansa ja laajensivat merkittävästi valmistuskapasiteettia [11–12].

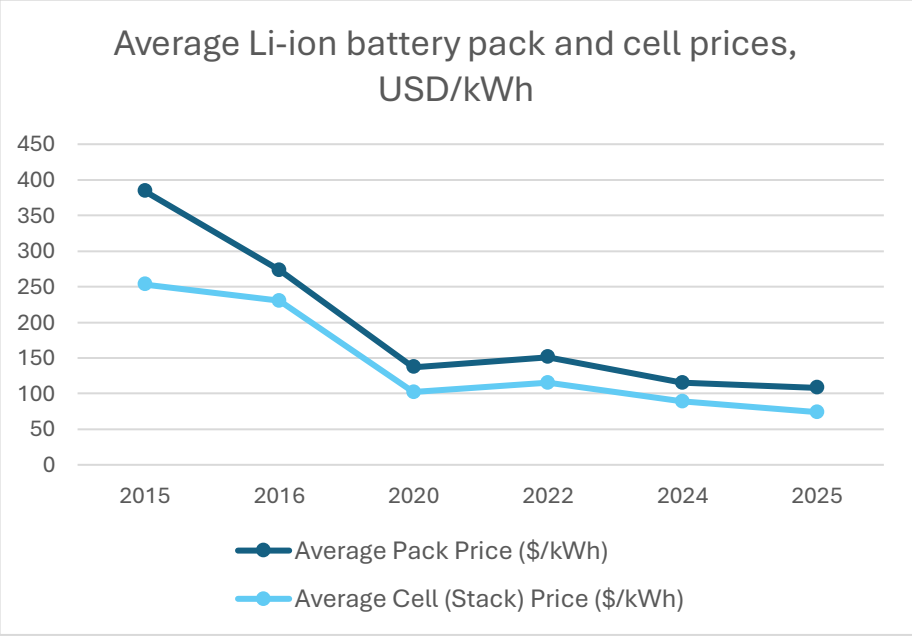



**Kuva 2**: Globaali litiumioniakkujen kysyntä ja valmistuskapasiteetti 2015–2025 (TWh) [9-12, 16-18]. Vuoden 2030 kysyntä on keskiarvo ennusteita.

Vuonna 2021 pandemian jälkeiset elvytystoimet vauhdittivat kasvua entisestään, kiihdyttäen kysyntää ja investointeja [9, 16]. Vuonna 2022 kysyntä lähes kaksinkertaistui, ja samalla tehtaisiin investoitiin ennätyksellisiä summia [1, 2]. Vuoteen 2023 mennessä valmistuskapasiteetti yli kaksinkertaistui yhden vuoden aikana, mikä osoittaa laajentumisen nopeuden [1, 2]. Vuonna 2024 ala saavutti historiallisen virstanpylvään, kun vuosittainen kysyntä ylitti 1 TWh:n rajan [2, 18]. Tehdasinvestoinnit ovat luoneet perustan kysynnän kasvulle vuoteen 2030 mennessä. Ennusteiden mukaan kysyntä kolminkertaistuu vuoden 2025 tasosta, ja vuosittaisen kysynnän arvioidaan nousevan 3,2–4,7 TWh:iin vuoteen 2030 mennessä [18].

## 2. Teknistaloudelliset näkökulmat: akkukennoston ja -paketin hintadynamiikka

Yksi kasvun keskeisistä tukipilareista on ollut energian varastoinnin kustannusten jatkuva aleneminen. "Akkukennosto" (battery stack) koostuu useista yksittäisistä kennoista, jotka on yhdistetty sarjaan tai rinnakkain [19] (Kuva 3). Tämän kennoston hinnalla on ratkaiseva vaikutus koko "akkupaketin" (battery pack) hintaan, joka sisältää myös koteloinnin ja akunhallintajärjestelmän (BMS) [20]. Vuonna 2020 litiumioniakkupakettien keskihinta oli 137 USD/kWh. Vuosi 2022 oli poikkeuksellinen, sillä hinnat nousivat 7 % raaka-aineiden hintojen ja inflaation vuoksi [21–22]. Vuonna 2023 hinnat kuitenkin palasivat laskutrendille: pakettitason hinta laski 139 USD/kWh:iin ja kennotason hinta 107 USD/kWh:iin [24].




**kuva 3:** Litiumioniakkujen keskimääräiset paketti- ja kennotasojen hinnat (USD/kWh) vuosina 2015–2025 [19-27].

Vuoteen 2025 mennessä pakettitason hinnan arvioidaan laskevan 108 USD/kWh:iin ja kennotason hinnan 74 USD/kWh:iin. Tämä kehitys kuvastaa tuotantoteknologioiden kehittymistä ja mittakaavaetujen realisoitumista.

### 2.1 Alueelliset kustannuserot ja Kiinan kustannusjohtajuus

Kiina jatkaa globaalia litiumioniakkujen hintajohtajuutta, mikä perustuu laajaan tuotantokapasiteettiin ja syvälle integroituihin vertikaalisiin toimitusketjuihin [1, 23, 25]. Vuonna 2025 Kiinassa akkupaketin keskihinta laski 84 USD/kWh:iin, mikä on noin 22 % alle globaalin volyymipainotetun keskiarvon (108 USD/kWh) [1, 24].

Kennotasolla Kiina on saavuttanut ennätyksellisen alhaiset hinnat erityisesti litium-rautafosfaatti (LFP) -kemialla: kennon hinta 36 USD/kWh ja valmiin paketin hinta 50 USD/kWh [1, 25–27]. Nämä luvut osoittavat, kuinka Kiina hyödyntää mittakaavaetuja ja toimitusketjujen tehokkuutta säilyttääkseen kustannusjohtajuutensa. Tulevaisuuteen katsottaessa valmistajat arvioivat, että globaalit kennokustannukset lähestyvät kilpailukykyistä 61–73 USD/kWh -hintahaarukkaa vuoteen 2030 mennessä [23]. Tämä viittaa siihen, että hintapaineet jatkuvat, kun tuotantoteknologiat kehittyvät ja mittakaavaedut kasvavat.

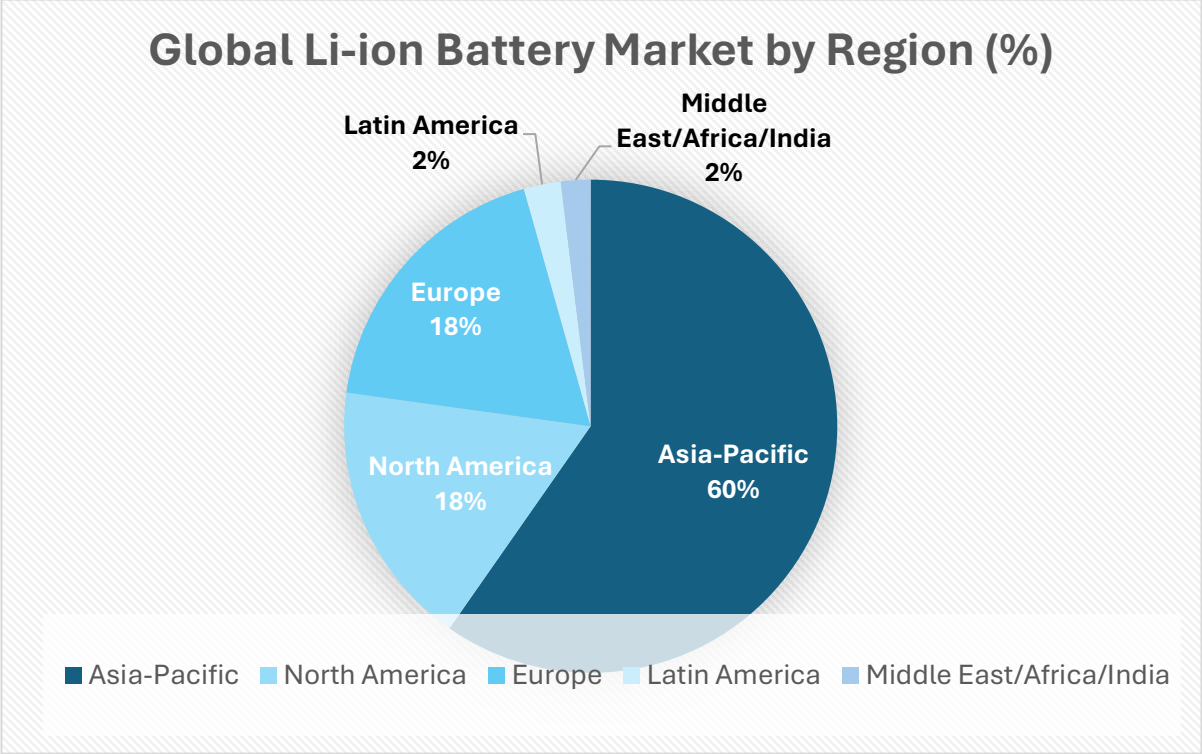
**Yhteenveto lopuksi:** Kiinan strateginen panostus toimitusketjujen integraatioon ja akkukemian innovaatioihin on mahdollistanut sen, että maa pystyy jatkuvasti tarjoamaan akkuja globaalia keskihintaa edullisemmin. Nämä dynamiikat vahvistavat Kiinan markkinajohtajuutta ja asettavat vertailutason, jota muut valmistajat pyrkivät saavuttamaan.

**Key Take Away:**
**Kiinan etu akuston hinnassa:**

**Kiina Pack hinta:** USD84/kWh *(22% alle globaalin keskiarvon)*
**Globaali keskim. Pack hinta:** USD108/kWh
**LFP kenno hinta (Kiina):** USD36/kWh
**LFP Pack hinta (Kiina):** USD50/kWh
**2030 Globaali kennohintaennuste:** USD61–73/kWh

## 3. Keskeiset maantieteelliset markkinat, segmentit ja akkukemiat

**Maantieteelliset markkinaosuudet:** Vuonna 2025 Aasian ja Tyynenmeren alue (APAC) säilytti asemansa maailman suurimpana litiumioniakkujen markkina-alueena, vastaten noin 60 %:sta kokonaisliikevaihdosta [14] (kuva 4). Kiina on edelleen hallitseva toimija, vastaten lähes 69 %:sta maailman sähköajoneuvojen akkukäyttöönotosta vuoden loppuun mennessä [24, 28, 29]. Kiinan valmistusekosysteemin mittakaava ja integraatio tukevat sen johtavaa asemaa, tehden alueesta ensisijaisen globaalin tuotantokeskittymän sekä kennovalmistuksessa että sähköajoneuvojen myynnissä.




**Kuva 4:** Globaali litiumioniakkujen markkinaosuudet alueittain (%) 24, 28-33]. Luvut on laskettuja keskiarvoja lähteissä esitetyistä luvuista.

Pohjois-Amerikka ja Eurooppa muodostavat seuraavan tason markkinakoon ja vaikutusvallan suhteen (Kuvio 4). Vuonna 2025 Yhdysvaltojen markkinan arvoksi arvioitiin 32,4 miljardia dollaria [28, 30, 32], mikä kuvastaa nopeaa kasvua, jota ovat vauhdittaneet erityisesti politiikkatoimet, kuten Inflation Reduction Act (IRA), joka on lisännyt investointeja kotimaisiin akkutehtaisiin. Tästä kasvusta huolimatta sekä Pohjois-Amerikka että Eurooppa kärsivät merkittävistä rakenteellisista alitarjonnoista, joiden on arvioitu olevan noin 50 GWh ja 70 GWh vastaavasti [33].

Euroopassa kysyntä on erityisen vahvaa korkealaatuisten sähköajoneuvojen osalta, joissa käytetään nikkeli-mangaani-koboltti (NMC) -kemiaa. Alueella keskitytään strategisesti ympäristön kannalta kestäviin, niin

sanottuihin "vihreisiin" akkutoimitusketjuihin. Euroopan markkina-arvoksi arvioidaan 33,32 miljardia dollaria vuodelle 2026, mikä tekee siitä merkittävän toimijan globaalissa akkuteollisuudessa, vaikka se jääkin edelleen jälkeen Aasian ja Tyynenmeren alueesta kokonaismarkkinaosuuden osalta [28, 31].

Latinalainen Amerikka toimii pääasiassa raaka-aineiden toimittajana. "Litiumkolmio" – Argentiinan, Bolivian ja Chilen alueet – muodostaa keskeisen litiumin lähteen globaalille akkutuotannolle. Alueen kokonaismarkkina-arvo on 3,24 miljardia dollaria vuonna 2026, mikä kuvastaa sen merkitystä raaka-ainelähteenä pikemminkin kuin tuotanto- tai kulutusalueena [28, 32].

Lähi-itä, Afrikka ja Intia ovat nousemassa tärkeiksi markkinoiksi erityisesti kiinteiden energiavarastojen ja mikromobiiliratkaisujen osalta. Näiden alueiden kasvu perustuu kasvaviin investointeihin suurmittakaavaisiin energiavarastoihin sekä sähköajoneuvojen yleistymiseen kaupunki- ja esikaupunkiliikenteessä. Vaikka markkinakoot ovat vielä suhteellisen pieniä, energiavarastoinnin infrastruktuurin laajeneminen viittaa siihen, että näiden alueiden merkitys kasvaa tulevaisuudessa [28–29].

**Markkinasegmentit ja kasvun ajurit:** Autoteollisuus on edelleen litiumioniakkujen markkinoiden keskeinen veturi, vastaten noin 90 %:sta globaalista kysynnästä [34–35] (taulukko 1). Sähköhenkilöautojen vuosimyyntien odotetaan nousevan 42 miljoonaan yksikköön, mikä kuvastaa voimakasta kasvua [36]. Erityisesti sähkökuorma-autojen osuuden odotetaan kolminkertaistuvan, kattaen 8 % sähköajoneuvojen akkukysynnästä [37].

Keskeisiä kasvun ajureita ovat:

- Hintapariteetin saavuttaminen: tavoitteena akkujen hinnan lasku 80 USD/kWh tasolle vuoteen 2030 mennessä.
- Akkuteknologian standardointi: pyritään yhtenäistämään ratkaisuja laajamittaisen käyttöönoton helpottamiseksi [38–40].

**Taulukko 1:** Litiumioniakkujen markkinasegmentit ja niiden kehitysennusteet [34-40].

| Segmentti | 2020 Markkinakoko (USD) billion | 2025/2026 Markkinakoko (USD) billion |
|---|---|---|
| KokoLi-ioni markkina | **36,7** | **134 – 166** |
| Sähköauto (EVs) | 20 | 70– 90 |
| Energiavarasto (ESS) | 3,5 | 25 – 41 |
| Kuluttajaelektroniikka | 10 | 24 – 30 |

Vuoteen 2030 mennessä sähköajoneuvosegmentin odotetaan kasvavan kolmesta viiteen kertaiseksi nykyiseen verrattuna. Energiavarastosektorin arvioidaan vähintään kaksinkertaistuvan, ja kulutuselektroniikan segmentin odotetaan myös kaksinkertaistuvan [41–42]. Tämä kasvu perustuu

ympäristöpolitiikan kiristymiseen, kustannuspariteetin saavuttamiseen perinteisiin teknologioihin nähden sekä tukevan infrastruktuurin nopeaan kehitykseen [34, 43].

Tiukentuvat päästörajoitukset ja kohdennetut kannustimet, kuten Yhdysvaltojen IRA ja EU:n Green Deal, vauhdittavat sekä henkilö- että hyötyajoneuvokaluston sähköistymistä [35, 43]. Samaan aikaan uusiutuvan energian, kuten aurinko- ja tuulivoiman, nopea käyttöönotto lisää tarvetta suurikapasiteettisille litiumioniakkujen energiavarastoille (BESS), jotka vakauttavat sähköverkkoja. Suurten energiavarastojen asennusmäärien ennustetaan nousevan 18,2 gigawattiin vuodessa, kun fossiilisiin polttoaineisiin perustuvia huippuvoimaloita korvataan [35, 41].

Kustannusten aleneminen on ollut keskeinen tekijä tässä siirtymässä. Litium-rautafosfaatti (LFP) -kemiat kattavat nyt yli 52 % globaalista markkinaosuudesta. Akkupakettien keskihinnat lähestyvät 100 USD/kWh tasoa, mikä tekee sähköajoneuvoista yhä kilpailukykyisempiä polttomoottoriajoneuvoihin verrattuna [39, 44]. Henkilöautojen lisäksi myös sähkökuorma-autojen ja -pakettiautojen osuuden odotetaan kasvavan merkittävästi vuoteen 2030 mennessä [37].

Vaikka kehityssuunta on positiivinen, litiumioniakkuteollisuus kohtaa useita systeemisiä riskejä, jotka voivat estää vuoden 2030 tavoitteiden saavuttamista [34, 45]. Yksi keskeinen huolenaihe on toimitusketjujen epätasapaino: kriittisten raaka-aineiden, kuten litiumin ja nikkelin, kysynnän odotetaan ylittävän tarjonnan, mikä voi johtaa rakenteellisiin alijäämiin vuosina 2029–2030, koska uusien kaivosten käyttöönotto vie aikaa [34, 46–47].

Geopoliittinen keskittyminen on toinen merkittävä riski. Kiina hallitsee edelleen alaa, vastaten noin 80 %:sta akkukemikaalien jalostuksesta ja 56 %:sta koko litiumioniakkujen markkina-arvosta. Tämä keskittyminen luo strategisia haavoittuvuuksia erityisesti länsimaisille valmistajille [45, 48].

Kestävyys ja kierrätys ovat myös keskeisiä huomioitavia tekijöitä. Globaali akkujen kierrätyskapasiteetti on ennustettu ylittävän 1 500 GWh vuoteen 2030 mennessä. Kaupunkikaivostoiminnan laajentaminen on olennaista raaka-aineiden saatavuuden turvaamiseksi pitkällä aikavälillä [41, 49].

Lopuksi, vaihtoehtoisten akkuteknologioiden esiinmarssi muodostaa kilpailuhaasteen. Natriumioni- ja kiinteäelektrolyyttiset akut kasvavat 26,9 %:n vuotuisella kasvuvauhdilla. Nämä teknologiat voivat tulevaisuudessa rajoittaa litiumioniakkujen hallitsevaa asemaa sekä kustannusherkissä että huipputehokkuutta vaativissa markkinasegmenteissä [41, 45].

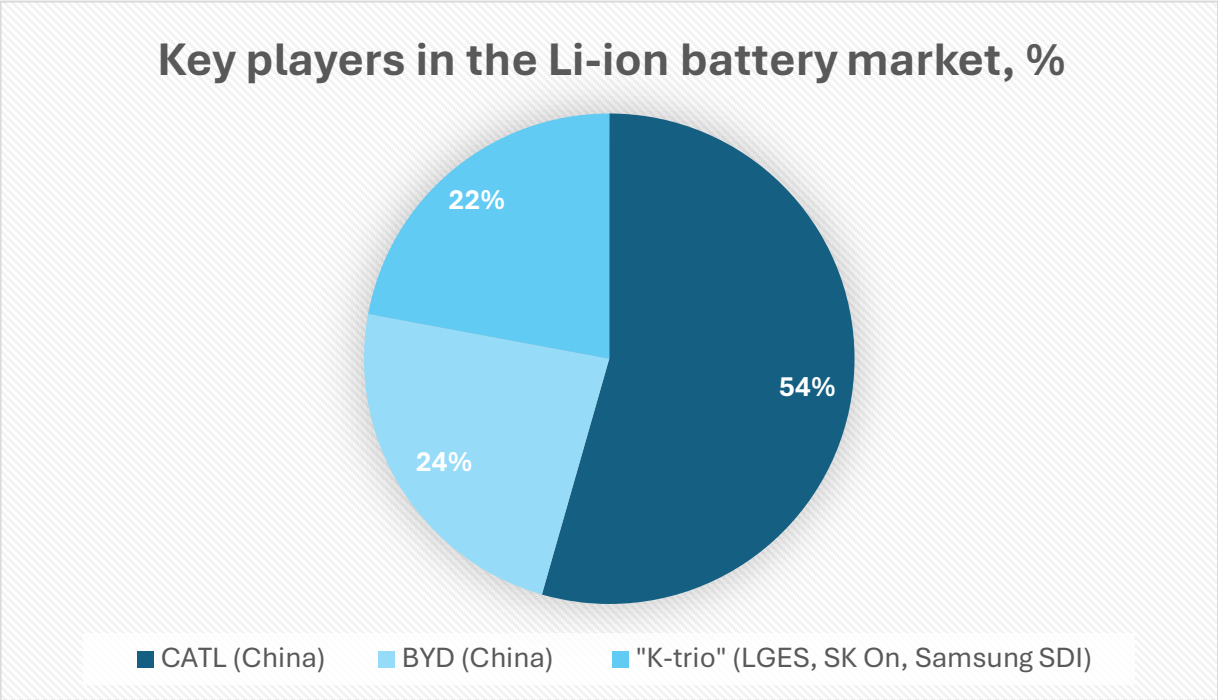
**Akkukemiat:** Markkinoita hallitsee kahden kemian duopoli: litium-rautafosfaatti ($LiFePO_4$, LFP) ja nikkeli-mangaani-koboltti ($LiNixMnyCozO_2$, NMC). Vuonna 2025 LFP nousi maailmanlaajuiseksi volyymijohtajaksi, kattaen yli 50 % sähköajoneuvojen akkukäyttöönotosta [50]. Kiinassa LFP:n markkinaosuus on jo 80 %, kun taas NMC kattaa edelleen 50–60 % asennuksista Pohjois-Amerikassa ja Euroopassa [51–52].

Strategisia valintoja ohjaavat muun muassa:

- Kuluttajien odotukset toimintamatkasta (yli 400 km),
- NMC:n parempi suorituskyky matalissa lämpötiloissa (toimii tehokkaasti jopa –30 °C:ssa),
- Korkean energiatiheyden tarve erityisesti suorituskykyisissä SUV-ajoneuvoissa [53–55].

## 4. Keskeiset toimijat, raaka-aineet ja arvoketjuintegraatio

**Keskeiset toimijat:** Contemporary Amperex Technology Co. Limited (CATL) Kiinasta jatkaa maailmanlaajuisen sähköajoneuvojen (EV) akkusektorin hallintaa, pitäen hallussaan noin 54 %:n markkinaosuutta [56–57] (Kuva 5). Myös kiinalainen BYD on toisella sijalla, noin 24 %:n osuudella [56–57]. Etelä-Korean johtavat valmistajat – LG Energy Solution (LGES), SK On ja Samsung SDI – muodostavat niin sanotun "K-trion", jonka yhteenlaskettu markkinaosuus on noin 22 % [56, 58].




**Kuva 5**: Litiumioniakkujen markkinoiden keskeiset toimijat (%) [56 - 58].

**Mineraalit ja strateginen asemoituminen arvoketjun alkupäässä:** Raaka-aineiden osalta Australia on maailman johtava litiumin tuottaja, vastaten 52 %:sta globaalista tuotannosta. Chile seuraa 22 %:n osuudella [61–62]. Koboltin osalta Kongon demokraattinen tasavalta (DRC) on ylivoimainen toimija, tuottaen yli 70 % maailman koboltista. Kiina hallitsee koboltin jalostusta, vastaten lähes 80 %:sta maailman kapasiteetista joko suoran omistuksen tai operatiivisen kontrollin kautta [62–63]. Nikkelin osalta Indonesia on suurin tuottaja, vastaten 33 %:sta maailman tuotannosta [62–63].

**Arvoketjuintegraatio:** Alan kilpailudynamiikkaa muokkaa yhä enemmän siirtymä horisontaalisista kokoonpanomalleista kohti kattavaa vertikaalista integraatiota. Valmistajat pyrkivät tällä tavoin pienentämään katteita ja vahvistamaan toimitusketjujen resilienssiä [59].

Vertikaalinen integraatio on noussut keskeiseksi strategiaksi yrityksille kuten BYD ja Tesla, jotka valmistavat sekä ajoneuvot että akkukennot itse [56, 60]. Vastauksena tähän länsimaiset alkuperäisvalmistajat (OEM) ovat muodostaneet vertikaalisia alliansseja – esimerkiksi General Motorsin ja LGES:n kumppanuus – varmistaakseen pitkäaikaisen akkukennotoimitusten saatavuuden [61]. Hallitsemalla koko arvoketjua kaivosoikeuksista ajoneuvojen kokoonpanoon asti nämä yritykset voivat suojautua valuuttakurssien vaihteluilta ja varmistaa pääsyn kriittisiin mineraaleihin [61, 63].

Toisaalta horisontaaliset allianssit ovat edelleen yleisiä eurooppalaisten startup-yritysten keskuudessa. Nämä yritykset keskittyvät usein erikoistuneisiin markkinasegmentteihin, mutta kohtaavat suurempia katteisiin kohdistuvia paineita, koska niillä on rajallinen kontrolli raaka-aineiden saatavuuteen [64–65].

Akkuteollisuuden arvoketju on nopeasti keskittymässä suurten toimijoiden käsiin, jotka hallitsevat sekä tuotantoa että raaka-aineiden hankintaa. Kiinan ylivoimainen asema jalostuksessa ja Etelä-Korean vahva asema valmistuksessa tekevät näistä maista keskeisiä toimijoita. Vertikaalinen integraatio on osoittautunut tehokkaaksi strategiaksi toimitusvarmuuden ja kustannustehokkuuden varmistamisessa, ja se on yleistymässä myös länsimaisten valmistajien keskuudessa.

## 5. Kiertotalous: kierrätys ja toisen elinkaaren markkinat

Vuosien 2022 ja 2025 välillä kiertävät akkuekosysteemit – mukaan lukien akkujen kierrätys ja sähköajoneuvojen (EV) akkujen toisen elinkaaren uudelleenkäyttö – laajenivat laboratoriomittakaavan pilottihankkeista monen miljardin dollarin teolliseksi infrastruktuuriksi, kun ensimmäinen suuri massamarkkinoiden sähköautojen akkujen sukupolvi saavutti käyttöikänsä lopun [66].

### 5.1 Markkinakoko: toisen elinkaaren uudelleenkäyttö vs. kierrätys

Akkutuotteiden elinkaaren lopun hallinta on globaalisti rakenteellisen muutoksen keskellä. Aiemmin valinta toisen elinkaaren uudelleenkäytön ja suoran kierrätyksen välillä oli vapaaehtoinen markkinapäätös, jota ohjasivat raaka-aineiden hintavaihtelut. Nyt ollaan siirtymässä tiukasti säänneltyyn teolliseen malliin. Tämän muutoksen kärjessä on EU:n sääntelyn globaali vaikutus, niin kutsuttu "Brysselin vaikutus", joka pakottaa valmistajat maailmanlaajuisesti yhdenmukaistamaan tuotanto- ja kierrätysstrategiansa säilyttääkseen pääsyn Euroopan markkinoille [67–68].

Toisen elinkaaren EV-akkujen maailmanlaajuisen markkinan arvoksi arvioidaan tällä hetkellä noin 0,5–1 miljardia Yhdysvaltain dollaria [69–70]. Kun ensimmäinen suuri sähköautojen akkujen sukupolvi poistuu käytöstä, koko kiertotalousmarkkinan ennustetaan kasvavan kymmeniin miljardeihin dollareihin vuoteen 2030 mennessä (taulukko 2). Asiantuntijat ovat eri mieltä siitä, kumpi tulee hallitsemaan: toisen elinkaaren

uudelleenkäyttö vai suora kierrätys. Osa pitää uudelleenkäyttöä tärkeänä siltana BESS-sovelluksille, kun taas toiset uskovat, että kennokemian nopea kehitys ja vanhojen moduulien kunnostamisen korkeat kustannukset tekevät suorasta kierrätyksestä hallitsevan vaihtoehdon [71–72]. Menetelmistä riippumatta kaikki lähteet ovat yhtä mieltä siitä, että markkinat kasvavat nopeasti, kun yhä useammat EV-akut tulevat uudelleenkäytettäviksi.

**Taulukko 2:** Globaali toisen elinkaaren EV-akkujen markkinadata, 2020–2025 [4, 69-70, 73-74, 76-79].

| Metric | Second-Life Battery Market (Reuse of Retired EV Batteries) | Li-ion Battery Recycling Market (Material Recovery from EOL Batteries) |
|---|---|---|
| **2024 Market Value, USD Billion** | **0,5–1 billion** (est.) | **22,8 billion** |
| **2030-2035 Market Value, USD billion (Forecast)** | **9,9 billion** | **41,7 billion** |
| | Up to $40–55 billion by 2035 (long-term scenarios) | *(continued growth as EV retirements rise)* |
| **Battery Volume in 2025** | ~ **25–30 GWh** repurposed worldwide *(~hundreds of thousands of retired EV packs)* | ~ **144 000 tonnes** recycled (est.) |
| | | *(incl. manufacturing scrap; ≈12% of world capacity)* |
| **Battery Volume in 2030** | **185 GWh** available for reuse (est.) | **1,4 million tonnes** entering recycling (~several hundred GWh) |
| | High-case: 330–350 GWh | Global recycling capacity ~2 Mt/year |

Kuten taulukosta 2 käy ilmi, toisen elinkaaren EV-akkujen markkinan arviot vaihtelevat muutamasta miljardista kymmeniin miljardeihin dollareihin seuraavan vuosikymmenen aikana. Erot johtuvat muun muassa markkinamäärittelystä, käyttöönoton ajoituksesta, uudelleenkäytön ja kierrätyksen taloudellisista suhteista sekä alueellisista ja poliittisista tekijöistä. Koska toisen elinkaaren akkumarkkina on vielä uusi, analyytikot mallintavat käytännössä erilaisia tulevaisuuksia. Osa näkee kehityksen hitaana ja rajoittuneena teknisten ja taloudellisten haasteiden vuoksi, kun taas toiset – mukaan lukien markkinatutkimuslaitokset ja teollisuusjärjestöt – ennustavat nopeaa skaalausta sähköautojen yleistymisen myötä. EU:n akkusäädöksen (2023/1542) käyttöönotto lopettaa osan tästä spekulaatiosta asettamalla selkeät materiaalien

talteenottotavoitteet, kuten 80 %:n litiumin talteenottovaatimuksen vuoteen 2031 mennessä [67, 80]. Nämä velvoitteet sekä laajennetun tuottajavastuun (EPR) virallistaminen sisällyttävät elinkaaren lopun kustannukset tuotteen alkuperäiseen hintarakenteeseen, mikä suosii tehokkaita kierrätysratkaisuja pitkän aikavälin uudelleenkäytön sijaan [68, 81].

Toisaalta litiumioniakkujen kierrätysmarkkina on jo nyt monen miljardin dollarin teollisuudenala. Vuonna 2024 kaikkien akkukemioiden kierrätysmarkkinan arvoksi arvioitiin noin 22,75 miljardia dollaria [74]. Tämän odotetaan lähes kaksinkertaistuvan vuoteen 2030 mennessä, jolloin markkinan arvoksi ennustetaan noin 41–42 miljardia dollaria [74], mikä vastaa noin 10–11 %:n vuotuista kasvuvauhtia. Suurin osa tästä arvosta tulee litiumioniakkujen kierrätyksestä, joka muodosti noin 14,9 miljardia dollaria eli 64 % koko kiertotalousmarkkinan arvosta vuonna 2024 [77].

Akkukapasiteetin näkökulmasta toisen elinkaaren sektori on vasta alussa, kun taas kierrätys käsittelee jo nyt huomattavasti suurempia määriä käytöstä poistettuja akkuja. Vuonna 2025 arvioidaan, että noin 25–30 GWh sähköautojen akkuja otettiin uudelleen käyttöön toisen elinkaaren sovelluksissa maailmanlaajuisesti [73]. Tämän määrän odotetaan kasvavan merkittävästi ja saavuttavan jopa 330–350 GWh vuodessa vuoteen 2030 mennessä suotuisissa olosuhteissa (noin 65 %:n vuotuinen kasvuvauhti) [73, 79]. Toisen analyysin mukaan realistisempi arvio on noin 185 GWh käytettyjä EV-akkuja uudelleenkäytettävissä vuonna 2030 [73]. Erot johtuvat epävarmuudesta EV-akkujen poistumismäärissä ja siitä, kuinka suuri osa niistä on taloudellisesti kannattavaa uudelleenkäyttöön.

Vertailun vuoksi: kierrätysala käsitteli 2010-luvun lopulla vain muutamia GWh:n verran litiumioniakkuja vuodessa, mutta volyymit kasvavat nyt nopeasti. Vuonna 2018 kierrätettiin maailmanlaajuisesti noin 97 000 tonnia litiumioniakkuja (kulutuselektroniikasta, EV:istä jne.), mikä vastaa noin 15–20 GWh:n kapasiteettia. Kiina ja Etelä-Korea käsittelivät suurimman osan tästä määrästä [73]. 2020-luvun puoliväliin mennessä maailmanlaajuinen kierrätysinfrastruktuuri on laajentunut käsittelemään noin 2 miljoonaa tonnia akkurojua vuodessa (kaikki kemiat) – tästä kapasiteetista noin 85 % sijaitsee Kiinassa [4]. Käytännössä kierrätettyjen akkujen määrä on vielä selvästi kapasiteettia pienempi, mutta kasvaa tasaisesti, kun yhä useammat akut saavuttavat elinkaarensa lopun.

Vuoteen 2030 mennessä noin 1,4 miljoonan tonnin verran käytettyjä EV-akkuja odotetaan päätyvän kierrätykseen vuosittain – tämä materiaalimäärä vastaa useiden satojen GWh:n akkukapasiteettia vuodessa (riippuen keskimääräisestä pakettien energiatiheydestä) [77]. Alan ennusteet arvioivat, että vuosittainen litiumioniakkujen jäte voi nousta yli 8 miljoonaan tonniin vuoteen 2040 mennessä, kun globaali sähköautokanta kypsyy. Tämä korostaa kierrätyksen keskeistä roolia akkujen toimitusketjussa [77].

Toisen elinkaaren ja kierrätysmarkkinat palvelevat eri mutta toisiaan täydentäviä rooleja akkujen ekosysteemissä. Tällä hetkellä kierrätys on arvoltaan huomattavasti suurempi kuin uudelleenkäyttö, koska se perustuu olemassa oleviin jätevirtoihin (erityisesti lyijyakut ja tuotannon ylijäämä) sekä arvokkaiden materiaalien talteenoton kiireellisyyteen.

Maantieteellisesti kierrätysmarkkinaa hallitsee Aasian ja Tyynenmeren alue: vuonna 2024 alue vastasi noin 57 %:sta globaalista akkujen kierrätyksen liikevaihdosta, mikä johtuu Kiinan aggressiivisista kierrätysohjelmista ja suuresta syöttövirrasta. Pohjois-Amerikan ja Euroopan osuudet olivat kumpikin noin 15–20 % [74].

Toisen elinkaaren akkujen uudelleenkäyttö on vasta käynnistymässä ja kattaa tällä hetkellä vain pienen osan käytöstä poistetuista akuista, sillä monet EV-akut päätyvät suoraan kierrätykseen. Uudelleenkäyttöä edistävät pilottihankkeet Euroopassa, Kiinassa ja Pohjois-Amerikassa hyödyntävät akkuja, joiden kapasiteetista on jäljellä vielä noin 70–80 %. Näitä käytettyjä akkuja otetaan käyttöön kiinteistöjen energiavarastoina uusiutuvan energian integrointiin, varavoimana (esim. dieselgeneraattoreiden korvaajina) ja muihin vähemmän vaativiin sovelluksiin. Tällainen uudelleenkäyttö lykkää kierrätystä ja tarjoaa kustannussäästöjä: uudelleenkäytetty EV-akku voi olla 30–70 % edullisempi per kWh kuin uusi akku tietyissä tapauksissa [79].

### 5.2 Haasteet ja "suoraan kierrätykseen" -dilemma

Useat tekijät rajoittavat tällä hetkellä toisen elinkaaren akkumarkkinan kasvua. Ensinnäkin uusien akkujen hintojen nopea lasku – esimerkiksi uusien LFP-kennojen hinnat laskivat Kiinassa jo 30–50 USD/kWh tasolle vuoteen 2024 mennessä – on merkittävästi heikentänyt käytettyjen akkujen taloudellista etua. Tämä tekee niistä vain hieman edullisempia kuin uudet akut, mikä vähentää ostohalukkuutta [79]. Vuoteen 2025 mennessä toisen elinkaaren akkujen kustannusedun odotetaan laskevan 70 %:sta vain 25 %:iin vuoteen 2040 mennessä [54].

Toinen merkittävä haaste on tekninen "informaation epäsymmetria", joka liittyy akun kunnon (State of Health, SOH) arviointiin [68, 80]. Alkuperäiset laitevalmistajat (OEM) eivät usein jaa akkujen hallintajärjestelmien (BMS) omistamia tietoja, mikä pakottaa toisen elinkaaren toimijat turvautumaan aikaa vievään manuaaliseen testaukseen. Tämä tekee kierrätyksestä usein houkuttelevamman vaihtoehdon kuin uudelleenkäyttö [77–82].

Tämä tiedon epäsymmetria on kuitenkin poistumassa digitaalisen akkupassin myötä, joka tulee pakolliseksi helmikuussa 2027 [67]. QR-koodin kautta saatava varmennettu suorituskyky- ja kuntotieto poistaa epävarmuuden, joka on aiemmin estänyt käytettyjen akkujen kaupan. Samalla tämä läpinäkyvyys kuitenkin myös kiihdyttää "suoraan kierrätykseen" -kehitystä: koska valmistajien on täytettävä pakolliset kierrätyssisältövaatimukset uusissa akuissa (esim. litiumin, koboltin ja nikkelin osalta) vuoteen 2031 mennessä, heillä on oikeudellinen kannustin ottaa käytetyt akut takaisin mahdollisimman nopeasti sen sijaan, että ne jäisivät pitkäksi aikaa toisen elinkaaren käyttöön [67–68, 81].

Näin ollen kiertotalous kehittyy kohti "suljetun kierron" teollista järjestelmää, jossa valmistajan ja kierrättäjän välinen raja hämärtyy. Geopoliittisesti tämä muutos on elintärkeä erityisesti EU:n kaltaisille alueille, jotka pyrkivät vähentämään riippuvuuttaan tuoduista raaka-aineista luomalla kotimaisen "kaupunkikaivoksen" kriittisille mineraaleille korkean hyötysuhteen kierrätyksen avulla [68, 82]

# 6. Akkuenergiavarastojen (BESS) markkinat

Akkuenergiavarastojen (Battery Energy Storage System, BESS) sektori on noussut keskeiseksi osaksi maailmanlaajuista sähköverkon modernisointia. Markkinan kokonaisarvon ennustetaan kolminkertaistuvan vuoteen 2030 mennessä, saavuttaen noin 120–150 miljardin Yhdysvaltain dollarin tason [83–86]. Kasvua tukee BESS-järjestelmien laajeneva rooli sähköjärjestelmien tasapainottamisessa uusiutuvan energian käyttöönoton kiihtyessä.

## 6.1 Suurmittakaavaiset BESS-sovellukset ja verkkoon integrointi

Suurmittakaavaiset, verkon etupuolelle (Front-of-the-Meter, FTM) sijoitetut asennukset hallitsevat tällä hetkellä BESS-markkinoita. Näiden suurten FTM-hankkeiden odotetaan muodostavan noin 86 % koko BESS-markkinoiden tuloista vuoteen 2030 mennessä [84]. Niiden kasvu perustuu pitkälti tarpeeseen integroida vaihtelevaa uusiutuvaa sähköntuotantoa: vuoteen 2030 mennessä aurinko- ja tuulivoiman kaltaisten epävakaiden lähteiden arvioidaan kattavan lähes 30 % maailman sähköntuotannosta, mikä edellyttää laajaa varastointikapasiteettia tuotannon vaihteluiden tasaamiseksi [84].

Tämän seurauksena BESS-teollisuus kehittyy perinteisistä verkon tukipalveluista kohti monimutkaisempia, ohjelmistopohjaisia energianhallintastrategioita sekä suurissa että pienissä sovelluksissa. Erityisesti verkkomittakaavaisissa järjestelmissä tulorakenne on siirtymässä pois pelkistä oheispalveluista (kuten taajuuden säätö) kohti energian arbitraasia. Esimerkiksi Texasin ERCOT-sähkömarkkinoilla akkuoperaattorit lisäsivät merkittävästi energian arbitraasin käyttöä – lataamalla akkuja silloin kun hinnat ovat alhaalla ja purkamalla niitä korkeiden hintojen aikaan – niin, että arbitraasi kasvoi lähes 60 %:iin BESS-projektien kokonaistuloista vuonna 2024 [87–89].

Näiden energiansiirtosovellusten liiketoimintapotentiaalia on vahvistanut kustannusten nopea lasku: esimerkiksi suurten BESS-järjestelmien kokonaisasennuskustannukset laskivat noin 31 % vuonna 2025, mikä paransi merkittävästi investointien kannattavuutta [2].

## 6.2 Kulutuspisteen takaisen BESS:n kasvu (asuin- ja liikekiinteistöjen varastointi)

Kulutuspisteen takainen (Behind-the-Meter, BTM) segmentti – joka kattaa asuinrakennusten sekä kaupallisten ja teollisten kiinteistöjen omat akkuasennukset – on kasvanut tasaisesti ja sen odotetaan kasvavan noin 13–14 % vuosittain vuoteen 2030 saakka [89].

Euroopassa asuinrakennusten akkujen kumulatiivinen asennettu kapasiteetti oli arviolta 6,9 gigawattia vuonna 2024, ja pelkästään Saksa vastasi noin 58 %:sta tästä kokonaisuudesta, mikä tekee siitä selvästi suurimman BTM-varastointimarkkinan alueella [85, 90]. Italia muodostaa merkittävän osan jäljelle jäävästä kapasiteetista [91].

Useat taloudelliset ja poliittiset tekijät ovat vauhdittaneet BTM-varastoinnin käyttöönottoa näissä johtavissa markkinoissa:

- Ensinnäkin korkeat sähkön vähittäishinnat maissa kuten Italiassa ja Saksassa ovat tehneet kiinteistökohtaisesta energiavarastoinnista taloudellisesti houkuttelevaa. Viimeaikaisen energiakriisin aikana italialaiset kotitaloudet maksoivat sähköstä jopa 0,69 €/kWh, kun taas Saksassa hinnat nousivat noin 0,41 €/kWh:iin – Euroopan korkeimmiksi [90, 92–93]. Nämä hintapiikit lisäsivät merkittävästi kannustimia hyödyntää edullisempaa aurinkosähköä mahdollisimman tehokkaasti akkuvarastoinnin avulla.

- Toiseksi valtion tukiohjelmat ovat suoraan tukeneet BTM-akkuinvestointeja. Esimerkiksi Italian "Superbonus 110 %" -verohyvitys mahdollisti kotitalouksille aurinkopaneelien ja kotitalousakkujen asennuskustannusten 110 %:n vähennyksen verotuksessa [91]. Tämä antelias ohjelma johti arviolta 240 %:n kasvuun Italian asuinrakennusten akkumarkkinassa sen alkuvaiheen käyttöönoton aikana [93–94].

- Saksassa varastointia on tuettu muun muassa arvonlisäverovapautuksilla kotitalousakkujärjestelmille sekä tuloverovapautuksilla aurinko–akku-yhdistelmille [93–95].

Nämä tekijät ovat johtaneet poikkeuksellisen korkeisiin akkujen liitettävyysasteisiin uusissa aurinkosähköasennuksissa. Saksassa arviolta 79–90 % uusista asuinrakennusten kattoaurinkojärjestelmistä sisältää nykyään integroidun akun, mikä kuvastaa sekä taloudellisia hyötyjä että kulttuurista mieltymystä energian omavaraisuuteen ja riippumattomuuteen epävakaista sähkön hinnoista [91, 93]. Samankaltaisia trendejä on havaittavissa myös Italiassa, jossa korkeat sähkön hinnat ja vahvat kannustimet ovat kannustaneet kotitalouksia yhdistämään aurinkopaneelit akkujärjestelmiin [92, 94].

### 6.3 Hajautetun varastoinnin esteet

Vaikka kulutuspisteen takainen (BTM) segmentti kasvaa nopeasti, sen laajentumista hidastavat useat systeemiset esteet [95–98]. Yksi keskeinen haaste on vanhentuneiden sääntelykäytäntöjen jatkuminen, jotka eivät ole alun perin suunniteltu energian varastointia varten. Saksassa esimerkiksi asuin- ja liikekiinteistöjen akut luokitellaan edelleen tavallisiksi "sähkönkuluttajiksi", mikä tarkoittaa, että niihin sovelletaan verkkokuluja ja maksuja (kuten liityntämaksuja, saksaksi Baukostenzuschuss, BKZ), joita yleensä peritään vain loppukäyttäjiltä [95].

Lisäksi monilla lainkäyttöalueilla sääntely ei ole vielä ottanut huomioon akkuvarastojen kaksinkertaista roolia sekä sähkön kuluttajana että tuottajana. Tämä on johtanut tilanteisiin, joissa sähkö, joka ensin otetaan verkosta ja myöhemmin puretaan takaisin verkkoon akun kautta, joutuu maksamaan siirtomaksut tai verot kahteen kertaan. Vaikka jotkut maat ovat alkaneet korjata tätä – esimerkiksi Romania on äskettäin ottanut käyttöön vapautuksia, joiden mukaan BESS-järjestelmiin varastoitua energiaa ei veloiteta uudelleen, kun se syötetään takaisin verkkoon – monilta alueilta puuttuu edelleen selkeä määritelmä varastoinnista energialaissa. Tämä johtaa epävarmoihin tai epäedullisiin maksukäytäntöihin BTM-akkujen omistajille [94].

Toinen pullonkaula liittyy verkkoliityntöjen menettelyihin. Joillakin markkinoilla uusien projektien verkkoliityntöjen jakaminen on muodostunut ongelmaksi. Saksassa esimerkiksi päätös luopua pitkäaikaisesta “first come, first served” -periaatteesta suurten energiahankkeiden liittämisessä loi sääntelyllisen tyhjiön. Koska korvaavaa mekanismia ei ole määritelty selkeästi, kehittäjät kohtaavat nyt laajoja liityntäjonoja, joissa passiiviset tai spekulatiiviset hankkeet varaavat liityntäpaikkoja ja estävät elinkelpoisten BESS-hankkeiden etenemisen [99–101]. Tehoton verkkoliityntöjen hallinta voi viivästyttää tai estää uusien akkuasennusten toteutumista.

Myös politiikkakannustimet voivat joskus olla ristiriidassa varastoinnin käyttöönoton kanssa. Anteliaat netotusohjelmat – kuten Alankomaiden aiemmin käyttämä malli – hyvittävät pienille aurinkosähkön tuottajille verkkoon syötetyn sähkön täyden vähittäishinnan mukaan, jolloin sähköverkko toimii käytännössä ilmaisena akkuna. Vaikka tämä on lyhyellä aikavälillä hyödyllistä aurinkosähkön tuottajille, se poistaa suuren osan taloudellisesta motivaatiosta investoida fyysiseen varastointiin, koska ylimääräinen aurinkosähkö voidaan myydä verkkoon korkealla hinnalla [93]. Vasta kun tällaisia politiikkoja muutetaan – Alankomaat esimerkiksi aikoo poistaa täyden netotuksen vuoteen 2027 mennessä – syntyy taloudellinen vetovoima akkujen lisäämiselle, usein siirtymällä netotuksesta nettilaskutukseen, jossa verkkoon syötetystä sähköstä maksetaan alhaisempi tukkumarkkinahinta. Nettilaskutus luo vahvempia kannustimia paikalliseen varastointiin, koska kuluttajat hyötyvät enemmän itse käyttämästään varastoidusta energiasta (välttäen korkeammat vähittäishinnat) kuin myymällä sen verkkoon alihintaan [100].

Tekniset ja standardointiin liittyvät ongelmat muodostavat lisäesteitä. Kiinteiden akkujen turvallisuus- ja suorituskykystandardit ovat olleet hajanaisia; vasta EU:n uuden akkusäädöksen (2023) myötä otettiin käyttöön kattava eurooppalainen standardi, joka kattaa kaikki tarvittavat turvallisuustestit kotitalous- ja liikekiinteistöjen energiavarastojärjestelmille [96–97]. Samoin yleisesti hyväksyttyjen protokollien puute akkujen hallintajärjestelmille (BMS) ja tiedonsiirrolle johtaa “datasiiloihin” eri valmistajien laitteiden välillä, mikä vaikeuttaa monitoimittajajärjestelmien yhteensopivuutta ja estää BTM-akkujen aggregointia verkon palveluihin [98, 102].

Tämä tekninen pirstaleisuus näkyy myös markkinatarjonnassa: monet pohjoisamerikkalaiset ja eurooppalaiset yritykset keskittyvät korkealaatuisiin, verkon kannalta kriittisiin ratkaisuihin, kun taas aasialaiset valmistajat hallitsevat kustannusherkkiä, modulaarisia akkumalleja [98, 102].

Lopuksi, kehittyneiden verkon palveluiden hyödyntäminen kulutuspisteen takaisilla akuilla (kuten reaaliaikainen kysyntäjousto ja virtuaalivoimalaitoksiin osallistuminen) edellyttää kehittynyttä mittaus- ja ohjauslaitteistoa. Tarvittavat telemetria- ja mittauslaitteet voivat olla yksittäisille käyttäjille liian kalliita – joissakin tapauksissa ne maksavat enemmän kuin itse akku – mikä muodostaa merkittävän esteen pienille toimijoille, jotka voisivat muuten tarjota arvokasta joustoa sähköverkolle [103–104].

## 6.4 Tulovirtojen yhdistäminen ja BESS-liiketoimintamallit

BESS-hankkeet perustuvat yhä useammin niin sanottuun tulovirtojen yhdistämiseen (revenue stacking), jossa useita tulonlähteitä yhdistetään yhteen toimintaan [102, 105–106]. Sen sijaan, että akku palvelisi vain yhtä tarkoitusta, se voi täyttää useita rooleja eri aikoina ja näin kerätä tuloja useista lähteistä.

BESS:n nopea käyttöönotto ei ainoastaan kiihdytä kehittyneiden akkukemioiden kysyntää, vaan myös muokkaa globaaleja hinnoitterurakenteita ja investointivirtoja, asemoiden energiavarastoinnin strategiseksi resurssiksi kansallisissa energiapolitiikoissa.

Seuraavissa alaluvuissa esitellään BESS-liiketoimintamalleja tarkemmin:

- 7.4.1 Energian arbitraasi
- 7.4.2 Kuormansiirto (huipputehon leikkaus)
- 7.4.3 Oheispalvelut
- 7.4.4 Joustavuus ja kysyntäjoustomarkkinat
- 7.4.5 Virtuaalivoimalaitokset (VPP)
- 7.4.6 Vuorovaikutus netotuspolitiikan kanssa

### 6.4.1 Sähkön arbitraasi

Suurikapasiteettiset varastointijärjestelmät voivat ostaa sähköä silloin, kun hinnat ovat alhaiset (esimerkiksi yöllä hiljaisina tunteina), ja myydä sen takaisin verkkoon korkeiden kysyntä- ja hintapiikkien aikana. Tämä hintavaihteluihin perustuva kaupankäynti on noussut yhdeksi skaalautuvimmista tulonlähteistä suurille akkujärjestelmille.

Esimerkiksi Texasin ERCOT-markkinoilla energian arbitraasi kasvoi merkityksettömästä tulonlähteestä merkittävimmäksi: vuonna 2024 se muodosti lähes 60 % toiminnassa olevien BESS-hankkeiden kokonaistuloista [87–88]. Tämä muutos osoittaa, kuinka akut hyödyntävät tukkumarkkinoiden hintavaihteluita; samalla se tuo mukanaan markkinariskin ja lisää akun kulumista, koska järjestelmää ladataan ja puretaan useammin.

On huomionarvoista, että mitä enemmän varastointikapasiteettia otetaan käyttöön, sitä enemmän äärimmäiset hintavaihtelut tasaantuvat (markkinoiden kyllästymisilmiö), mikä voi ajan myötä kaventaa arbitraasimarginaaleja [87]. Siitä huolimatta viimeaikaiset kustannuslaskut ovat tukeneet arbitraasin houkuttelevuutta – vuoteen 2025 mennessä merkittävä akkuasennusten hintojen lasku on parantanut näiden strategioiden kannattavuutta huomattavasti [2].

### 6.4.2 Kuormansiirto (huipputehon leikkaus)

Kulutuspisteen takaisille (BTM) akuille keskeinen taloudellinen motiivi on sähkölaskujen pienentäminen sen sijaan, että niillä pyrittäisiin suoraan markkinatuottoihin. Varastoimalla energiaa matalan kysynnän aikana (tai silloin kun aurinkosähköä tuotetaan runsaasti) ja purkamalla sitä kalliiden huippukulutustuntien aikana, kaupalliset ja teolliset käyttäjät voivat välttää kalliita huipputehoon perustuvia maksuja ja aikaperusteisia tariffikorotuksia.

Tätä käytäntöä kutsutaan usein huipputehon leikkaukseksi (peak shaving) tai kuormansiirroksi (load shifting), ja se voi tuottaa merkittäviä säästöjä; yritykset ovat raportoineet leikanneensa huipputehon aiheuttamia sähkökustannuksiaan yli 40 % käyttämällä paikallisia BESS-järjestelmiä, jotka syöttävät sähköä verkkoon kalleimpien tariffien aikana [107–109].

### 6.4.3 Verkon lisäpalvelut

Monet BESS-hankkeet tuottavat tuloja tarjoamalla sähköverkon tukipalveluita, jotka auttavat ylläpitämään verkon vakautta ja luotettavuutta. Nopean vasteaikansa ansiosta akut soveltuvat erinomaisesti palveluihin kuten taajuuden vakauttamiseen (Frequency Containment Reserve, FCR) ja automaattiseen taajuuden palautusreserviin (aFRR), joiden avulla verkon taajuus pidetään vaaditulla 50/60 Hz tasolla [110–111].

Useilla sähkömarkkinoilla (esimerkiksi Yhdysvaltojen PJM-markkina tai Irlannin DS3-järjestelmä) akkuoperaattorit saavat maksun siirtoverkonhaltijoilta näiden säätö- ja reserviroolien suorittamisesta. Oheispalvelumarkkinat ovat historiallisesti olleet kannattavia varastointiratkaisuille; kuitenkin niiden koko on suhteellisen rajallinen. Kun akkukapasiteetti on kasvanut, jotkut alueet ovat kokeneet nopeita hintojen laskuja taajuudensäätömarkkinoilla, mikä on pakottanut operaattorit monipuolistamaan toimintaansa muihin palveluihin, kuten arbitraasiin, kapasiteettimarkkinoihin tai pyörivään reserviin, tulojen ylläpitämiseksi [87].

### 6.4.4 Joustavuus ja kysyntäjoustomarkkinat

Yhä useammin akkuja yhdistetään ja hyödynnetään kehittyvillä joustavuusmarkkinoilla. Näissä ohjelmissa hajautetut BESS-järjestelmät reagoivat ulkoisiin signaaleihin – kuten hintapiikkeihin tai verkon kuormitushuomautuksiin – säätämällä lataus- tai purkukäyttäytymistään paikallisen kysynnän ja tarjonnan tasapainottamiseksi.

Tämä voi vähentää jakeluverkkojen kuormitusta ja siirtää tarpeen verkon laajennuksille. Sekä verkkoyhtiöt että kolmannen osapuolen aggregaattorit (jotka voivat toimia itsenäisinä toimijoina tai vähittäismyyjinä) hyödyntävät akkuja tällaisissa kysyntäjousto- ja ruuhkahuippujen hallintapalveluissa, usein maksamalla omistajille osallistumisesta esimerkiksi huipputehon leikkausohjelmien tai joustavuushuutokauppojen kautta [112–113].

Vaikka nämä mahdollisuudet ovat vielä kehitysvaiheessa, ne edustavat tärkeää tulevaisuuden tulonlähdettä – erityisesti, kun älykkäät sähköverkkoplatformit mahdollistavat entistä tarkemman kulutuspisteen takaisten resurssien hallinnan.

### 6.4.5 Virtuaalivoimalaitokset (VPP)

Virtuaalivoimalaitokset (Virtual Power Plants, VPP) toimivat markkinoiden katalyytteinä mahdollistamalla jopa kotitalousmittakaavan akkujen osallistumisen tukkusähkömarkkinoille ja korkean tason verkon palveluihin, jotka olivat aiemmin varattuja vain keskitetysti tuotetulle sähköntuotannolle [96–97].

Useat energiayhtiöt ja energiapalveluntarjoajat Euroopassa, Pohjois-Amerikassa ja Aasiassa operoivat nyt VPP-alustoja, jotka maksavat kotitalous- tai yritysasiakkaille heidän akkujärjestelmiensä tarjoamista energiapalveluista ja tasapainotuskapasiteetista. Käytännössä VPP:t mahdollistavat sen, että pienet tuottajat ja kuluttajat voivat hyötyä samoista tulovirroista (kuten energian kaupasta tai verkon tasapainotusmaksuista), jotka olivat aiemmin saavutettavissa vain suurille voimalaitoksille [112–114].

### 6.4.6 Vuorovaikutus netotuspolitiikan kanssa

SolarPower Europen Battery Storage Market Outlook 2025–2029 -raportin mukaan kulutuspisteen takaisten (BTM) asennusten odotetaan jatkavan kasvuaan kuluttajien lisääntyvän kiinnostuksen myötä energian omavaraisuuteen sekä yhteisöpohjaisten joustavuusmallien kehityksen ansiosta [115].

Kotitalousvarastoinnin kannattavuuteen vaikuttavat merkittävästi paikalliset aurinkosähkön hyvityskäytännöt. Netotuspolitiikka (net metering) vähentää usein akkujen taloudellista houkuttelevuutta, koska ylimääräinen aurinkosähkö voidaan “varastoida” verkkoon ilman kustannuksia kuluttajalle. Alueilla, joilla netotus on ollut anteliasta, kotitalousakkujen käyttöönotto on ollut hidasta, koska sähköverkko toimii käytännössä ilmaisena energiavarastona [93].

Sen sijaan nettilaskutusmallit (net billing), joissa verkkoon syötetystä sähköstä maksetaan alhaisempi tukkumarkkinahinta, vahvistavat akkujen taloudellista perustaa. Nettilaskutuksessa aurinkopaneelien omistajat hyötyvät enemmän oman tuotannon itsekulutuksesta (käyttämällä akkua siirtämään tuotantoa ajankohtiin, jolloin kulutus on suurinta) kuin ylimääräisen sähkön myymisestä verkkoon.

Kun netotusohjelmia ajetaan alas ja korvataan nettilaskutuksella eri maissa, analyytikot odottavat kotitalous- ja liikekiinteistöjen akkujen käyttöönoton kasvavan vastaavasti, koska kuluttajat pyrkivät maksimoimaan oman tuotantonsa hyödyntämisen ja paikallisen energian arbitraasin.

## 6.5 Alueelliset BESS-markkinarakenteet ja kehityssuunnat (EU, USA, Kiina, Aasia ja Pohjoismaat)

Tässä alaluvussa esitetään vertaileva analyysi akkuenergiavarastojen (BESS) markkinarakenteista ja kehityspoluista viidellä keskeisellä alueella: Euroopan unioni (EU), Yhdysvallat (USA), Kiina, Japani ja Etelä-Korea. Analyysi perustuu raportin pääsisältöön sekä täydentäviin lähteisiin alueellisen näkökulman syventämiseksi.

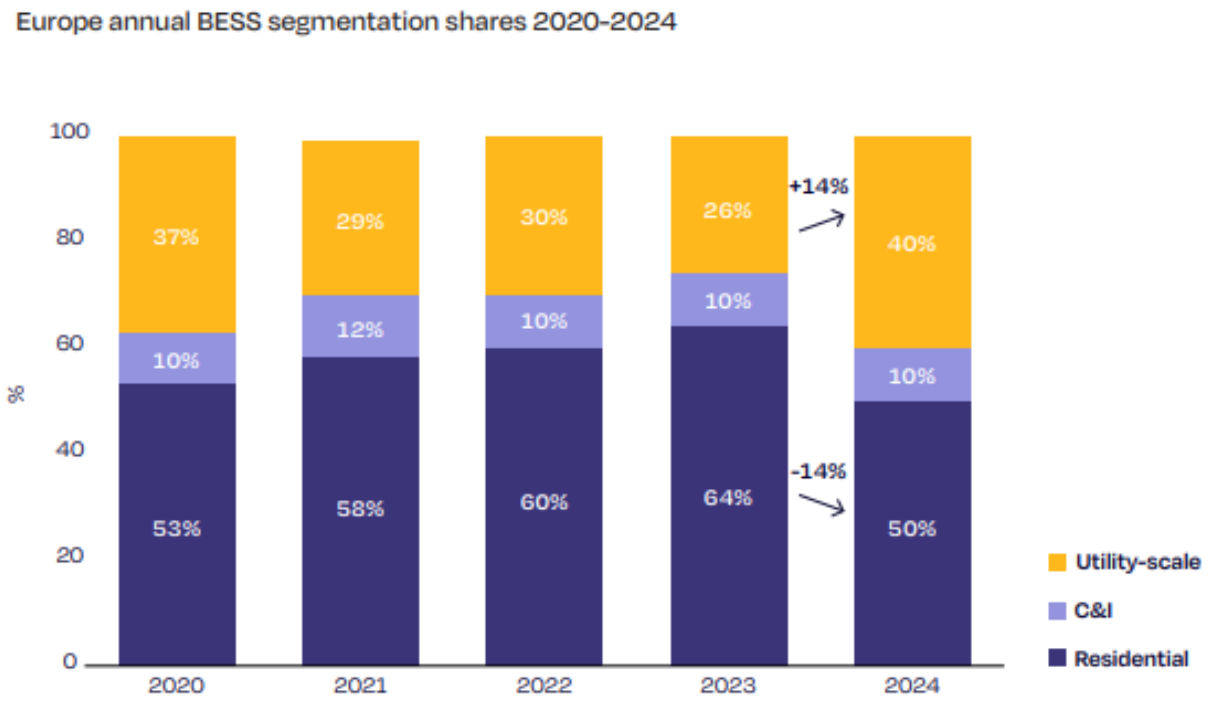
### 6.5.1 Markkinan koko ja kasvu

**Taulukko 3:** Vertailukooste BESS-markkinoiden koosta ja kasvusta alueittain [2, 28, 30, 32, 86,119–122]. Luvut ovat keskiarvoja lähteissä esitetyistä.

| Region | Vuosittainen kasvuennuste, % | Asennettu kapasiteetti(2025), GWh | Markkinan koko (USD) billion | HUOM! |
|---|---|---|---|---|
| **EU** | 45 (2025) | 27 | 25 | Suurten järjestelmien osuus 55 %, asuinkäytön kasvu tasaantumassa |
| **USA** | 35 (2020 - 2025) | 27 | 32 | Arbitraasi hallitseva, IRA-tukien vaikutus merkittävä |
| **Kiina** | 44 (2023 - 2027) | 104 | 136 | Valtion ohjaama skaalaus, LFP-kustannusjohtajuus |
| **Japani** | 11 (2024 - 2035) | ei määritetty | 0,8 | Asuinvetoista, VPP- ja FiP-tukimekanismit |
| **Etelä-Korea** | uudelleenkäynnistysvaihe | 3,24 (by 2026) | 29 (2038) | Julkinen tarjouskilpailu, kotimaisen teollisuuden suojaaminen |

### 6.5.2 BESS-markkinakehityksen painopisteet ja liiketoimintamallit

Euroopan unionissa BESS-markkinat ovat rakenteellisessa murrosvaiheessa, jossa asuinpainotteisesta markkinasta siirrytään yhä enemmän suurten järjestelmien hallitsemaan kokonaisuuteen (kuva 6). Vaikka asennukset kotitalouksiin ovat edelleen merkittäviä – erityisesti Saksassa ja Italiassa – suurin osa vuoden 2025 uudesta kapasiteetista tuli verkon etupuolelle (FTM) sijoitetuista järjestelmistä. Liiketoimintamallit monipuolistuvat, ja tulovirtojen yhdistäminen (revenue stacking) yleistyy. Operaattorit yhdistävät tuloja energian arbitraasista, oheispalveluista ja kapasiteettimaksuista varmistaakseen taloudellisen kannattavuuden [87].




**Kuva 6**: Euroopan BESS-segmenttien vuotuiset osuudet 2020–2024. [116]

Yhdysvalloissa tulovirtojen yhdistäminen on keskeinen liiketoimintastrategia. Energian arbitraasi on edelleen johtava tulonlähde, muodostaen jopa 60 % BESS-tuloista ERCOT-markkinalla vuonna 2024 [87–88]. Operaattorit integroivat kuitenkin yhä useammin oheispalveluja ja kapasiteettimarkkinoita vähentääkseen hintavaihteluihin ja akun kulumiseen liittyviä riskejä. Inflation Reduction Act (IRA) sekä FERC:n määräykset 2222 ja 2023 ovat merkittävästi laajentaneet BESS:n markkinoillepääsyä, mahdollistaen osallistumisen tukkumarkkinoille ja kannustaen yhteissijoituksia uusiutuvan tuotannon kanssa [87].

Kiinan BESS-markkinoita luonnehtii valtion ohjaama laajentuminen ja teollisuuspolitiikan mukauttaminen. Vaikka maa johtaa maailmanlaajuisesti asennetussa kapasiteetissa ja valmistusmittakaavassa, BESS:n erityinen osuus laajemmasta akkusektorista on vähemmän läpinäkyvä. Hallituksen ylhäältä ohjattu

lähestymistapa – mukaan lukien tuet ja tuotantovelvoitteet – on mahdollistanut nopean käyttöönoton, erityisesti verkkomittakaavaisissa sovelluksissa [2].

Japanin BESS-kehitystä johtaa asuinkäyttö, jota vauhdittavat sääntelytoimet, kuten Tokion vuoden 2025 aurinkopaneelivaatimus uusille asuinrakennuksille sekä käynnistyvät virtuaalivoimalaitosohjelmat (VPP). Vuonna 2022 käyttöön otettu Feed-in Premium (FiP) -järjestelmä mahdollistaa yhteissijoitetun varastoinnin ja tarjoaa markkinapohjaisia kannustimia joustavalle energian toimitukselle. Näistä edistysaskeleista huolimatta kaupalliset ja verkkomittakaavaiset asennukset ovat edelleen rajoittuneita kaupunkitiheyden, sääntelyepäselvyyksien ja verkon pirstaleisuuden vuoksi [108].

Etelä-Korea aktivoi uudelleen BESS-sektorinsa laajamittaisen julkisen hankintaohjelman kautta. Vuoden 2025 kansallinen tarjouskilpailu 540 megawatin (3,24 GWh) varastointikapasiteetista merkitsee strategista siirtymää kohti verkkomittakaavaista varastointia. Hallitus on sisällyttänyt teollisuuspolitiikan tarjouskilpailun suunnitteluun, myöntäen lisäpisteitä kotimaisesta arvonluonnista ja paikallisesta materiaalihankinnasta. Etelä-Korean akkuteollisuuden johtavat toimijat – LG Energy Solution, Samsung SDI ja SK On – hyödyntävät tätä mahdollisuutta asemoidakseen BESS:n uudelleen keskeiseksi kasvusegmentiksi, erityisesti sähköajoneuvojen akkukysynnän tasaantuessa [109].

### 6.5.3 Sääntely- ja politiikkakehykset

Euroopan unionin sääntely-ympäristöä muovaavat Green Deal -ohjelma, rakennusten energiatehokkuusdirektiivi (Energy Performance of Buildings Directive, EPBD) sekä kansalliset tukiohjelmat. Näihin kuuluvat muun muassa Saksan 25 %:n investointituet kotitalousvarastoinnille, Italian Superbonus-verohyvitys (jopa 70 %) sekä Yhdistyneen kuningaskunnan arvonlisäverovapautus kotitalousakkuasennuksille. Nämä politiikkatoimet ovat historiallisesti edistäneet asuinvarastojen käyttöönottoa, vaikka viime vuosina painopiste on siirtynyt yhä enemmän suurten järjestelmien tukemiseen [110].

Yhdysvalloissa Inflation Reduction Act (IRA) on tuonut käyttöön investointiverohyvityksiä myös itsenäisille varastointijärjestelmille, kun taas FERC:n määräykset 2222 ja 2023 ovat avanneet tukkumarkkinat hajautetuille energiavaroille ja yksinkertaistaneet liityntäprosesseja. Nämä uudistukset ovat vauhdittaneet sekä kotitalous- että suurten BESS-järjestelmien kasvua [87].

Kiinan politiikkaympäristöä luonnehtii keskitetty suunnittelu ja teollinen skaalaus. Kansalliset tuet, tuotantokiintiöt ja vientikannustimet ovat tehneet Kiinasta maailman johtavan BESS-valmistuksen ja -käyttöönoton markkinan. Kotimarkkina on kuitenkin edelleen suhteellisen läpinäkymätön, eikä BESS-segmentin tarkkaa osuutta koko akkuteollisuudesta ole helppo erottaa [2].

Japanin sääntelykehys on kehittymässä. Talous-, kauppa- ja teollisuusministeriö (METI) on sisällyttänyt varastoinnin kuudenteen strategiseen energiasuunnitelmaansa sekä Green Transformation (GX) -strategiaan. Vuonna 2022 käyttöön otettu Feed-in Premium (FiP) -järjestelmä ja Sustainable Innovation

Initiative (SII) tarjoavat taloudellisia kannustimia yhteissijoitetuille varastoratkaisuille ja korkean hyötysuhteen järjestelmille. Kuitenkin yhtenäisen lupakehyksen puute, yhdistettynä verkon pirstaleisuuteen ja kaupunkitilan rajoitteisiin, vaikeuttaa edelleen suurten järjestelmien käyttöönottoa [108].

Etelä-Korean 11. sähköntuotannon ja -kulutuksen perussuunnitelma (Basic Plan for Electricity Supply and Demand) linjaa merkittävää uusiutuvan energian lisäystä, mikä edellyttää laajamittaista varastointia. Vuoden 2025 BESS-tarjouskilpailu on ensimmäinen hallituksen johtama käyttöönotto, jossa valintakriteerit suosivat kotimaista teollista panosta. Tavoitteena on elvyttää maan akkuteollisuutta ja vähentää riippuvuutta kiinalaisista tuontituotteista [109].

### 6.5.4 Haasteet ja mahdollisuudet

Eri alueiden (EU, USA, Kiina, Aasia) energiavarastointimarkkinoiden (BESS) keskeiset haasteet ja mahdollisuudet on esitetty taulukossa 4. Analyysi pohjautuu sääntely- ja politiikkakehysten sekä markkinadynamiikan tuomiin erityispiirteisiin, jotka vaikuttavat käyttöönottoon ja markkinoiden kehitykseen. Tarkastelu tarjoaa vertailun eri maiden ja alueiden kohtaamista esteistä sekä avaa näkymiä potentiaalisiin kasvumahdollisuuksiin.

**Taulukko 4:** Yhteenveto BESS-markkinoiden keskeisistä haasteista ja mahdollisuuksista alueittain [2–5, 86, 87–88, 119–122]

| alue | keskeisimmät haasteet | mahdollisuudet |
|---|---|---|
| EU | Verkkoliityntöjen viivästykset, sääntelyn hajanaisuus | Vahva poliittinen tuki, kasvava suurten järjestelmien markkina |
| USA | Markkinoiden volatiliteetti, akkujen kuluminen, sääntelyesteet | Tulovirtojen yhdistäminen, IRA-tukipaketit, FERC:n markkinapääsyuudistukset , |
| Kiina | Vientiriippuvuus, kierrätyksen ja toisen elinkaaren haasteet | Skaalaedut, valtion ohjaama teollisuuspolitiikka |
| Japani | Verkon pirstaleisuus, sääntelyepäselvyydet, kaupunkitilan puute | Asuinkäytön kasvu, VPP-integraatio, FiP-joustomekanismit |
| Etelä-Korea | Kiinalainen kilpailu, turvallisuushuolenaiheet, markkinoillepääsyn esteet | Julkiset hankinnat, kotimaisen valmistuksen tukeminen, vientipotentiaali |

### 6.5.5 Pohjoismaat: teknologinen kypsyys ja markkinoiden lähentyminen

Pohjoismainen BESS-markkina on siirtynyt pilottivaiheesta nopean skaalautumisen vaiheeseen, jolle on ominaista tiivis sähköverkkointegraatio ja vaihtelevat energiapoliittiset kehykset alueen sisällä [123].

Ruotsi nousi vuonna 2024 yhdeksi Euroopan viidestä suurimmasta akkumarkkinasta, ja siellä on käynnissä useita suuria verkon vakauttamiseen tähtääviä hankkeita. Asuinvarastojen kysyntä on kasvanut erityisen nopeasti, heijastellen kuluttajavetoisia trendejä, joita on nähty Saksassa ja Italiassa [90, 115, 124]. Merkittävä havainto Ruotsin markkinoilta on taajuusreservien (FCR-D) nopea kyllästyminen: kapasiteetti kasvoi alle 10 megawatista yli 600 megawattiin vuosien 2023 ja 2024 välillä, mikä johti reservihintojen merkittävään korjausliikkeeseen, kun kapasiteetti ylitti kysynnän [124].

Norjan markkina (arviolta noin 991 miljoonaa USD vuonna 2024) keskittyy sähköisen liikenteen ja sähköverkon saumattomaan integrointiin [125]. Maailman johtavana sähköautojen käyttöönottajana (yli 88 % markkinaosuus) Norja on noussut keskeiseksi testialustaksi ajoneuvosta verkkoon (Vehicle-to-Grid, V2G) -teknologialle [121, 125–126]. Vuoden 2025 alussa Norjan kantaverkkoyhtiö Statnett siirtyi 15 minuutin epätasapainon selvitysjaksoon, mikä yhdessä automatisoidun pohjoismaisen mFRR-energiamarkkinan kanssa on luonut vahvoja kannustimia BESS-järjestelmien hyödyntämiselle nopean jouston tarjoajina [127]. Norjassa kannattavuus edellyttää nykyisin tulovirtojen yhdistämistä, jossa yhdistetään reservimarkkinat, energian arbitraasi ja kapasiteettimaksut [128].

Tanska on profiloitunut akkumarkkinoiden integraattorina, joka hallitsee poikkeuksellisen suurta tuulivoimaosuutta (noin 60 %) [129–130]. Tanskan markkina on Pohjoismaiden suurin (arviolta noin 1,54 miljardia USD), ja se on vahvasti integroitu Euroopan PICASSO-alustaan aFRR-reservien osalta [129, 131]. Suuret toimijat, kuten European Energy, ovat ottaneet käyttöön verkkomittakaavaisia BESS-hankkeita (esim. Kragerupin 3,75 MW:n järjestelmä), jotka tarjoavat kriittistä joustoa tuulivoiman vaihteluiden hallintaan [130].

Suomen BESS-markkina on parhaillaan voimakkaassa murrosvaiheessa, jossa suurten järjestelmien hankkeet hallitsevat kasvua [132]. Vaikka kokonaiskapasiteetti vuoden 2024 lopussa oli vielä vaatimaton (noin 200 MWh käytössä ja 400 MWh kehitteillä), useat suurhankkeet – kuten 170 MW:n hybridiratkaisu Pyhäsalmen kaivoksella [133] ja Helenin 40 MW:n varasto Nurmijärvellä [134] – luovat pohjan nopealle kasvulle vuosina 2025–2026. Suomen markkinan ensisijainen veturi ovat Fingridin hallinnoimat reservimarkkinat (FCR-N ja FCR-D), joiden hinnat ovat pysyneet houkuttelevina [135–136]. Suomi siirtyi helmikuussa 2025 uuteen 15 minuutin epätasapainon selvitysmalliin ja maaliskuussa automatisoituun mFRR-energiamarkkinaan, mikä lisää nopean tasapainotuskyvyn kysyntää Ruotsin ja Norjan esimerkkien mukaisesti [135]. Kulutuspisteen takaisen (BTM) varastoinnin osalta Suomen markkina on kehityksensä alkuvaiheessa. Vertailu Pohjoismaiden BESS-painopistealueista esitetään taulukossa 5.

**Taulukko 5:** Pohjoismaiden BESS fokusalueiden vertailu [124-136]

| maa | Ensisijainen markkinaveturi | Keskeinen teknologia | Sääntelyllinen erityispiirre |
|---|---|---|---|
| **Ruotsi** | FCR-reservit, teollinen valmistus | Verkkomittakaavan LFP | Nopeasti kyllästyvä reservimarkkina |
| **Norja** | Sähköautojen integrointi, V2G | V2G-kaksisuuntaisuus | 15 min selvitysjakso, mFRR-energiamarkkina |
| **Tanska** | Tuulivoiman tasapainotus | Hybridijärjestelmät (tuuli + BESS) | PICASSO-alustan (aFRR) integraatio |
| **Suomi** | Fingridin reservit, teollisuus | Verkkomittakaavan LFP & NMC | mFRR-energiamarkkinan automaatio |

## 6.6 Energiayhteisöjen kehitys ja BESS-markkinat Euroopassa: yhteisöjen rooli ja sääntelykehykset

Siirtymä kohti hajautettuja energiajärjestelmiä Euroopassa on kehittynyt passiivisista tukimekanismeista kohti aktiivista markkinaosallistumista. Saksassa ja Tanskassa tämän kehityksen juuret ulottuvat kansalaisomisteisiin osuuskuntiin (Bürgerenergie), joita on tuettu syöttötariffijärjestelmillä ja suotuisilla politiikkakehyksillä jo 1990-luvulta lähtien [115, 134–135].

EU:n laajuiset säädökset, erityisesti Clean Energy Package, ovat vahvistaneet tätä kehitystä antamalla uusiutuvan energian yhteisöille (Renewable Energy Communities, REC) ja kansalaisenergian yhteisöille (Citizen Energy Communities, CEC) oikeudellisen aseman kaikissa jäsenvaltioissa [83, 135].

### 6.6.1 Tanskan malli: yhteisomistus ja riskienhallinta

Tanska on toiminut globaalina edelläkävijänä sääntelyssä, joka velvoittaa paikalliset kansalaiset osallistumaan energiasiirtymään. Vuoden 2008 uusiutuvan energian laki (VE-loven) toi käyttöön niin sanotun “20 prosentin säännön”, joka velvoittaa tuulivoimahankkeiden kehittäjiä tarjoamaan vähintään viidenneksen hankkeen omistuksesta paikallisille asukkaille hankintahintaan [136].

Tätä kehystä tukevat lainsäädännölliset suojamekanismit, joiden tavoitteena on lisätä sosiaalista hyväksyttävyyttä:

- Takuurahasto (Garantifonden): Tarjoaa lainatakauksia energiayhteisöjen esisuunnittelu- ja valmistelukustannuksiin, mikä vähentää taloudellista riskiä hankkeen alkuvaiheessa [136].

- Omaisuuden arvon kompensointi (Værditab): Kehittäjien on lain mukaan korvattava asukkaille mahdollinen kiinteistön arvon lasku, joka johtuu esimerkiksi tuulivoimaloiden läheisyydestä [136].

Tämä vakiintunut yhteisomistuksen perinne on mahdollistanut modernien, yhteisöomisteisten tuuli- ja BESS-yksiköiden integroinnin kansainvälisiin tasapainotusmarkkinoihin, kuten PICASSO- ja MARI-alustoille [127, 136].

### 6.6.2 Espanjan malli: yhteiskulutus ja kiinteistörekisteriin perustuva osallistuminen

Espanja toteutti historiallisen sääntelymuutoksen vuonna 2019 kumoamalla niin sanotun ”aurinkoveron” ja säätämällä kuninkaallisen asetuksen 244/2019, joka laillisti yhteiskulutuksen [138]. Espanjalaisen mallin keskeinen innovaatio on teknisten “läheisyyskriteerien” käyttö, joiden avulla energiankäyttö voidaan jakaa osallistujien kesken, jos jokin seuraavista ehdoista täyttyy:

- Liittyminen samaan pienjännitemuuntajaan
- Sijainti 2 kilometrin säteellä
- Yhteinen kiinteistörekisteritunnus (código catastral), erityisesti 14 ensimmäisen numeron osalta, mikä mahdollistaa osallistumisen kerrostaloissa riippumatta yksittäisistä omistusrakenteista [138–139]

Nettilaskutuksen käyttöönotto alle 100 kW:n järjestelmille on mahdollistanut sen, että nämä yhteisöt saavat hyvityksiä ylijäämäsähköstä suoraan sähkölaskuunsa. Tämä on merkittävästi kannustanut akkuvarastojen (BESS) integrointia, jotta paikallista kulutusta voidaan maksimoida.

### 6.6.3 Saksan ja Italian mallit: taloudelliset kannustimet ja VPP-integraatio

Saksassa nykyinen BESS-buumi perustuu pitkälti 0 %:n arvonlisäverokantaan asuinrakennusten aurinko- ja varastointijärjestelmille, mikä on tehnyt akkuvarastoinnista vakio-osan lähes kaikissa uusissa aurinkosähköasennuksissa [115]. Saksalaiset energiayhteisöt hyödyntävät yhä useammin virtuaalivoimalaitoksia (VPP), joiden avulla hajautetut akut voidaan yhdistää ja osallistua verkon oheispalveluihin sekä tuottaa lisätuloja [115, 121].

Italiassa BESS-käyttöönotto kasvoi nopeasti Superbonus 110 % -verokannustimen ansiosta, jonka avulla yhteisöt ja kotitaloudet pystyivät investoimaan varastointiin käytännössä ilman alkupääomaa [90]. Nykyinen italialainen sääntely korostaa uusiutuvan energian yhteisöjen (REC) roolia paikallisessa verkon tasapainottamisessa, erityisesti alueilla, joilla infrastruktuuri on kuormittunut ja joissa varastointi voi tarjota kriittistä jännitetukea [68, 128].

**Key takeaways: Kansalaisomistus markkinoiden vauhdittajana**

Kansalaisomistuksen ja Euroopan BESS-markkinoiden kehittymisen välillä on yhteys:

- **Taloudellinen kannustin:** Omistajuus luo suoran motiivin maksimoida oman tuotannon hyödyntäminen varastoinnin avulla, erityisesti kun perinteiset tukimuodot ovat vähenemässä [116, 126, 138].

- **Verkon resilienssi:** Hajautettu omistus edellyttää innovaatioita energianhallintajärjestelmissä (EMS) ja virtuaalivoimalaitoksissa (VPP), mahdollistaen pienimuotoisten yksiköiden tulovirtojen yhdistämisen markkinaosallistumisen kautta [121, 128].

- **Sääntelyllinen hyväksyntä:** Hallinnollisten esteiden poistaminen ja paikallisten taloudellisten intressien varmistaminen (kuten Tanskan ja Espanjan malleissa) edistävät BESS-markkinoiden kasvua luonnollisena ja hyväksyttynä osana uusiutuvan energian ekosysteemiä [116, 137].

# 7. Järjestelmäintegraatio ja hajautetut energiaresurssit

Ajoneuvosta verkkoon (Vehicle-to-Grid, V2G) -integraatio hämärtää liikenteen ja energiainfrastruktuurin välistä rajaa, luoden uusia tulovirtoja sähköajoneuvojen omistajille ja tuoden samalla dynaamista kuormanhallintakykyä, joka voi vaikuttaa sähköverkon talouteen ja kansallisiin energiastrategioihin.

Energiayhteisöt ovat nousseet yhä merkittävämmiksi toimijoiksi hajautetun energiasiirtymän muovaamisessa sekä Euroopan unionissa (EU) että Yhdysvalloissa. Nämä organisaatiomuodot mahdollistavat kansalaisten osallistumisen, edistävät paikallista uusiutuvan energian tuotantoa ja tukevat hajautettujen energiavarojen, kuten akkuenergiavarastojen (BESS), integrointia. Niiden oikeudellinen tunnustaminen ja sääntelykehykset ovat nyt keskeinen osa paikallisten energiamarkkinoiden kehitystä ja hajautetun jouston käyttöönottoa.

## 7.1 Tekninen perusta verkon joustavuudelle

V2G-teknologia (Vehicle-to-Grid) mahdollistaa sen, että sähköajoneuvot eivät ainoastaan lataa sähköä verkosta, vaan myös syöttävät sitä takaisin, jolloin ajoneuvon akkua voidaan käyttää liikkuvana

energiavarastona. Vuoteen 2030 mennessä V2G-ratkaisujen (laitteistot ja palvelut mukaan lukien) maailmanlaajuisen markkinan arvon ennustetaan olevan noin 17–19,5 miljardia Yhdysvaltain dollaria vuodessa [141–145], mikä kuvastaa sähköautojen akkujen merkittävää potentiaalia osana energiajärjestelmää.

Teknisesti V2G-laitteistot ja standardit ovat kehittyneet tasolle, joka mahdollistaa laajamittaisen käyttöönoton. Kansainvälinen ISO 15118-20 -viestintästandardi viimeisteltiin vuonna 2022, ja se tarjoaa yhteisen kehyksen kaksisuuntaiselle lataukselle sähköautojen ja latausinfrastruktuurin välillä [144]. Useat autonvalmistajat ja latauslaitevalmistajat tarjoavat nyt ISO 15118 -yhteensopivia ratkaisuja, mikä osoittaa, että V2G-teknologia on teknisesti valmis ja saatavilla.

Teknologian valmiudesta huolimatta V2G-palveluiden käyttöönottoa hidastavat merkittävät esteet. Yksi keskeinen huolenaihe on akun kuluminen. Sähköauton akun toistuva lataaminen ja purkaminen verkon tukemiseksi voi aiheuttaa lisäkulumaa. Analyysien mukaan intensiivinen V2G-käyttö voi vähentää akun kapasiteettia 9–14 % enemmän sen elinkaaren aikana verrattuna normaaliin ajokäyttöön [121]. Nämä kulumishuolenaiheet ja epävarmuus niiden vaikutuksista pitkän aikavälin suorituskykyyn ovat johtaneet siihen, että monet autonvalmistajat sulkevat V2G-käytön pois akkujen takuun piiristä, mikä vähentää kuluttajien halukkuutta osallistua ohjelmiin [143].

Toinen este on selkeiden markkinarakenteiden ja mittausjärjestelmien puute, joiden avulla V2G-sähkön syöttö verkkoon voitaisiin asianmukaisesti mitata ja hyvittää. Monilla alueilla ajoneuvosta verkkoon syötetty sähkö voi joutua maksamaan siirto- tai veromaksuja aivan kuten perinteinen voimalaitos, mikä heikentää V2G:n taloudellista kannattavuutta kuluttajille [145]. Sääntelyuudistuksia ja tarkkaa mittaustekniikkaa tarvitaan, jotta ajoneuvoista syötetyn sähkön arvo voidaan tunnistaa ja hyvittää ilman, että omistajaa rangaistaan ylimääräisillä maksuilla.

Lisäksi kuluttajien hyväksyntä ja tietoisuus ovat edelleen haasteita: monet autoilijat saattavat epäröidä osallistua V2G-ohjelmiin pelätessään akun tyhjenemistä tai yksinkertaisesti siksi, etteivät tunne teknologiaa. Näiden esteiden voittaminen edellyttää sääntelypäivityksiä (esimerkiksi V2G-sähkön kaksoisverotuksen estämiseksi ja vastuiden selkeyttämiseksi) sekä liiketoimintamalleja, jotka tarjoavat riittävän korvauksen akun käytöstä kattamaan mahdolliset lisäkulumiset ja vaivannäön [145].

Jos nämä haasteet onnistutaan ratkaisemaan, V2G voi mullistaa sekä sähkö- että liikennesektorin muuttamalla sähköautot osittaisiksi energiavarannoiksi. Verkon etupuolella (FTM) V2G-yhteensopivien ajoneuvokalustojen aggregoidut laitteistot – kuten kunnalliset linja-autot tai yritysten jakeluautot – voivat tarjota arvokkaita palveluita sähköverkolle. Tutkimukset osoittavat, että suuria määriä sähköajoneuvoja voidaan ohjata älykkäällä latausohjelmistolla tarjoamaan lyhytaikaisia tehoreservejä taajuuden säätöön ja huipputehon leikkaukseen, mikä auttaa tasapainottamaan verkkoa kuormitushuippujen aikana [144–145].

Esimerkiksi Kiina on ilmoittanut aikovansa hyödyntää nopeasti kasvavaa sähköautokantaansa verkon vakauttamiseen: vuoteen 2040 mennessä jopa 300 miljoonaa sähköautoa voisi toimia valtavana V2G-resurssina, joka varastoi ylimääräistä uusiutuvaa energiaa ja syöttää sitä takaisin verkkoon kulutushuippujen tai kriisien aikana [141].

Kulutuspisteen takaisissa (BTM) sovelluksissa V2G mahdollistaa ajoneuvosta kotiin (Vehicle-to-Home, V2H) ja ajoneuvosta rakennukseen (Vehicle-to-Building, V2B) -ratkaisut. V2H/V2B-yhteensopiva sähköauto tai -bussi voi toimittaa sähköä kotiin tai kiinteistöön sähkökatkon aikana tai purkaa energiaa rakennuksen huipputehon aikana (vähentäen kustannuksia tai tarjoten varavoimaa kriittisissä tilanteissa) [146–149].

Useat pilottihankkeet eri maissa ovat osoittaneet, kuinka esimerkiksi Nissan Leaf -sähköautot voivat syöttää sähköä koteihin sähkökatkojen aikana tai kuinka sähköiset koulubussit voivat palauttaa energiaa verkkoon kesäiltapäivisin, kun sähkön kysyntä on suurimmillaan ja bussit ovat pysäköityinä. Nämä käyttötapaukset osoittavat V2G-teknologian monipuolisuuden energiajärjestelmän resilienssin vahvistamisessa ja kustannusten optimoinnissa.

Jatkossa V2G:n täyden potentiaalin hyödyntäminen edellyttää tukevia politiikkatoimia (esimerkiksi V2G-siirtojen ylimääräisten maksujen poistamista ja osallistumisen vaikutusten selkeyttämistä takuihin) sekä kulumiseen ja käyttäjäkokemukseen liittyvien huolien ratkaisemista. Oikein suunnitelluilla puitteilla V2G voi muodostua tärkeäksi osaksi hajautettua energiajärjestelmää, yhdistäen liikenteen ja sähköverkon joustavaksi ja vakaaksi kokonaisuudeksi [145].

### 7.2 Energiayhteisöt: vaikutukset akkuvarastojen käyttöönottoon

Energiayhteisöjen rooli on kasvanut merkittävästi hajautetun energiasiirtymän edistäjinä sekä Euroopan unionissa että Yhdysvalloissa. Nämä organisaatiot mahdollistavat kansalaisten osallistumisen, tukevat paikallista uusiutuvan energian tuotantoa ja edistävät hajautettujen energiavarojen, kuten akkuenergiavarastojen (BESS), käyttöönottoa. Niiden oikeudellinen tunnustaminen ja sääntelykehykset ovat nyt keskeinen osa paikallisten energiamarkkinoiden kehitystä ja joustavuuspalveluiden laajentamista.

Euroopan unionissa Clean Energy for All Europeans -paketti esitteli kaksi erillistä energiayhteisömallia. Ensimmäinen, uusiutuvan energian yhteisö (Renewable Energy Community, REC), määritellään direktiivissä (EU) 2018/2001 (RED II). REC:t mahdollistavat kansalaisten, paikallishallintojen ja pk-yritysten yhteisen osallistumisen uusiutuvan energian hankkeisiin, joiden ensisijaisena tavoitteena on tuottaa ympäristöön, talouteen ja yhteisöön kohdistuvia hyötyjä voitontavoittelun sijaan [150].

Jäsenvaltioiden on luotava mahdollistavat puitteet, jotka takaavat syrjimättömän pääsyn energiamarkkinoille, verkkoihin ja tukimekanismeihin.

Toinen malli, kansalaisenergian yhteisö (Citizen Energy Community, CEC), määritellään direktiivissä (EU) 2019/944. CEC:t voivat osallistua laajasti energialiiketoimintaan, mukaan lukien tuotanto, myynti, aggregointi, varastointi ja sähköajoneuvojen latauspalvelut. Vaikka suuret yritykset voivat osallistua, ne eivät saa käyttää määräysvaltaa yhteisössä [152].

Direktiivi takaa myös kuluttajille oikeudet, kuten pääsyn älykkääseen mittaukseen, korkealaatuiseen kulutustietoon ja osallistumisen joustavuusmarkkinoille. Näiden mallien kansallista täytäntöönpanoa seuraa Energy Communities Repository -portaali, joka dokumentoi kansallista lainsäädäntöä, hallintorakenteita ja käyttöönoton esteitä [150].

### 7.3 Aggregointi ja virtuaalivoimalaitokset

Aggregointi, eli hajautettujen energiavarojen, kuten akkujen, yhdistäminen yhdeksi markkinaosapuoleksi, on keskeinen mahdollistaja hajautetun jouston hyödyntämisessä. Virtuaalivoimalaitokset (VPP) ovat aggregoinnin käytännön sovelluksia, joissa useat pienet resurssit, kuten kotitalousakut, sähköajoneuvot ja pienet aurinkosähköjärjestelmät, yhdistetään ohjelmistopohjaisesti yhdeksi hallittavaksi kokonaisuudeksi [153–154].

VPP:t mahdollistavat hajautettujen resurssien osallistumisen tukkumarkkinoille, oheispalveluihin ja kapasiteettimarkkinoihin. Ne voivat tarjota taajuuden säätöä, jännitetukea, energian arbitraasia ja muita verkon tukipalveluita, joita aiemmin pystyivät tarjoamaan vain suuret keskitetyt voimalaitokset [154].

Euroopassa VPP-toiminta on kasvanut erityisesti Saksassa, jossa energiayhteisöt ja kotitaloudet voivat osallistua markkinoille aggregaattorien kautta. Esimerkiksi Next Kraftwerke -yhtiö hallinnoi yhtä maailman suurimmista VPP-verkoista, joka yhdistää yli 10 000 hajautettua yksikköä [155].

Sääntelykehykset ovat kuitenkin edelleen kehittymässä. EU:n sähkömarkkinadirektiivi (2019/944) edellyttää jäsenvaltioita mahdollistamaan aggregaattorien pääsyn markkinoille ilman, että ne joutuvat tekemään sopimuksia kaikkien yksittäisten energiayhteisöjen tai kuluttajien kanssa. Tämä helpottaa aggregaattorien toimintaa ja vähentää hallinnollista taakkaa [152].

Yhdysvalloissa FERC:n määräys 2222 on keskeinen sääntelyuudistus, joka avaa tukkumarkkinat hajautetuille energiavaroille. Se velvoittaa alueellisia siirtoverkonhaltijoita (RTO/ISO) kehittämään markkinarakenteita, jotka mahdollistavat aggregoitujen resurssien osallistumisen markkinoille tasavertaisesti perinteisten toimijoiden kanssa [87].

Teknisesti aggregointi edellyttää kehittyneitä energianhallintajärjestelmiä (EMS), jotka voivat ohjata useita resursseja reaaliaikaisesti. Lisäksi tarvitaan luotettavaa mittaus- ja tiedonsiirtotekniikkaa, jotta aggregaattorit voivat todentaa toimitetut palvelut ja saada niistä korvauksen. Standardien, kuten OpenADR

ja IEC 61850, käyttöönotto tukee yhteentoimivuutta ja skaalautuvuutta [156].

### 7.4 Verkkosuunnittelu ja liityntävaatimukset

Energiayhteisöjen rooli heijastuu yhä selvemmin pitkän aikavälin verkkosuunnitteluun. Euroopan sähkö- ja kaasunsiirtoverkko-operaattoreiden yhteinen vuoden 2024 kymmenvuotinen verkon kehittämissuunnitelma (Ten-Year Network Development Plan, TYNDP), jonka ovat laatineet ENTSO-E ja ENTSOG, sisältää skenaarion nimeltä ”Hajautettu energia” (Distributed Energy). Tässä skenaariossa ennakoidaan, että vuoteen 2050 mennessä Euroopan energiajärjestelmässä on merkittävä osuus yhteisöpohjaisilla uusiutuvilla energialähteillä, joustavuudella ja digitalisaatiolla [160].

Euroopan komission sähköverkkotoimien toimintasuunnitelma (Grid Action Plan, COM(2023) 757) korostaa jakeluverkkojen vahvistamisen, lupaprosessien sujuvoittamisen ja hajautettujen resurssien mallinnuksen parantamisen tärkeyttä. Suunnitelmassa kehotetaan nimenomaisesti sisällyttämään energian jakaminen ja yhteisötoiminta osaksi verkkosuunnittelun viitekehyksiä [161].

Tämän siirtymän tukemiseksi Euroopan energiavirastojen yhteistyöelin (Agency for the Cooperation of Energy Regulators, ACER) ja Euroopan energiavirastojen neuvosto (Council of European Energy Regulators, CEER) ovat julkaisseet yhteisen kannanoton, jossa ne puoltavat ennakoivia investointeja. Suosituksissa kehotetaan jakeluverkonhaltijoita (Distribution System Operators, DSO) investoimaan ennakoivasti verkon vahvistamiseen ja digitalisointiin uusiutuvan energian yhteisöjen (REC) ja kansalaisenergian yhteisöjen (CEC) kasvun ennakoimiseksi sen sijaan, että reagoitaisiin vasta jälkikäteen liityntäpyyntöihin [162–163]. Tätä lähestymistapaa tukee myös Euroopan komission vuodelle 2025 suunniteltu ohjeistus ennakoivasta verkkosuunnittelusta [160].

### 7.5 Alueelliset parhaat käytännöt ja innovaatiot BESS-järjestelmissä

Euroopan unionissa parhaat käytännöt liittyvät tiiviisti kuluttajavetoiseen käyttöönottoon ja hajautettujen energiavarojen integrointiin (taulukko 6). Saksa ja Italia ovat nousseet johtaviksi maiksi asuinrakennusten BESS-järjestelmien käyttöönotossa, mitä ovat tukeneet korkeat sähkön hinnat ja vahvat kannustinjärjestelmät, kuten Superbonus-verohyvitys ja arvonlisäverovapautukset. Saksassa 79 % uusista asuinrakennusten aurinkosähköasennuksista vuonna 2023 sisälsi akkuvaraston, ja 82 % näistä järjestelmistä oli varustettu hybridivaihtosuuntaajilla, mikä mahdollistaa tehokkaan energianhallinnan ja oman kulutuksen optimoinnin [86]. Energianhallintajärjestelmien (EMS) ja modulaaristen litiumioniakkujen laajamittainen käyttö korostaa alueen painotusta älykkääseen ja hajautettuun varastointiin.

Yhdysvalloissa innovaatiota ohjaavat ensisijaisesti markkinarakenteet ja liiketoimintamallien kehittyneisyys (taulukko 4). Tulovirtojen yhdistämiseen perustuva malli – jossa yhdistetään tuloja energian arbitraasista, oheispalveluista ja kapasiteettimaksuista – on muodostunut BESS-hankkeiden taloudellisen kannattavuuden

kulmakiveksi [104]. Sääntelyuudistukset, kuten FERC:n määräys 2222, ovat mahdollistaneet hajautettujen energiavarojen osallistumisen tukkumarkkinoille, ja Inflation Reduction Act (IRA) on tuonut investointiverohyvityksiä myös itsenäisille varastointijärjestelmille [87]. Teknologisia edistysaskeleita ovat muun muassa pitkäkestoisten energiavarastojen (LDES) käyttöönotto sekä tekoälypohjaisten ennakoivien kunnossapitojärjestelmien integrointi, joiden avulla parannetaan toimintavarmuutta ja varojen elinkaarta [87].

Kiinan parhaat käytännöt keskittyvät teolliseen skaalaamiseen ja kustannusjohtajuuteen (taulukko 4). Maa on saavuttanut maailmanlaajuisen johtoaseman litium-rautafosfaatti (LFP) -akkujen tuotannossa hyödyntämällä mittakaavaetuja ja valtion ohjaamaa koordinointia kustannusten alentamiseksi [87]. Hallituksen strateginen tuki – mukaan lukien tukiaiset, keskitetty suunnittelu ja vientiin suuntautunut teollisuuspolitiikka – on mahdollistanut BESS-järjestelmien nopean käyttöönoton verkkomittakaavassa, vaikka yksityiskohtaista tietoa asuin- tai liiketoimintasektorin sovelluksista on edelleen rajallisesti saatavilla.

Japanin lähestymistapaa luonnehtivat sääntelyinnovaatiot ja kaupunkimittakaavan järjestelmäsuunnittelu (taulukko 4). Vuonna 2022 käyttöön otettu Feed-in Premium (FiP) -järjestelmä mahdollistaa yhteissijoitettujen varastojärjestelmien osallistumisen energiamarkkinoille ilman, että ne menettävät perusmaksuja, mikä kannustaa joustavaan energian toimitukseen [86]. Tokion vuoden 2025 sääntely, joka velvoittaa asentamaan aurinkopaneelit kaikkiin uusiin asuinrakennuksiin, odotetaan kiihdyttävän asuinrakennusten BESS-järjestelmien käyttöönottoa entisestään.

Japanin painotus kompakteihin, tehokkaisiin järjestelmiin, jotka on suunniteltu tiiviisiin kaupunkiympäristöihin, yhdistettynä virtuaalivoimalaitosohjelmien (VPP) kehittämiseen, kuvastaa strategista panostusta hajautettuun ja kuluttajaintegroituun varastointiin.

Etelä-Koreassa parhaat käytännöt ovat nousemassa turvallisuusinnovaatioiden ja teollisuuspolitiikan risteyskohdassa (taulukko 4). Turvallisuusongelmien aiheuttaman pysähtyneisyyden jälkeen maa on uudelleenohjannut BESS-strategiaansa hallituksen johtaman 540 megawatin varastokapasiteetin hankintaohjelman kautta [104]. Aloite sisältää arviointikriteerejä, jotka painottavat kotimaisen arvonluonnin ja paikallisesti tuotettujen materiaalien käyttöä. Teknologisia edistysaskeleita ovat muun muassa tekoälypohjaiset akunhallintajärjestelmät (BMS), kuten Samsung SDI:n kehittämät ratkaisut, jotka mahdollistavat reaaliaikaisen diagnostiikan ja ennakoivan kunnossapidon turvallisuuden ja suorituskyvyn parantamiseksi [87].

**Taulukko 6:** Alueellinen vertailu BESS-strategioista EU:ssa, Yhdysvalloissa, Kiinassa, Japanissa ja Etelä-Koreassa [86–87]

Tämä

| alue | Teknologiset käytännöt / innovaatiot | Liiketoimintamallit / erityispiirteet |
|---|---|---|
| EU | LFP, hybridivaihtosuuntaajat, EMS, kierrätysintegraatio | Kuluttajavetoinen kysyntä, kannustimiin perustuva kasvu |
| USA | LDES, tekoälypohjainen kunnossapito, VPP-integraatio | Tulovirtojen yhdistäminen, IRA-kannustimet, FERC 2222 -markkinapääsy |
| Kiina | LFP-kustannusjohtajuus, massatuotanto | Valtion ohjaama skaalaus, vientivetoinen teollisuusstrategia |
| Japani | Kompaktit järjestelmät, PV-akkuhybridit, FiP-joustavuus | VPP-kehitys, asuinpainotteinen käyttöönotto |
| Etelä-Korea | Tekoäly-BMS, turvallisuuspainotteinen suunnittelu, kotimainen valmistus | Julkiset hankinnat, teollisuuspolitiikan integrointi, vientifokus |

Vertailu osoittaa, että vaikka teknologinen kypsyys on yhteinen perusta, alueelliset BESS-strategiat eroavat merkittävästi toisistaan sääntely-ympäristöjen, markkinarakenteiden ja sosioekonomisten painopisteiden mukaan. Nämä erilaiset lähestymistavat muodostavat arvokkaan käytäntö- ja innovaatiopohjan, josta voidaan ammentaa oppia tulevien käyttöönotto- ja kehitysstrategioiden suunnitteluun niin tarkastelluilla alueilla kuin niiden ulkopuolellakin.

## 8. Mahdollistavat toimintaympäristöt: politiikka, sääntely ja markkinoillepääsy

Vuosina 2015–2025 akkuja ja energiavarastoja koskeva politiikka on painottanut yhä enemmän kotimaisten toimitusketjujen vahvistamista ja teknologista johtajuutta uusiutuvan energian yleisen edistämisen ohella. Keskeiset markkina-alueet ovat toteuttaneet erilaisia lähestymistapoja, kuluttajille suunnatuista kannustimista teollisuuspolitiikkaan, nopeuttaakseen akkujen käyttöönottoa ja varmistaakseen strategisen kontrollin akkualan arvoketjusta.

### 8.1. Kansalliset aloitteet Euroopan johtavilla markkinoilla

Euroopan johtavissa kansallisissa akkuteollisuuden edelläkävijämaissa, kuten Saksassa ja Italiassa, kotitalouksien akkukäyttöönottotahtiin ovat vaikuttaneet merkittävästi julkiset kannustimet ja korkeat sähkön hinnat. Saksassa varhaiset tukiohjelmat (joissa valtio kattoi noin 30 % kotitalouksien akkujen kustannuksista vuosina 2013–2018 väistyivät myöhemmin uudentyyppisten verokannustimien tieltä. Vuonna 2022 Saksan hallitus sääti lain, joka poisti arvonlisäveron ja myönsi tuloverovapautuksen kotitalouksien aurinkopaneeli–akustojärjestelmille aina 30 kW:iin saakka, mikä alensi merkittävästi kuluttajien alkuinvestointikustannuksia [164–165]. Nämä toimet yhdessä Saksan erittäin korkeiden sähkön vähittäishintojen kanssa (noin 0,41 €/kWh vuonna 2025) [166] ovat johtaneet poikkeuksellisen korkeisiin akkujen liitäntäasteisiin. Arvioiden mukaan nykyään jopa 79–90 % uusista saksalaisista kotitalouksien aurinkosähköjärjestelmistä sisältää integroidun akkuvaraston, kun kotitaloudet pyrkivät parantamaan energiaomavaraisuuttaan ja suojautumaan vaihtelevilta sähkön hinnoilta [167–168].

Italiassa vuonna 2020 käyttöönotettu avokätinen “Superbonus 110 %” -verohyvitys – jonka ansiosta kotitaloudet voivat vähentää verotuksessa 110 % aurinkopaneelien ja kotitalousakkujen asennuskustannuksista – kiihdytti kotitalouksien energian varastointijärjestelmien nopeaa yleistymistä [169–170]. Italian kotitalouksien akkumarkkina kasvoi arviolta noin 240 % Superbonus-ohjelman alkuvaiheen aikana [169]. Vaikka tätä kannustinta supistettiin sittemmin ja korvattiin vuonna 2025 “Ecobonus” 50 % -verokannustimella, Italian kuluttajamarkkinan kiinteistöakustosegmentti jatkaa yhä kasvuaan. Taustalla vaikuttavat edelleen poikkeuksellisen korkeat sähkötariffit, jotka kävivät energiakriisin aikana huipussaan noin 0,69 €/kWh [171–172]. Taloudellisten kannustinten ja jyrkästi nousseiden sähkön hintojen yhdistelmä on ylläpitänyt vahvan liiketoimintaperusteen kotitalouksien akkuinvestoinneille, vaikka suorat tuet ovat sittemmin vähentyneet.

Alankomaissa sen sijaan kotitalouksien akkujen käyttöönotto on ollut suhteellisen vähäistä, huolimatta siitä, että maalla on yksi maailman kattavimmista sähköautojen latausinfrastruktuureista [173]. Pääsyynä on maan täysi netotuspolitiikka (*salderingsregeling*), joka vuosien ajan hyvitti kotitalouksien aurinkosähkön tuottajia verkkoon syötetystä sähköstä täyden vähittäishinnan mukaan [174–175]. Tämä käytäntö merkitsi käytännössä sitä, että sähköverkko toimi kotitalouksille ilmaisena akustona, mikä heikensi huomattavasti taloudellista motivaatiota fyysisten akkujen asentamiseen [175–176]. Hollannin hallitus on kuitenkin säätänyt asteittaisen netotusjärjestelmän alasajon vuoteen 2027 mennessä. Tämän muutoksen odotetaan parantavan merkittävästi kotitalouksien akkuasennusten kannattavuutta, sillä kuluttajat eivät jatkossa saa verkkoon syöttämästään aurinkosähköstä 1:1-hyvitystä, vaan hyötyvät enemmän ylimääräisen aurinkoenergian varastoinnista ja omaan käyttöön ottamisesta uudessa netollasyöttömallissa (*net billing*) [175–176].

### 8.2. Kiinan teollisuusstrategia vs. Yhdysvaltojen politiikkamuutokset

Maailman kaksi suurinta akkutuottajamaata ovat turvautuneet teollisuuspolitiikkaan vahvistaakseen asemaansa akkujen globaalissa arvoketjussa. Kiina on sisällyttänyt akkujen kehittämisen keskeisiin kansallisiin suunnitelmiinsa. 14. viisivuotissuunnitelmassa ja “Made in China 2025” -ohjelmassa Kiinan viranomaiset korostivat kotimaisen akkutuotantokapasiteetin rakentamista ja toimitusketjun omavaraisuutta［177–179］. Yksi merkittävä toimenpide oli “valkoinen lista” (käytössä 2016–2019), joka sitoi kuluttajille maksettavat sähköajoneuvotuet tiettyjen ennalta hyväksyttyjen kiinalaisvalmisteisten akkujen käyttöön. Tämä sulki käytännössä ulkomaiset akkutoimittajat tukikelpoisuuden ulkopuolelle ja antoi strategisen kilpailuedun kotimaisille valmistajille (kuten CATL ja BYD) niiden nopean kasvun vaiheessa［180］. Tänä päivänä Kiina jatkaa akkualan tukemista mittavilla subventioilla – esimerkiksi valtion kannustimet voivat kattaa jopa 40 % uusien akkukennojen tuotantolaitosten pääomakustannuksista ［181］.

Yhdysvalloissa liittovaltion politiikka on viime vuosina kehittynyt nopeasti kuluttajatuista kohti aggressiivista kotimaisen akkutuotannon edistämistä. Vuoden 2022 Inflation Reduction Act (IRA) sisälsi merkittävän valmistavalle teollisuudelle suunnatun tuotantoverohyvityksen (45X-pykälän mukaisesti), joka myöntää 35 Yhdysvaltain dollaria/kWh hyvitystä jokaisesta Yhdysvalloissa valmistetusta akkukennosta ja 10 $/kWh jokaisesta akkupaketista sekä muita etuja ［182–183］. Keskellä vuotta 2025 Yhdysvallat kuitenkin sääti One Big Beautiful Bill Act (OBBBA) -nimisen lain, joka muutti huomattavasti kannustinympäristöä. Tämä laki lopetti välittömästi sähköajoneuvojen liittovaltion ostohyvitykset ja määritteli uusille akkukennojen valmistuksen verohyvityksille asteittaisen alasajon vuoteen 2033 mennessä ［184–187］. Tämä Yhdysvaltojen politiikan äkillinen suunnanmuutos – jossa ensin pyrittiin voimakkaasti lisäämään kotimaista kapasiteettia ja sitten kavennettiin kannustimia – toi akkutoimitusketjun investoijille uutta epävarmuutta, mutta viestitti myös laajempaa strategiaa hienosäätää ja tasapainottaa Yhdysvaltojen tukea puhtaan energian teollisuudelle ［187］. IRA sisältää edelleen kohdennettuja etuja “energiayhteisöille” korotettujen tuotanto- ja investointiverohyvitysten muodossa. IRS:n ilmoituksen 2023-29 mukaan tukikelpoisiin alueisiin luetaan esimerkiksi brownfield-alueet (entiset teollisuus- tai saastuneet alueet), korkean työttömyyden ja fossiilitalouden perinnön omaavat seudut sekä väestönlaskenta-alueet, joilla sijaitsee suljettuja hiilikaivoksia tai käytöstä poistettuja hiilivoimaloita［147］. Yhdysvaltain energiaministeriö (DOE) ja National Energy Technology Laboratory (NETL) ovat laatineet Energy Community Mapping Tool -nimisen kartoitustyökalun, jonka avulla voi tunnistaa tällaiset puhtaan energian investoinneille soveltuvat alueet – mukaan lukien aurinko- ja varastointihankkeisiin potentiaalisesti oikeutetut seudut［148］.

### 8.3. Euroopan unionin strateginen vastaus

Euroopan unioni on käynnistänyt koordinoidun politiikkatoimien kokonaisuuden vahvistaakseen omaa akkuteollisuuttaan kansainvälisen kilpailun kiristyessä. Keskeinen elementti on vuonna 2023 hyväksytty Nettonollateollisuuslaki (*Net-Zero Industry Act*, NZIA), jonka tavoitteena on varmistaa, että vähintään 40 % EU:n vuosittaisesta strategisten nettonollateknologioiden (ml. akut) kysynnästä katetaan vuoteen 2030 mennessä EU:ssa valmistetuilla tuotteilla [186–187]. Tavoitteen saavuttamiseksi NZIA sisältää joukon toimenpiteitä, kuten akkukennojen gigatehdashankkeiden lupaprosessien nopeuttamisen. Lisäksi vuoden 2025 loppuun mennessä julkisissa tarjouskilpailuissa, jotka koskevat uusiutuvan energian ja varastointijärjestelmien käyttöönottoa, on hinnan ohella huomioitava myös muita kriteerejä (esimerkiksi toimitusketjun huoltovarmuus ja hiilijalanjälki) tarjousten arvioinnissa [188–190]. Tällä lähestymistavalla pyritään suosimaan paikallisia ja vähähiilisiä akkujen toimittajia tarjouskilpailuissa, mikä suojaisi EU:n valmistajia välillisesti halpojen tuontiakkujen aiheuttamalta hintakilpailulta.

Samanaikaisesti EU on höllentänyt valtiontuen sääntöjä Tilapäisen kriisi- ja siirtymäkehityksen kehyksen (*Temporary Crisis and Transition Framework*, TCTF) nojalla, mikä mahdollistaa jäsenvaltioille vastaavien tukien myöntämisen, joita yrityksille tarjotaan unionin ulkopuolisista maista (erityisesti Yhdysvalloista tai Kiinasta) silloin, kun on vaarana, että keskeiset puhtaan teknologian investoinnit suuntautuvat pois Euroopasta [191–192]. Tämä luonteeltaan puolustuksellinen toimenpide antaa Euroopan maiden hallituksille enemmän liikkumavaraa, jotta ne voivat pitää akkuihin liittyvät investoinnit EU:n sisällä. Lisäksi EU ohjaa merkittäviä rahasummia akkujen toimitus- ja arvoketjun vahvistamiseen: esimerkiksi unionin Innovaatiorahasto ja muut ohjelmat ovat korvamerkinneet jopa 3 mrd. € nimenomaisesti akkujen valmistuksen ja siihen liittyvän tutkimuksen tukemiseen Euroopassa [193–194]. Yhdessä nämä politiikkatoimet kuvastavat EU:n vahvaa pyrkimystä luoda kilpailukykyinen kotimainen akkuekosysteemi, mikä tukee teollisuuden kasvua, energiaturvallisuutta ja Euroopan teknologista suvereniteettia.

### 8.4. EU:n akkuasetus (EU) 2023/1542: uusi mittapuu

Asetuksen (EU) 2023/1542 voimaantulo merkitsee paradigman muutosta globaalissa akkuteollisuudessa, kun sääntelyssä siirrytään pelkästä jätehuollosta kohti akkujen koko elinkaaren systemaattista huomioon ottamista [67]. Ensimmäisenä laatuaan tämä asetus luo “vihreän passin” Euroopan markkinoille ja asettaa kestävyyden, läpinäkyvyyden ja turvallisuuden vaatimuksille uuden maailmanlaajuisen vertailutason, jota valmistajien on noudatettava halutessaan päästä EU-markkinoille [68].

#### 8.4.1. Kestävyys ja hiilijalanjälki

Uuden sääntelykehyksen mukaan kaikkien teollisuusakkujen sekä sellaisten staattisten akkuenergiavarastojen, joiden kapasiteetti ylittää 2 kWh, on sisällettävä pakollinen hiilijalanjälkiselvitys

[267]. Staattisten energiavarastojen osalta tämä vaatimus tulee täysimääräisesti sovellettavaksi elokuuhun 2030 mennessä (tai 18 kuukauden kuluessa asiaankuuluvien delegoitujen säädösten antamisesta), mikä pakottaa akkuvalmistajat optimoimaan tuotantoprosessinsa ja energianhankintansa entistä vähähiilisemmiksi [67]. Lisääntynyt läpinäkyvyys on omiaan luomaan kilpailuetua vähähiilisille tuotantomenetelmille, kuten niille, joita kehitetään EU:n nettonollateollisuuden keskittymissä [83].

### 8.4.2. Digitaalinen akkupassi

Helmikuusta 2027 lähtien jokaisella EU-markkinoille saatettavalla teollisuusakulla ja yli 2 kWh:n staattisella akkuvarastolla on oltava digitaalinen akkupassi, joka on luettavissa QR-koodin avulla [67, 83]. Tämä passi sisältää varmennettuja tietoja muun muassa seuraavista asioista:

- *akun tekniset ominaisuudet ja suorituskykymittarit,*
- *akun hiilijalanjälki ja siihen liittyvät kestävyysindikaattorit,*
- *kierrätysmateriaalien osuus (litium, koboltti, nikkeli ja lyijy) akun sisällöstä,*
- *akun terveydentilatiedot (State of Health, SoH), jotka helpottavat akkujen toisen elinkaaren hyödyntämistä ja kierrätystä* [82].

### 8.4.3. Kiertotalous ja vähimmäiskierrätyssisältö

Asetus asettaa tiukat materiaalien talteenottotavoitteet, jotta kriittiset raaka-aineet pysyvät Euroopan talouden käytössä. Vuoteen 2031 mennessä litiumin talteenoton tehokkuuden on yllettävä vähintään 80 %:iin [67]. Lisäksi uusien akkujen materiaaleissa on oltava vuodesta 2031 alkaen vähintään 16 % kierrätettyä kobolttia, 6 % kierrätettyä litiumia ja 6 % kierrätettyä nikkeliä, ja näiden osuuksien on noustava huomattavasti vuoteen 2036 mennessä [67, 82]. Nämä vaatimukset tuovat kierrätysteollisuudelle pitkän aikavälin varmuutta ja vähentävät EU:n riippuvuutta raaka-aineiden tuonnista [68].

### 8.4.4. Turvallisuus ja huolellisuusvelvoite

Ensimmäistä kertaa staattiset akkuenergiavarastot (SBESS) on sisällytetty erityisten turvallisuustestausvaatimusten piiriin, jotta esimerkiksi lämpökarkaamisriskit saadaan hallintaan [67]. Lisäksi elokuusta 2027 alkaen suurten akkujärjestelmien toimijoiden on noudatettava toimitusketjua koskevaa asianmukaisen huolellisuuden politiikkaa, joka puuttuu litiumin, koboltin ja nikkelin hankintaan liittyviin sosiaalisiin ja ympäristöriskeihin [67]. Näiden toimenpiteiden myötä halutaan varmistaa, että akkuvarastoihin tukeutuva sähköverkkoon siirtyminen ei tapahdu ihmisoikeuksien tai biodiversiteetin kustannuksella kolmansissa maissa [68].

## 9. Sovellettavat hyvät käytännöt Suomessa

**Siirtymä keskitetystä hajautettuun ja resilienttiin järjestelmään**

Suomen sähköjärjestelmä on perinteisesti ollut vahvasti keskitetty: sitä hallitsevat suuret tuotantolaitokset ja Fingridin ylläpitämä kantaverkko. Vaikka tämä rakenne on taannut korkean toimitusvarmuuden, uusiutuvan energian vaihtelevuuden nopea kasvu ja hajautettujen akkuenergiavarastojen (BESS) yleistyminen edellyttävät myös ajattelutavan muutosta. Rakentamalla vahvat kotimarkkinat BESS-järjestelmille Suomi voi luoda kehittämisympäristön, joka tuottaa skaalautuvia ratkaisuja sähköverkon vakauttamiseen ja autonomisiin energiajärjestelmiin. Tämä tarjoaa Suomelle merkittävän mahdollisuuden: korkean lisäarvon teknologioiden kehittäminen tukee sekä kansallista energiaturvallisuutta että avaa vientimahdollisuuksia globaalissa älykkään energiasiirtymän murroksessa niin kehittyneille kuin kehittymässä oleville markkinoille.

**Joustavat jakomallit ja etäisyyskriteerit (Espanjan ja Italian mallit)**

Espanjan mallia mukaillen Suomi voisi ottaa käyttöön akkuvarastojen yhteiskäytön kiinteistörajojen yli, esimerkiksi sallimalla energiavarastojen jakamisen tietyllä etäisyydellä. Tällaiset rakennusklusterit alentaisivat investointikustannuksia ja mahdollistaisivat paikallisen energiankäytön jakamisen sekä sähköverkon tasapainottamisen tehokkaasti. Lisäksi lupaprosessien yksinkertaistaminen erityisesti taloyhtiöille ja pk-yrityksille madaltaisi investointikynnystä ja nopeuttaisi akkuenergiavarastojen laitekannan kasvua Suomessa, tukien siirtymää kohti hajautettua ja resilienttiä energiainfrastruktuuria.

**Yhteisöomistus ja sosiaalinen hyväksyntä (Tanskan malli)**

Tanskan tapaan Suomi voisi ottaa käyttöön mallin, jossa paikallisille asukkaille tarjotaan mahdollisuus omistaa osuus lähialueen varastohankkeista. Tämä lisää hankkeiden sosiaalista hyväksyttävyyttä ja varmistaa, että taloudelliset hyödyt jäävät paikallisyhteisöön. Samalla se tarjoaa kehittäjille mahdollisuuden pilotoida uusia yhteisölaskutus- ja käyttöliittymäratkaisuja.

**Pienkohteiden markkinoillepääsy (Saksan ja Pohjoismaiden mallit)**

Vaikka Suomi on edelläkävijä taajuusreservimarkkinoilla, pienimuotoisten resurssien osallistumista rajoittavat edelleen tekniset ja hallinnolliset esteet. Verotuksen ja verkkotariffien selkeyttäminen sekä aggregaattoritoiminnan tukeminen mahdollistaisivat tuhansien hajautettujen yksiköiden käyttöönoton. Tämä on edellytys maailmanluokan VPP- ja EMS-ohjelmistojen kehittämiselle.

**Digitaalinen akkupassi investointivarmuuden työkaluna**

EU:n akkuasetus (2023/1542) tuo käyttöön digitaalisen akkupassin, joka lisää läpinäkyvyyttä ja luottamusta akkuinvestointeihin. Digitaalisen elinkaaritiedon integrointi energianhallintajärjestelmiin (EMS)

mahdollistaa akkujen käyttöön, kuntoon ja kierrätykseen liittyvän tiedon systemaattisen seurannan ja analysoinnin. Tämä yhdistelmä parantaa läpinäkyvyyttä, tukee tehokkaampaa resurssien hallintaa ja edistää kiertotaloutta sekä investointien luotettavuutta. Lisäksi se tarjoaa edellytyksiä kehittää ratkaisuja, jotka perustuvat akkujen koko elinkaaren kattavaan tietoon ja automatisoituun ohjaukseen.

**Ohjelmisto- ja ohjausinnovaatiot: EMS ja VPP digitaalisena siltana**

Tekoälypohjaiset energianhallintajärjestelmät (EMS) ovat avainasemassa hajautettujen energiavarantojen tehokkaassa hyödyntämisessä, sillä ne mahdollistavat resurssien reaaliaikaisen optimoinnin ja markkinaosallistumisen. Näiden järjestelmien avulla voidaan automaattisesti ohjata ja tasapainottaa energiavirtoja sekä vastata nopeasti kysynnän ja tarjonnan muutoksiin, mikä parantaa sekä järjestelmän joustavuutta että taloudellista kannattavuutta. Grid-forming-teknologiat, kuten verkkoa muodostavat invertterit, tuovat sähköverkkoon synteettistä inertiaa ja mahdollistavat verkon vakauden ylläpidon ilman perinteisiä pyöriviä generaattoreita. Tämä teknologinen kehitys korostaa Suomen vahvaa osaamista alalla ja luo pohjan uusille innovaatioille sähköverkon digitalisaatiossa ja autonomisessa hallinnassa.

**Resilienssin vahvistaminen: saareke- ja mikroverkkoratkaisut**

BESS-järjestelmät tarjoavat merkittävää resilienssiä sähkökatkojen aikana toimimalla itsenäisinä saarekkeina, mikä korostuu erityisesti Suomen ankarissa sääolosuhteissa. Mikroverkot, jotka yhdistävät paikallisen energiantuotannon ja varastoinnin, muodostavat skaalautuvia ratkaisuja, joilla on huomattava vientipotentiaali. Älykäs kuormanpudotus ja automaattinen ohjaus parantavat näiden järjestelmien luotettavuutta ja tukevat kilpailukykyä kansainvälisillä markkinoilla. Näin suomalainen osaaminen sähköverkon autonomisessa hallinnassa ja digitalisaatiossa vahvistuu ja avaa uusia mahdollisuuksia sekä kotimaassa että globaaleilla energiamarkkinoilla.

## 11. Lähteet


1. BloombergNEF. Lithium-Ion Battery Price Survey 2025: Record Lows for Battery Prices. 2025. https://about.bnef.com/insights/clean-transport/new-record-lows-for-battery-prices/
2. Volta Foundation. 2025 Battery Report Charts Major Shifts in Global Market. 2026. https://volta.foundation/battery-report-2025
3. PR Newswire. Global Lithium-ion Battery Market reaching USD 94.4 billion by 2025. 2020. https://www.prnewswire.com/news-releases/the-global-lithium-ion-battery-market-size-is-expected-to-grow-at-a-cagr-of-16-4-from-2020-to-2025--reaching-usd-94-4-billion-by-2025-from-usd-44-2-billion-in-2020--301043731.html
4. International Energy Agency (IEA). Batteries and Secure Energy Transitions: Executive Summary. 2024. https://www.iea.org/reports/batteries-and-secure-energy-transitions/executive-summary
5. McKinsey & Company. Entire Li-ion value chain revenue projections. 2022. https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/battery-2030-resilient-sustainable-and-circular
6. IEA. The battery industry has entered a new phase. 2025. https://www.iea.org/commentaries/the-battery-industry-has-entered-a-new-phase
7. Polaris Market Research. Global Battery Market Size Analysis 2025. 2025. https://www.polarismarketresearch.com/industry-analysis/battery-market
8. IEA. Status of battery demand and supply. 2024. https://www.iea.org/reports/batteries-and-secure-energy-transitions/status-of-battery-demand-and-supply
9. Roots Analysis. Battery Market Opportunity Analysis 2024–2035. 2025. https://www.rootsanalysis.com/battery-market
10. Meta Market Monitoring. Battery market size: TWh demand review. 2024. https://metamarketmonitoring.de/en/battery-market/
11. Benchmark Mineral Intelligence. The path to half a terrawatt: Li-ion supply chain. 2016. https://source.benchmarkminerals.com/article/the-path-to-half-a-terrawatt-lithium-ion-supply-chain
12. SNE Research. Global battery manufacturing capacity database series. 2015. https://www.sneresearch.com/en/business/report/
13. McKinsey & Company. Battery 2030: Resilient, sustainable, and circular. 2023. https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/battery-2030-resilient-sustainable-and-circular
14. Grand View Research. Battery Market Size, Share & Trends Analysis Report 2025–2033. 2025. https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/battery-market
15. Fortune Business Insights. Battery Market Size and Future Outlook 2025. 2025. https://www.fortunebusinessinsights.com/battery-market-105615
16. Volta Foundation. States of Batteries Report 2020. 2020.

https://www.scribd.com/document/660144853/1-Volta-Foundation-States-of-Batteries-Report-2020
17. S&P Global Market Intelligence. Mapped: EV Battery Manufacturing Capacity. 2021. https://www.visualcapitalist.com/sp/mapped-ev-battery-manufacturing-capacity-by-region/
18. IEA. Global EV Outlook 2025: Electric vehicle batteries. 2025. https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2025/electric-vehicle-batteries, IEA Global EV Outlook 2025 trends: Heavy-duty electric vehicles. 2025. https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2025/trends-in-heavy-duty-electric-vehicles, IEA. Global EV Outlook 2025: Outlook for electric mobility. 2025. https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2025/outlook-for-electric-mobility
19. Benchmark Mineral Intelligence. Global Li-ion demand rose 29% in 2025. 2025. https://source.benchmarkminerals.com/article/global-lithium-ion-battery-demand-rose-29-in-2025
20. CNTE Power. Understanding Battery Stacks: Engineering the Powerhouse. 2025. https://en.cntepower.com/battery-stacks/
21. Synopsys. What is a Battery Management System (BMS)? 2025. https://www.synopsys.com/glossary/what-is-a-battery-management-system.html
22. BloombergNEF. Lithium-ion Battery Pack Prices Rise for First Time. 2022. https://about.bnef.com/insights/commodities/lithium-ion-battery-pack-prices-rise-for-first-time-to-an-average-of-151-kwh/
23. BloombergNEF. Lithium-Ion Battery Pack Prices Hit Record Low of $139/kWh. 2023. https://about.bnef.com/insights/clean-energy/lithium-ion-battery-pack-prices-hit-record-low-of-139-kwh/
24. APC UK / Volta Foundation. Predictions for battery pack and cell costs: 2030 perspective. 2025. https://www.apcuk.co.uk/news-events/news/battery-prices-continue-to-fall-but-supply-chains-flatten-the-curve/
25. Carbon Credits. China Now Controls 69% of the Global EV Battery Market. 2025. https://carboncredits.com/china-now-controls-69-of-the-global-ev-battery-market-as-catl-and-byd-surge-in-2025/
26. S&P Global Mobility. Where are EV battery prices headed in 2025 and beyond? 2025. https://www.spglobal.com/automotive-insights/en/blogs/2025/01/where-are-ev-battery-prices-headed-in-2025-and-beyond
27. BNEF / World Nuclear Report. Lithium Battery Price Development 2013–2024. 2024. https://www.worldnuclearreport.org/IMG/pdf/figure57.pdf
28. Fortune Business Insights (Jan 2026): *Lithium-Ion Battery Market Size, Share, Growth Drivers & Trends Report, 2034.*
29. Mordor Intelligence (Jan 2026): *Lithium-ion Battery Market Size, Growth, Share & Analysis Report 2031.* (Estimates 2026 Li-ion market at USD 136.28B with a 55.7% share for Asia-Pacific).
30. Dimension Market Research. US Battery Market Size Analysis. 2025. https://dimensionmarketresearch.com/report/battery-market/
31. McKinsey. The hidden trends in battery supply and demand: a regional analysis. 2025.

https://www.mckinsey.com/features/mckinsey-center-for-future-mobility/our-insights/the-hidden-trends-in-battery-supply-and-demand-a-regional-analysis

32. Research Nester (Jan 2026): *Lithium-ion Battery Market Size & Share, Growth Trends 2035.* (Assesses 2026 Li-ion industry size at USD 166.2B; identifies North America as the fastest-growing region).
33. Grand View Research (2026): *Lithium Market Estimates & Forecasts.* (Focuses on the strategic role of the "Lithium Triangle" in Latin America and US domestic production
34. IEA (International Energy Agency) (2025). Trends in electric car markets – Analysis
35. MarketsandMarkets (Feb 2026). Lithium-Ion Battery Materials Market worth $95.34 billion by 2030
36. IEA. Batteries and Secure Energy Transitions. 2024 https://iea.blob.core.windows.net/assets/cb39c1bf-d2b3-446d-8c35aae6b1f3a4a0/BatteriesandSecureEnergyTransitions.pdf
37. IEA. Global EV Outlook 2025 trends: Heavy-duty electric vehicles. 2025. https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2025/trends-in-heavy-duty-electric-vehicles
38. MarketsandMarkets (Feb 2026). Lithium-Ion Battery Materials Market worth $95.34 billion by 2030
39. Research Nester. *Lithium-ion Battery Market Size & Share, Growth Trends 2035*. 2026. Available from: https://www.researchnester.com/reports/lithium-ion-battery-market/1313
40. Grand View Research. *Lithium-ion Battery Market Size, Share | Industry Report 2033*. 2025. Available from: https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/lithium-ion-battery-market
41. Astute Analytica. *Lithium-ion Battery Market Size, Share [2035]*. 2026. Available from: https://www.astuteanalytica.com/industry-report/lithium-ion-battery-market
42. Future Markets, Inc. *The Global Li-ion and Next-Gen Battery Market 2026–2036*. 2025. Available from: https://www.futuremarketsinc.com/the-global-li-ion-and-next-gen-battery-market-2026-2036/
43. International Energy Agency (IEA). *Global EV Outlook 2025 – Analysis*. 2025. Available from: https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2025
44. Mordor Intelligence. *Automotive Lithium-Ion Battery Market Size, Share & Growth Research Report 2031*. 2026. Available from: https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/automotive-li-ion-battery-market
45. Research and Markets. *Lithium-Ion (Li-Ion) Market Report 2026*. 2026. Available from: https://www.researchandmarkets.com/reports/5735174/lithium-ion-li-ion-market-report, Research and Markets. *All Solid State Thin-Film Lithium-Ion Battery Market Report 2026*. 2026. Available from: https://www.thebusinessresearchcompany.com/report/all-solid-state-thin-film-lithium-ion-battery-market-report
46. Grand View Research. *U.S. Lithium-ion Battery Market Size & Outlook, 2026–2033*. 2026. Available from: https://www.grandviewresearch.com/horizon/outlook/lithium-ion-battery-market/united-states, Grand View Research. *Lithium-ion Battery Market Size, Share | Industry Report 2033*. 2025. Available from: https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/lithium-ion-battery-market
47. European Commission (Joint Research Centre). *Lithium-based batteries supply chain challenges*. 2025. Available from: https://rmis.jrc.ec.europa.eu/analysis-of-supply-chain-challenges-49b749

48. Fortune Business Insights. *Lithium-Ion Battery Market Size, Share, Growth Drivers & Trends Report, 2034*. 2026. Available from: https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/lithium-ion-battery-market-100123
49. Sovereign Security & Financial Forensics. *China's Battery Supply Chain Dominance and Europe's Strategic Vulnerabilities*. 2026. Available from: https://debuglies.com/2026/01/28/chinas-battery-supply-chain-dominance-and-europes-strategic-vulnerabilities-sovereign-security-financial-forensics-2026/
50. Mordor Intelligence. Global Secondary Battery Market Industry Analysis. 2025. https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/global-secondary-battery-market-industry
51. S&P Global Mobility. Where are EV battery prices headed in 2025 and beyond? 2025. https://www.spglobal.com/automotive-insights/en/blogs/2025/01/where-are-ev-battery-prices-headed-in-2025-and-beyond
52. Dimension Market Research. US Battery Market Size Analysis. 2025. https://dimensionmarketresearch.com/report/battery-market/
53. Rho Motion / InsideEVs. LFP overtakes nickel battery chemistry. 2025. https://insideevs.com/news/784963/lfp-overtakes-nickel-battery-chemistry/
54. Ken Research. Future of EV Batteries: Europe LFP Trends 2029. 2025. https://www.kenresearch.com/articles/future-of-ev-batteries-europe-lfp-trends-2029
55. MAN. NMC batteries for commercial vehicles: High-performance and safe. 2025. https://www.man.eu/corporate/en/newsroom/stories/nmc-batteries-for-commercial-vehicles-160064.html
56. SNE Research / CnEVPost. Global EV battery market share in Jan–Nov 2025. 2026. https://cnevpost.com/2026/01/07/global-ev-battery-market-share-jan-nov-2025/
57. Electrive. SNE Research: CATL continues to dominate global battery market. 2026. https://www.electrive.com/2026/02/04/sne-research-catl-continues-to-dominate-global-battery-market/
58. SK On / CnEVPost. Global EV battery market share in Jan–Oct 2025. 2025. https://cnevpost.com/2025/11/13/global-ev-battery-market-share-jan-oct-2025/
59. Fohlio. Vertical vs. Horizontal Integration: A Comprehensive Guide. 2025. https://www.fohlio.com/blog/vertical-vs.-horizontal-integration-a-comprehensive-guide
60. SNE Research. Global EV battery market share in Jan-Aug 2025. 2025. https://cnevpost.com/2025/10/13/global-ev-battery-market-share-jan-aug-2025/
61. MDPI. Battery industry vertical integration vs horizontal alliances. 2025. https://www.mdpi.com/2076-3417/15/22/12127
62. IEA. Global Critical Minerals Outlook 2025: Executive Summary. 2025. https://www.iea.org/reports/global-critical-minerals-outlook-2025/executive-summary
63. Discovery Alert. Top 5 Cobalt Mining Companies Globally. 2025. https://discoveryalert.com.au/cobalt-mining-companies-demand-2025/

64. Cobalt Institute. Cobalt Market Report 2024. 2025. https://www.cobaltinstitute.org/wp-content/uploads/2025/05/Cobalt-Market-Report-2024.pdf
65. MDPI. Vertical integration vs horizontal integration case studies 2025. 2025. https://www.mdpi.com/2071-1050/17/7/3211
66. Mordor Intelligence. Global Secondary Battery Market Industry Analysis. 2025. https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/global-secondary-battery-market-industry
67. European Parliament and Council. *Regulation (EU) 2023/1542 concerning batteries and waste batteries*. 2023. https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/1542/oj ja Joint Research Centre (JRC). *Overview of battery safety tests in standards for stationary battery energy storage systems*. 2024. https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC135870
68. Greencode. *The evolving landscape of battery energy storage technology*. 2024. https://greencode.vc/insights/beyond-the-charge-the-evolving-landscape-of-battery-energy-storage-technology-part-2
69. Custom Market Insights. Global Second-Life Battery Market size to USD 9.93 billion by 2030. 2023. https://www.custommarketinsights.com/report/second-life-battery-market/
70. Market Research Future. Second Life Battery Market Summary 2025–2035. 2025. https://www.marketresearchfuture.com/reports/second-life-battery-market-32233
71. Wood Mackenzie. *The Recycling vs. Second-Life Debate*. 2023. https://www.woodmac.com/news/opinion/battery-recycling-vs-second-life/
72. BloombergNEF. *Circular Economy in the Battery Sector*. 2024. https://about.bnef.com/blog/lithium-ion-battery-recycling-is-becoming-a-big-business/
73. Circular Energy Storage / WEF. The lithium-ion battery end-of-life market. 2019. https://www3.weforum.org/docs/GBA_EOL_baseline_Circular_Energy_Storage.pdf
74. ResearchAndMarkets. Battery Recycling Market – Global Outlook & Forecast 2025–2030. 2025. https://www.businesswire.com/news/home/20250930182027/en/Battery-Recycling-Global-Markets-Report-2025-2030
75. SNE Research. Global Second Life Battery Market by Geography. 2018. https://www.sneresearch.com/en/business/report_view/246/page/0
76. Bosson Research. Global Lithium-ion Battery Recycling Market Share. 2025. https://www.marketresearch.com/Bosson-Research-v4252/Global-Lithium-ion-Battery-Recycling-43831558/
77. DataM Intelligence. Circular Battery Economy Market USD 77.84 Billion. 2025. https://www.prnewswire.com/news-releases/circular-battery-economy-market-to-reach-usd-77-84-billion-by-2032
78. European Commission. New rules for waste batteries and recovery of materials. 2025. https://environment.ec.europa.eu/news/new-rules-boost-recycling-efficiency-waste-batteries-2025-07-04_en
79. Bluewater / Khabur. Why is the second-life battery market lagging in the US? 2025.

https://www.evengineeringonline.com/why-is-the-second-life-battery-market-lagging-in-the-us/
80. Circunomics. Navigating Market Volatility and Supply Chain Risks in Battery Reuse. 2025. https://www.circunomics.com/blog/second-life-ev-battery-market-challenges
81. European Commission. *Factsheet: New EU regulatory framework for batteries*. 2023. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/qanda_23_3725
82. European Commission. *Regulation (EU) 2024/1735 – Net-Zero Industry Act*. 2024. https://eur-lex.europa.eu/EN/legal-content/summary/eu-net-zero-industry-act.html
83. International Energy Agency (IEA). Batteries and Secure Energy Transitions (Executive Summary). 2024. Available from: https://www.iea.org/reports/batteries-and-secure-energy-transitions/executive-summary
84. University College London (Salmon N). Hybrid Storage Assets Briefing: European BtM Capacity. 2025. Available from: https://discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/10216820/3/Salmon_Hybrid%20Storage%20Assets%20Briefing.pdf
85. European Investment Bank (EIB). Financial Appraisal Report – European BESS Arbitrage Revenue Growth. 2025. Available from: https://www.ucl.ac.uk/bartlett/sites/bartlett/files/202509/EIB%20Financial%20Appraisal%20Report.pdf
86. Rabobank. Battery Energy Storage Systems: The Foundations of a Resilient Energy Future in the US. 2025. Available from: https://www.rabobank.com/knowledge/d011469763-battery-energy-storage-systems-the-foundations-of-a-resilient-energy-future-in-the-us
87. Green Dealflow. How to Create Revenue with a BESS Project. 2024. Available from: https://greendealflow.com/how-to-create-revenue-with-a-bess-project
88. buildData. The Global BESS Market Will Grow Twofold by 2030. 2024. Available from: https://www.builddata.info/statistics/the-global-bess-market-will-grow-twofold-by-2030/
89. Ignitis Innovation. Residential Batteries Are Establishing Their Role in European Countries. 2025. Available from: https://ignitisinnovation.com/residential-batteries-are-establishing-their-role-in-european-countries/
90. Boost ESS Power. What Are the Drivers for Battery Storage Deployment in Europe (2025)? 2025. Available from: https://www.boostesspower.com/our-latest-blogs/what-are-the-drivers-for-battery-storage-deployment-in-europe-2025/
91. Key Energy. The Evolving Energy Storage Market in Italy. 2024. Available from: https://www.key-expo.com/Data/KEY/FOTO_MEDIA/PAGINE%20SITO/Report/the-evolving-energy-storage-market-in-italy.pdf¨
92. SolarPower Europe. European Market Outlook for Battery Storage 2025–2029. 2025. Available from: https://www.solarpowereurope.org/insights/outlooks/european-market-outlook-for-battery-storage-2025-2029
93. SolarPower Europe. EU Residential Market Outlook 2022. 2022. Available from: https://resource-

platform.eu/wp-content/uploads/files/statements/2820-SPE-EU-Residential-Market-Outlook-07-mr.pdf
94. Synertics. Latest BESS Policy Updates in Europe: Spain, Germany, and Romania. 2025. Available from: https://synertics.io/blog/200/latest-bess-policy-updates-in-europe-spain-germany-and-romania
95. Energy-Storage.News. Moment of Truth: The 2026 Regulatory Agenda for Large Battery Storage in Germany. 2026. Available from: https://www.energy-storage.news/moment-of-truth-the-2026-regulatory-agenda-for-large-battery-storage-in-germany/
96. European Commission JRC. Overview of Battery Safety Tests in Standards for Stationary BESS. 2023. Available from: https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC135870
97. Frazer-Nash Consultancy, UK DESNZ. Electricity Storage Health and Safety Standards – Gap Analysis. 2024. Available from: https://assets.publishing.service.gov.uk/media/64dc98b960d123000d32c60a/electricity-storage-health-and-safety-standards-gap-analysis.pdf
98. MDPI. Energy Microgrids as Smart Structures for Self-Sufficiency. Sensors. 2025;25(21):6707. Available from: https://www.mdpi.com/1424-8220/25/21/6707
99. Diva Portal. Grid Issues for Electricity Production Based on Renewable Energy Sources in Spain, Portugal, Germany, and United Kingdom. 2012. Available from: http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:467513/FULLTEXT01.pdf
100. Rataj M. Structural Grid Limitations and Solar Oversupply: Lessons from Poland. Scientific Papers of Silesian University of Technology. 2025. Available from: https://managementpapers.polsl.pl/wp-content/uploads/2025/09/229-Rataj.pdf
101. Resources for the Future (RFF). The Response of Market and Policy Design to Increasing Shares of Renewables in California and Germany. 2012. Available from: https://media.rff.org/documents/ahead_report_renewable_comparison.pdf
102. Rabobank. Battery Energy Storage Systems: The Foundations of a Resilient Energy Future in the US. 2025. Available from: https://www.rabobank.com/knowledge/d011469763-battery-energy-storage-systems-the-foundations-of-a-resilient-energy-future-in-the-us
103. Energy-Storage.News. AI Now Links Technical and Commercial Realities of BESS Asset Management. 2025. Available from: https://www.energy-storage.news/ai-now-links-technical-and-commercial-realities-of-bess-asset-management/
104. Inepro Metering. Bidirectional Electricity Meter for V2G Applications. 2025. Available from: https://www.ineprometering.com/blog/bidirectional-electricity-meter-v2g
105. McKinsey & Company. Evaluating the Revenue Potential of Energy Storage Technologies. 2025. Available from: https://www.mckinsey.com/industries/electric-power-and-natural-gas/our-insights/evaluating-the-revenue-potential-of-energy-storage-technologies
106. Infinity Energy. Autonomous Dispatch: AI Optimization for BESS. 2025. Available from: https://www.infinitytechnologies.pro/stories/autonomous-dispatch-bess-ai-optimization

107. Energy-Storage.News. Arbitrage Remains Leading Use Case for US Grid-Scale Batteries. 2025. Available from: https://www.ess-news.com/2025/09/23/arbitrage-remains-leading-use-case-for-us-grid-scale-batteries/
108. TLS Containers. Understanding BESS Functions: A Complete Guide to Battery Energy Storage Systems. 2025. Available from: https://www.tls-containers.com/tls-blog/understanding-bess-functions-a-complete-guide-to-battery-energy-storage-systems
109. Etica AG. Microgrids & Battery Energy Storage for Resilience. 2025. Available from: https://eticaag.com/microgrids-battery-energy-storage-resilience/
110. ES Zoneo. Exploring Revenue Streams in Battery Energy Storage Systems. 2025. Available from: https://eszoneo.com/info-detail/exploring-revenue-streams-in-battery-energy-storage-systems-3
111. PwC Germany. Battery Energy Storage Systems – Opportunities and Market Perspectives. 2024. Available from: https://www.pwc.de/de/energiewirtschaft/battery-energy-storage-systems-1024.pdf
112. SEB Group. Distributed Energy Resource Aggregation and Flexibility Markets. 2024. Available from: https://webapp.sebgroup.com/mb/mblib.nsf/dld/0228B4C3C0E610EEC1258D5A00541D4E?opendocument
113. Virta. Virtual Power Plants: The Power Grid of the Future Relies on Electric Cars. 2025. Available from: https://www.virta.global/blog/virtual-power-plant-the-power-grid-of-the-future-relies-on-electric-cars
114. AltEnergyMag. Virtual Power Plants – The Future Backbone of a Decentralized Energy Ecosystem. 2025. Available from: https://www.altenergymag.com/news/2025/10/28/virtual-power-plants-the-future-backbone-of-a-decentralized-energy-ecosystem/46286/
115. Anern Store. Net Metering vs. Net Billing – Impacts on ESS ROI. 2025. Available from: https://www.anernstore.com/blogs/costs-incentives-policy/metering-billing-ess-roi
116. SolarPower Europe. EU Residential Market Outlook 2022. 2022. Available from: https://resource-platform.eu/wp-content/uploads/files/statements/2820-SPE-EU-Residential-Market-Outlook-07-mr.pdf
117. Cushman & Wakefield. The China Battery Energy Storage System (BESS) Market. April 2024. https://assets.cushmanwakefield.com/-/media/cw/apac/greater-china/insights/2024-media-files/china-battery-energy-storage-system-report-2024.pdf
118. Infolink Group. Japan Energy Storage Policies and Market Overview. June 2025. https://www.infolink-group.com/energy-article/Japa-energy-storage-policies-and-market-overview
119. Aju Press. South Korea launches $29 billion battery storage initiative. May 2025. https://www.ajupress.com/view/20250526100623287
120. Ignitis Innovation. Residential Batteries are Establishing their Role in European Countries. June 2024. Available from: https://ignitisinnovation.com/residential-batteries-are-establishing-their-role-in-european-countries/
121. Fingrid / Nordic RSC. *Nordic Grid Development Plan 2025: Role of Storage in Balancing*. 2025. Nordic Grid Development Perspective 2025

122. Clean Horizon. *European BESS Profitability Index – Nordic Market Saturation Analysis*. 2025 https://www.cleanhorizon.com/news/bess-profitability-in-europe-including-dk1-dk2/, https://www.cleanhorizon.com/news/storage-index-update-finland-in-focus/, ja Co-located BESS Case study & Market Trends in the Nordics https://www.youtube.com/watch?v=dw1eCLcN-jA&t=4s

123. Data Bridge Market Research. *Norway Battery Energy Storage System Market Size, Trends and Forecast to 2032*. 2025. https://www.databridgemarketresearch.com/reports/norway-battery-energy-storage-system-market

124. Statnett. *Annual Report 2025 & Reserve Markets Update*. 2025. https://www.statnett.no/en/about-statnett/investor-relations/annual-reports/

125. Vassmyr SS, et al. *Value-Stacking Battery Services Considering Frequency Markets and Grid-Based Voltage Support*. In: 2025 21st International Conference on the European Energy Market (EEM), 2025. available: http://dx.doi.org/10.1109/EEM64765.2025.11050264

126. Energinet. *Outlook for Ancillary Services 2024-2040: Implementation of PICASSO and MARI platforms*. 2024. https://energinet.dk/energidata/publikationer/

127. European Energy. *Kragerup BESS Project: Integrating Wind and Storage in the Danish Grid*. 2025. https://europeanenergy.com/2025/11/28/building-the-largest-combined-solar-bess-park-in-northern-europe/

128. Data Bridge Market Research. *Denmark Battery Energy Storage System Market – Industry Trends and Forecast to 2032*. 2025. https://www.databridgemarketresearch.com/reports/denmark-battery-energy-storage-system-market

129. Solarplaza. *Energy Storage in Finland: Market Insights & BESS Case Study*. 2024. https://www.solarplaza.com/resource/13149/webinar-bess-development-market-dynamics-in-finland-2024/

130. ESS News. *Hybrid pumped hydro-BESS project in Finland doubles battery capacity*. 2025. https://www.ess-news.com/2025/03/03/sens-finland-increases-capacity-hybrid-pumped-hydro-bess-project/

131. Inderes / Enersense. *Enersense wins its first large-scale Battery Energy Storage project in Finland*. 2026. https://view.news.eu.nasdaq.com/view?id=b640000030d083cd93bad9e08916fcd38&lang=en&src=micro

132. Fingrid. *Frequency Containment Reserves energy settlement update 10.2.2025*. 2025. https://www.esett.com/news/changes-in-fcr-n-energy-invoicing-in-finland-from-10-2-2025/

133. Capalo AI. *Finnish BESS Market: Unlock the Full Potential of Energy Storage*. 2024. https://capaloai.com/

134. Energinet. *Outlook for Ancillary Services 2024-2040*. 2024. https://energinet.dk/media/ww3ghhaj/the-value-of-flexibility-for-electrolyzers_linepack-flexibility-vs-onsite-storage.pdf

135. European Parliament. *Enabling framework for renewables: Legal Framework*. 2024. https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/enabling-framework-renewables_en

136. Danish Energy Agency (Energistyrelsen). *Promoting Renewable Energy: The Danish Renewable Energy Act (VE-loven)*. 2025. https://ens.dk/en/our-responsibilities/wind-power/legal-framework-and-conditions-wind-power, ja Danish Energy Agency. *Community Participation in Wind Energy: Ownership Schemes and the Guarantee Fund*. 2024. https://ens.dk/en/our-responsibilities/energy-agreements-and-policy/renewable-energy-act-and-schemes

137. Toke L. *Community Ownership and Local Acceptance of Wind Energy in Denmark*. 2023. https://doi.org/10.5278/ijsepm.7241

138. MITECO. *Real Decreto 244/2019: Condiciones del autoconsumo de energía eléctrica*. 2019. https://www.boe.es/eli/es/rd/2019/04/05/244

139. IDAE. *Guía profesional de tramitación del autoconsumo colectivo*. 2024. https://www.idae.es/tecnologias/energias-renovables/oficina-de-autoconsumo/guias-tecnicas-su-autoconsumo

140. PV Magazine / APPA. *Spain's and Italy's energy storage market: Regulatory impacts 2025*. 2025. https://www.ess-news.com/2026/02/17/spains-behind-the-meter-storage-grew-by-119-in-2025/

141. BCC Research. Global Vehicle-to-Grid (V2G) Market – Industry Forecast. 2025. Available from: https://www.bccresearch.com/pressroom/fcb/global-vehicle-to-grid-market

142. Mordor Intelligence. Vehicle-to-Grid (V2G) Market – Analysis & Forecast. 2025. Available from: https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/vehicle-to-grid-v2g-market

143. ISO. ISO 15118-20: Road Vehicles — Vehicle-to-Grid Communication Interface (Part 20). 2022. Available from: https://www.iso.org/standard/72216.html

144. The Mobility House. Implementing V2G – German Federal Government Clarification. 2025. Available from: https://mobilityhouse-energy.com/int_en/knowledge-center/article/implementing-v2g

145. Nuvve Corp. 2026 Outlook: The Future of Vehicle-to-Grid (V2G). 2026. Available from: https://nuvve.com/2026-outlook-report/

146. EASE. Ancillary Services from EV Batteries – Pilot Results. 2025. Available from: https://energystorageeurope.eu/wp-content/uploads/2021/08/Ancillary-Services.pdf

147. U.S. Department of Energy. Vehicle Grid Integration (VGI) – Assessment Report. 2025. Available from: https://www.energy.gov/sites/default/files/2025-01/Vehicle_Grid_Integration_Assessment_Report_01162025.pdf

148. P3 Automotive. Bidirectional Charging – Worth the Hype? 2025. Available from: https://www.p3-group.com/wp-content/uploads/2025/03/P3-Bidirectional-Charging–Worth-the-Hype.pdf
149. eMobility Europe. Harnessing the Potential of Vehicle-to-Grid (V2G). 2025. Available from: https://www.emobilityeurope.org/wp-content/uploads/2025/01/harnessingthepotentialofvehicle-to-gridv2g-1.pdf
150. European Commission. Energy Communities Repository – Policy Database. 2022–2024. Available from: https://energy-communities-repository.ec.europa.eu/index_en
151. ETIP SNET. Research & Innovation Implementation Plan 2025+. European Technology & Innovation Platform Smart Networks for Energy Transition; 2024. Available from: https://www.etip-snet.eu/wp-content/uploads/2024/01/ETIP-SNET-RI-Implementation-Plan-2025.pdf
152. European Commission. Directive (EU) 2019/944 on common rules for the internal market for electricity. Official Journal of the European Union. 2019. Available from: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32019L0944
153. Andoni M, Robu V, Flynn D, et al. Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities. *Renew Sustain Energy Rev.* 2019;100:143–174. Available from: https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.10.014
154. Li H, Xiao F, Yin L, Wu F. Application of blockchain technology in energy trading: A review. *Front Energy Res.* 2021;9:671133. Available from: https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenrg.2021.671133/full
155. Reid RL. How Florida's Babcock Ranch survived Hurricane Ian. *ASCE Civil Engineering Magazine.* 2024. Available from: https://www.asce.org/publications-and-news/civil-engineering-source/article/2024/01/10/how-floridas-babcock-ranch-survived-hurricane-ian
156. Leffler T. Solar-powered Florida town survived Hurricane Ian — with lights on. *UPI / AccuWeather News.* 2022. Available from: https://www.upi.com/Top_News/US/2022/10/03/solar-powered-town-Babcock-Ranch-Hurricane-Ian/1231664820000/
157. Cohn L. Microgrids created electric sanctuaries amidst Hurricane Ian. *Microgrid Knowledge.* 2022. Available from: https://microgridknowledge.com/microgrids-hurricane-ian-florida/
158. Federal Energy Regulatory Commission (FERC). Order No. 2222: Participation of Distributed Energy Resource Aggregations in Wholesale Markets. 2020–2021. · Available from: https://www.ferc.gov/news-events/news/ferc-issues-final-rule-aggregated-distributed-energy-resources
159. European Commission. Directive (EU) 2018/2001 on the promotion of the use of energy from renewable sources (RED II). Official Journal of the European Union. 2018. Available from: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32018L2001
160. ENTSO-E & ENTSOG. TYNDP 2024 Scenarios Report. Brussels: ENTSO-E; 2024. https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/tyndp-documents/TYNDP2024/Scenarios/TYNDP2024_Scenarios_Report.pdf
161. European Commission. COM(2023) 757 final: *Grids, the Missing Link – EU Action Plan for Grids.*

2023. Available from: https://energy.ec.europa.eu/system/files/2023-11/COM_2023_757_1_EN_ACT_part1_v6.pdf

162. ACER & CEER. ACER-CEER Position on Anticipatory Investments. 2024. https://www.acer.europa.eu/sites/default/files/documents/Publications/ACER-CEER_Position_Paper_on_Anticipatory_Investments.pdf
163. European Commission. Commission Notice on guidance for anticipatory investments for forward-looking electricity networks. Official Journal C/2025/3179. 2025. Available from: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52025XC0319%2801%29
164. Interact Analysis. *Analysis of energy storage policies in key countries: Germany*. [Internet]. [cited 2026 Feb 18]. Available from: https://interactanalysis.com/insight/analysis-of-energy-storage-policies-in-key-countries-germany/
165. Trientec. *Photovoltaic Subsidies in Germany 2025: Key Programs and Benefits*. [Internet]. 2025 [cited 2026 Feb 18]. Available from: https://www.trientec.com/news/photovoltaic-subsidies-in-germany-2025-key-programs-and-benefits
166. University College London (Salmon N). *Hybrid Storage Assets Briefing: European BtM Capacity*. [Internet]. 2025 [cited 2026 Feb 18]. Available from: https://discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/10216820/3/Salmon_Hybrid%20Storage%20Assets%20Briefing.pdf
167. Ignitis Innovation. *Residential batteries establishing their role in European countries*. [Internet]. 2025 [cited 2026 Feb 18]. Available from: https://ignitisinnovation.com/residential-batteries-are-establishing-their-role-in-european-countries/
168. Boost ESS Power. *What are the drivers for battery storage deployment in Europe (2025)?* [Internet]. 2025 [cited 2026 Feb 18]. Available from: https://www.boostesspower.com/our-latest-blogs/what-are-the-drivers-for-battery-storage-deployment-in-europe-2025/
169. Corinex. *How Italy's "Superbonus 110%" Tax Credit Fueled Growth but Overloaded the Grid*. [Internet]. 2023 [cited 2026 Feb 18]. Available from: https://www.corinex.com/articles/italy-superbonus-tax-credit-growth-grid-debt
170. Key Energy Expo. *The evolving energy storage market in Italy*. [Internet]. 2024 [cited 2026 Feb 18]. Available from: https://www.key-expo.com/Data/KEY/FOTO_MEDIA/PAGINE%20SITO/Report/the-evolving-energy-storage-market-in-italy.pdf
171. HELAPCO (SolarPower Europe). *European Market Outlook for Residential Battery Storage 2022*. [Internet]. 2022 [cited 2026 Feb 18]. Available from: https://helapco.gr/xoorigle/European_Market_Outlook_BEISS_SPE_2022_d27fb18f8e_compressed.pdf
172. Visual Capitalist. *Next-Gen Battery Capacity by Country in 2025*. [Internet]. 2023 [cited 2026 Feb 18]. Available from: https://www.visualcapitalist.com/next-gen-battery-capacity-by-country-in-2025/

173. Gridx.ai. *What is net metering in the Netherlands (salderingsregeling)*. [Internet]. 2024 [cited 2026 Feb 18]. Available from: https://www.gridx.ai/knowledge/what-is-net-metering-in-the-netherlands-salderingsregeling
174. Zonnefabriek. *Net metering phase-out for 2025 canceled*. [Internet]. 2022 [cited 2026 Feb 18]. Available from: https://www.zonnefabriek.nl/en/news/net-metering-phase-out-for-2025-canceled/
175. Luxpowertek. *Netherlands Net Metering Scheme details*. [Internet]. 2025 [cited 2026 Feb 18]. Available from: https://luxpowertek.com/blog/netherlands-net-metering-scheme/
176. Angile Energy. *Home Battery Reduces Your Energy Bill After Net-Metering Ends*. [Internet]. 2025 [cited 2026 Feb 18]. Available from: https://www.angile-energy.com/latest-news/532.html
177. China Briefing. *China's lithium-ion battery industry: overcoming supply chain challenges*. [Internet]. 2023 [cited 2026 Feb 18]. Available from: https://www.china-briefing.com/doing-business-guide/china/sector-insights/china-s-lithium-ion-battery-industry-overcoming-supply-chain-challenges
178. Kleinman Center for Energy Policy (University of Pennsylvania). *Battling for Batteries: Li-ion Policy in the U.S. and China*. [Internet]. 2022 [cited 2026 Feb 18]. Available from: https://kleinmanenergy.upenn.edu/research/publications/battling-for-batteries-li-ion-policy-and-supply-chain-dynamics-in-the-u-s-and-china/
179. Discovery Alert. *China's Strategic Shift Away from Battery Export Subsidies*. [Internet]. 2025 [cited 2026 Feb 18]. Available from: https://discoveryalert.com.au/china-battery-export-tax-rebate-impacts-2026/
180. VoxChina. *Timing of China's whitelist policy and its impacts*. [Internet]. 2019 [cited 2026 Feb 18]. Available from: https://voxchina.org/show-3-402.html
181. Discovery Alert. *China's Battery Market Growth 2025: Policy Drivers*. [Internet]. 2025 [cited 2026 Feb 18]. Available from: https://discoveryalert.com.au/chinas-battery-market-growth-2025/
182. Center for Climate and Energy Solutions (C2ES). *The 30D and 45X tax credits explained*. [Internet]. 2025 [cited 2026 Feb 18]. Available from: https://www.c2es.org/2025/09/the-30d-45x-tax-credits-explained/
183. U.S. Department of the Treasury. *Advanced Manufacturing Production Tax Credit (§ 45X) – Presentation Slides*. [Internet]. 2024 [cited 2026 Feb 18]. Available from: https://home.treasury.gov/system/files/8861/2024.12.12.45X_Slides%20Final.pdf
184. S&P Global. *EV battery supply chain under pressure from new US policy*. [Internet]. 2025 [cited 2026 Feb 18]. Available from: https://www.spglobal.com/automotive-insights/en/blogs/2025/11/ev-battery-supply-chain-under-pressure
185. S&P Global. *"One Big Beautiful Bill Act (2025)" – US policy summary*. [Internet]. 2025 [cited 2026 Feb 18]. Available from: https://www.spglobal.com/automotive-insights/en/blogs/2025/11/ev-battery-supply-chain-under-pressure
186. Bipartisan Policy Center. *2025 Reconciliation Debate: One Big Beautiful Bill Act – Energy Provisions*. [Internet]. 2025 [cited 2026 Feb 18]. Available from: https://bipartisanpolicy.org/explainer/2025-reconciliation-debate-one-big-beautiful-bill-act-energy-provisions/

187. Benchmark Mineral Intelligence. *What does the "Big Beautiful Bill" mean for EVs and batteries?* [Internet]. 2025 [cited 2026 Feb 18]. Available from: https://source.benchmarkminerals.com/article/what-does-the-big-beautiful-bill-mean-for-the-ev-battery-and-critical-minerals
188. Net Zero Compare. *EU Net-Zero Industry Act Regulation Summary*. [Internet]. 2024 [cited 2026 Feb 18]. Available from: https://netzerocompare.com/policies/eu-net-zero-industry-act-eu-nzia
189. European Commission. *The Net-Zero Industry Act explained*. [Internet]. 2023 [cited 2026 Feb 18]. Available from: https://commission.europa.eu/topics/competitiveness/green-deal-industrial-plan/net-zero-industry-act_en
190. HSF Kramer (Herbert Smith Freehills). *The Net-Zero Industry Act: New implementing rules to accelerate clean technology manufacturing in the EU*. [Internet]. 2025 [cited 2026 Feb 18]. Available from: https://www.hsfkramer.com/notes/energy/2025-posts/the-net-zero-industry-act-new-implementing-rules-to-accelerate-clean-technology-manufacturing-in-the-eu
191. EUR-Lex. *Regulation (EU) 2024/1735 – Net-Zero Industry Act (summary)*. [Internet]. 2024 [cited 2026 Feb 18]. Available from: https://eur-lex.europa.eu/EN/legal-content/summary/eu-net-zero-industry-act.html
192. European Parliament. *EU response to the USA IRA: Temporary Crisis and Transition Framework*. [Internet]. 2023 [cited 2026 Feb 18]. Available from: https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/IDAN/2023/740087/IPOL_IDA(2023)740087_EN.pdf
193. German Council on Foreign Relations (DGAP). *Europe's Green Industrial Policy and the United States' IRA*. [Internet]. 2023 [cited 2026 Feb 18]. Available from: https://dgap.org/en/research/publications/europes-green-industrial-policy-and-united-states-ira
194. McKinsey & Company. *The battery cell component opportunity in Europe and North America*. [Internet]. 2023 [cited 2026 Feb 18]. Available from: https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/the-battery-cell-component-opportunity-in-europe-and-north-america