

LUT-yliopiston

# ENERGIA- SELONTEKO

2024 | Varma, kestävä ja kohtuuhintainen energia

LUT-yliopiston

# ENERGIA- SELONTEKO 2024

**Varma, kestävä ja kohtuuhintainen energia  
9/2024**

**Toimittajat:** Eeva-Lotta Apajalahti, Timo Hyppänen

**Toimitussihteeri:** Janina Jokimies

**Kirjoittajat:**

Jero Ahola  
Salla Annala  
Christian Bryer  
Alicja Dankowska  
Aki Grönman  
Katja Hynynen  
Juhani Hyvärinen  
Jasmin Jaanto  
Jouni Havukainen  
Samuli Honkapuro  
Hannu Karjunen  
Pertti Kauranen  
Antti Kosonen  
Katja Kuparinen  
Petteri Laaksonen  
Jukka Lassila  
Clara Mendoza Martinez  
Hanna Paulomäki  
Svetlana Proskurina  
Olli Pyrhönen  
Tapio Ranta  
Ayesha Sadiqa  
Jani Sillman  
Risto Soukka  
Heikki Suikkanen  
Roosa Talala  
Teemu Turunen-Saaresti  
Tero Tynjälä  
Esa Vakkilainen

**LISÄTIETOJA:**

[media@lut.fi](mailto:media@lut.fi)  
[etunimi.sukunimi@lut.fi](mailto:etunimi.sukunimi@lut.fi)  
[lut.fi/energiaselonteko](https://lut.fi/energiaselonteko)

**LUT-yliopisto | Raportit ja selvitykset**

Järjestysnumero sarjassa: 133  
ISSN-L 2243-3384, ISSN 2243-3384

**Painettu julkaisu:** ISBN 978-952-412-144-6

**Sähköinen julkaisu:** ISBN 978-952-412-145-3 (PDF)

**Taitto:** Mirikka Vaherkylä



# SISÄLLYSLUETTELO

<b>1. TIIVISTELMÄ.....</b>	<b>7</b>
<i>Teksti: Eeva-Lotta Apajalahti ja Timo Hyppänen</i>	
<b>2. KATSAUS ENERGIAJÄRJESTELMIEN MUUTOKSIIN .....</b>	<b>10</b>
<i>Teksti: Eeva-Lotta Apajalahti, Timo Hyppänen, Ayesha Sadiqa, Roosa Talala, Hanna Paulomäki</i>	
2.1 Energiamurros .....	10
2.1.1 Energiamurroksen taustaa .....	10
2.1.2 Tärkeimmät teknologiset keinot energiamurroksessa.....	11
2.1.3 Energiamurroksen maailmanlaajuiset ajurit .....	12
2.2 Energiakriisin vaikutukset .....	13
2.2.1 Tilanne Euroopassa.....	13
2.2.2 Tilanne Suomessa .....	14
<b>3. ENERGIAVARMUUS .....</b>	<b>16</b>
3.1 Energiavarmuuteen kohdistuvat uhat .....	16
<i>Teksti: Christian Breyer</i>	
3.2 Tapahtumat, jotka vaikuttavat energian toimitusvarmuuteen Suomessa.....	18
<i>Teksti: Esa Vakkilainen</i>	
3.3 Energiajärjestelmän teknologioiden edellyttämät raaka-aineet ja arvoketjut.....	19
<i>Teksti: Christian Breyer</i>	
3.4 Energiainfrastruktuurin tila ja kehittämistarpeet .....	21
<i>Teksti: Hannu Karjunen, Tero Tynjälä</i>	
3.5 Tuotannon ja kulutuksen välinen tasapaino .....	22
<i>Teksti: Esa Vakkilainen</i>	
3.6 Energian toimitusvarmuuden hallinta Suomessa .....	23
<i>Teksti: Tero Tynjälä, Hannu Karjunen</i>	
<b>4. SÄHKÖMARKKINAT JA SÄHKÖN HINNOITTELU .....</b>	<b>29</b>
<i>Teksti: Samuli Honkapuro, Salla Annala and Jasmin Jaanto</i>	
4.1 Sähkötalouden toimijat, roolit, oikeudet ja vastuut.....	29
4.2 Sähkötalouden kehitys ja rakenne.....	29
4.2.1 Sähkötalouden markkinapaikat.....	30
4.2.2 Sähkön kuluttajahinnan muodostuminen.....	33
4.3 Sähkötalouden mallit ja niiden kehitys.....	34
4.4 Vuoden 2022 energiakriisi – mitä sähkötaloudella tapahtui?.....	36

<b>5. ENERGIAJÄRJESTELMIEN KESTÄVYYS .....</b>	<b>39</b>
<i>Teksti: Eeva-Lotta Apajalahti, Alicja Dankowska, Jouni Havukainen, Clara Mendoza Martinez, Hanna Paulomäki, Jani Sillman, Risto Soukka, Ayesha Sadiqa, Roosa Talala</i>	
5.1 Kestävyystavoitteet ja päämäärät Suomessa .....	39
5.2 Suomen mahdollisuudet ja riskit energiamurroksessa .....	41
5.3 Kansalaisten ja yhteisöjen kasvava rooli .....	48
<b>6. ENERGIATEKNOLOGIOIDEN KEHITTYMINEN .....</b>	<b>50</b>
6.1 Merkittävimmät energialähteet Suomessa .....	50
6.1.1 Bioenergia .....	50
<i>Teksti: Esa Vakkilainen, Katja Kuparinen, Clara Mendoza Martinez, Svetlana Proskurina, Tapio Ranta</i>	
6.1.2 Ydinenergia .....	51
<i>Teksti: Juhani Hyvärinen, Heikki Suikkanen</i>	
6.1.3 Tuulivoima .....	54
<i>Teksti: Olli Pyrhönen, Katja Hynynen, Petteri Laaksonen</i>	
6.1.4 Aurinkoenergia .....	55
<i>Teksti: Antti Kosonen</i>	
6.1.5 Lämpöpumput .....	57
<i>Teksti: Teemu Turunen-Saaresti</i>	
6.2 Muut energiateknologiat, energiansäästö ja energiayhteisöt.....	58
6.2.1 Vetyratkaisut.....	58
<i>Teksti: Tero Tynjälä, Jero Ahola, Pertti Kauranen, Petteri Laaksonen</i>	
6.2.2 Hiilidioksidipäästöjen hallinta .....	60
<i>Teksti: Hannu Karjunen, Tero Tynjälä</i>	
6.2.3 Energian varastointi .....	61
<i>Teksti: Pertti Kauranen, Aki Grönman, Jukka Lassila, Teemu Turunen-Saaresti</i>	
6.2.4 Energiansäästö ja energiatehokkuus.....	63
<i>Teksti: Jero Ahola, Esa Vakkilainen, Teemu Turunen-Saaresti</i>	
6.2.5 Energiayhteisöt.....	65
<i>Teksti: Eeva-Lotta Apajalahti, Alicja Dankowska</i>	
<b>7. LÄHTEET .....</b>	<b>67</b>

# ESIPUHE

LUT-yliopistolla on pitkät perinteet energiatekniikan tutkimuksessa, ja se on edelleen yksi keskeisistä painopisteistämme. Energiajärjestelmien kehityksessä tapahtuu tällä hetkellä paljon, ja energiamurroksen edetessä tarve tuottaa yhteiskunnallisesti relevanttia ja luotettavaa tietoa energiajärjestelmistä kasvaa jatkuvasti.

Yliopistojen kolmas tärkeä tehtävä opetuksen ja tutkimuksen lisäksi on tuottaa ymmärrettävää ja asiantuntevaa tietoa kansalaisyhteiskunnalle ja päättäjille. LUT-yliopiston monipuolinen energia-alan osaaminen tarjoaa hyvät mahdollisuudet raportoida energiajärjestelmien kehitysnäkymiä myös yhteiskunnan tarpeisiin.

Energiajärjestelmän kehitys vaikuttaa kaikkien kansalaisten arkeen. Sen luotettavuudella ja kustannustehokkuudella on merkittävä vaikutus yritysten ja kansantalouden suorituskykyyn ja sitä kautta välillisesti myös julkisten palvelujen rahoittamiseen. Erityisesti tuulivoimainvestointien painottuminen läntiseen Suomeen osoittaa, kuinka energiajärjestelmä vaikuttaa myös Suomen alueelliseen kehitykseen. Energian merkittävyyttä ei voida myöskään liikaa korostaa kansainvälisten kriisien keskeisenä elementtinä. Venäjän hyökkäys Ukrainaan ja siitä seurannut energiakriisi Euroopassa on tästä ajankohtaisin esimerkki.

LUT-yliopisto julkaisi ensimmäisen energiaselontekonsa vuonna 2022. Tavoitteena on tälläkin kertaa tuottaa ajantasaista ja asiantuntevaa tietoa energiajärjestelmän kehitysnäkymistä, haasteista ja mahdollisuuksista niin asiantuntijoille kuin tavallisille kansalaisillekin. Tällä kertaa raportista on saatavilla myös englanninkielinen versio, joka palvelee kansainvälistä ja Suomen energiajärjestelmästä kiinnostunutta lukijakuntaa.



**Olli Pyrhönen**

*dekaani*

*LUT-yliopiston energiajärjestelmien tiedekunta*

# JOHDANTO

**Luet LUT-yliopiston** uusinta ja järjestyksessään toista energiaselontekoa. Tämä on energiajärjestelmien tiedekunnan tutkijoiden yhdessä tuottama julkaisu, jossa pyrimme tarjoamaan ajankohtaisia päivityksiä ja perustietoa jatkuvasi kehittyvistä energiajärjestelmistämme.

**Tässä selonteossa** LUTin energiajärjestelmien koulun asiantuntijat tarjoavat popularisoitua tietoa energiaan liittyvistä aiheista, jotka perustuvat LUTin uusimpaan tutkimustyöhön sekä ajankohtaisimpiin ja luotettaviin pitämiimme lähteisiin. Energiaselonteko on suunnattu kaikille energiajärjestelmistä kiinnostuneille, kuten päättäjille, virkamiehille, kouluttajille ja yhdistyksille. Energiaselonteko palvelee seuraavia tarkoituksia:

- » Toteuttaa yliopistojen niin kutsuttua ”kolmatta tehtävää” eli tuottaa ja tarjoaa tietoa ja tuotoksia yhteiskunnan ja sen kehityksen hyödyksi.
- » Käsittelee yhteiskunnan ja kansantalouden energiajärjestelmään liittyviä haasteita.
- » Tukee Suomen hiilineutraalin strategian kehittämistä ja kansallista vähähiilistä energiamurrosta.
- » Tukee yhteiskunnan toimijoita energia-asioita koskevilla päätöksillä ja investoinneilla.
- » Tarjoaa tietoa kaikille, jotka ovat kiinnostuneet energiajärjestelmistä ja energiamurroksesta Suomessa ja maailmanlaajuisesti sekä energiajärjestelmien tärkeimmistä osista ja eri energiateknologioiden päivityksistä.
- » Toimii LUT-yliopiston tutkijoiden yhteisenä foorumina, jonka tuotoksilla on yhteiskunnallista vaikutusta.

**Tämä energiaselonteko** perustuu edelliseen, vuonna 2022 julkaistuun LUT-yliopiston energiaselontekoon *Kohti hiilineutraalia Suomea* (LUT 2022a). Nämä kaksi julkaisua muodostavat jatkumon Suomessa meneillään olevasta energiamurroksesta ja siitä, miten Suomi on saavuttamassa hiilineutraaliuden. Molempien selontekojen tarkoituksena on tarjota ajantasai-

nen yleiskatsaus Euroopan laajuisiin ja globaaleihin tapahtumiin ja olosuhteisiin, joilla on vaikutuksia Suomeen. Tässä energiaselonteossa päivitetään eri energiateknologioiden tämänhetkistä kehitystä ja tulevaisuuden näkymiä, mutta ei kuitenkaan toisteta eri energiateknologioiden yksityiskohtaisia ominaisuuksia, jotka ovat luetavissa edellisestä selonteosta (LUT 2022a).

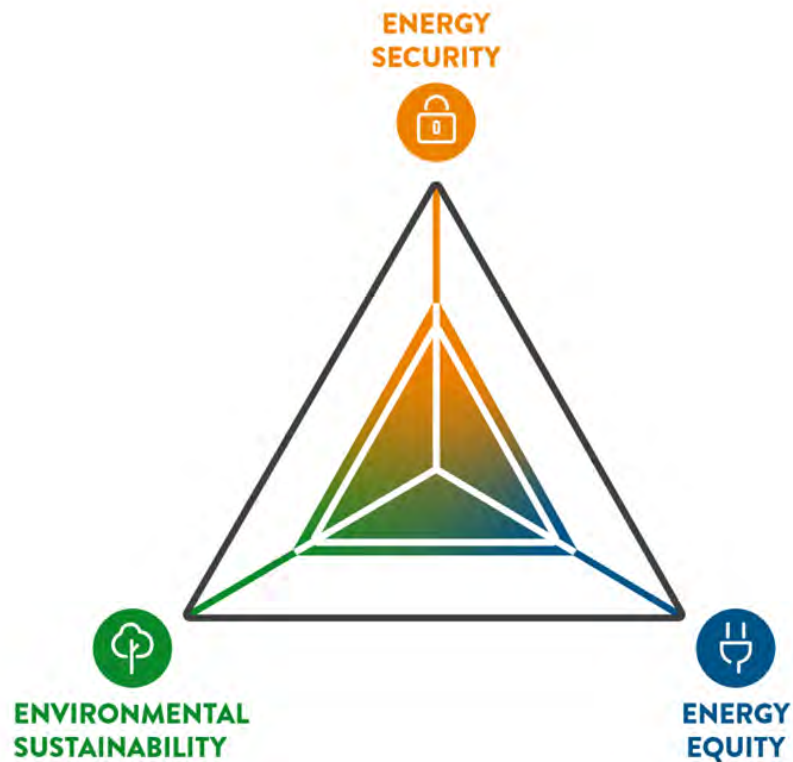
**Kun edellistä** selontekoa laadittiin ja viimeisteltiin alkuvuodesta 2022, merkit alkavasta energiakriisistä alkoivat näkyä selvemmin. Edellisessä energiaselonteossa keskityttiin kuitenkin kuvaamaan energiajärjestelmän keskeisten käsitteiden ja teknologioiden ominaisuuksia sekä esittämään kolme polkua kohti hiilineutraaliutta. Oli liian aikaista kuvata, millaisia muutoksia Venäjän hyökkäys Ukrainaan ja sitä seuranneet talouspakotteet toisivat mukanaan ja mitkä olisivat pidemmän aikavälin seuraukset. Nyt tiedämme energiakriisin välittömät ja keskipitkän aikavälin seuraukset, joita ovat esimerkiksi sähkön hinnan nousu kaikkialla Euroopassa, energiajärjestelmien turvallisuusvaikutukset ja geopolitiittiset riskit, joita viimeaikainen kriisi on tuonut esiin.

**Energiakriisin viimeaikaisten** haasteiden lisäksi energiamurros muuttaa energiajärjestelmäämme nopeasti monen eri tekijän seurauksena. Tällaisia tekijöitä ovat muun muassa vaihtelevan uusiutuvan energian suuri osuus, tarve kehittää infrastruktuuria, joustavuutta ja varastointia aiempaa nopeammin, sähkön hinnan vaihtelut, tarve nopeuttaa hiilidioksidipäästöjen poistamista, uusiutuvan energian lisäämiseen liittyvät paineet biomassan käytölle ja siten paineet maankäytön kestäväälle käytölle biodiversiteettitavoitteiden saavuttamiseksi ja hiilinielujen säilyttämiseksi, pienten modulaaristen reaktoreiden kehitys ja tarvittavat lainsäädäntömuutokset sekä vety- ja power-to-x-ratkaisujen kehitys. Usein kriisin aikana palataan perusasioiden äärelle ja turvaudutaan johonkin tuttuun. Myös tässä energiaselonteossa palaamme energiajärjestelmien perusasioiden äärelle ja perustavan-

laatuisimpaan yhteiskunnalliseen kysymykseen: miten varmistetaan puhdas, kestävä ja kohtuuhintainen energia tulevaisuudessa?

**Energiakriisi** ja muut energiamurrosta eteenpäin ajavat kehityspolut ja edellä mainitut tekijät muuttavat energiajärjestelmiämme jatkuvasti. Kuitenkin ne perusrakenteet, joiden varaan rakennamme energiatulevai-

suutemme, ovat pysyneet ja pysyvät samoina. Siksi keskitymme kestäväan energiajärjestelmän kolmeen perusulottuvuuteen, joita käsittelemme kolmessa pääluvussa (luvut 4–6) energiaselonteossa. Nämä kolme keskeistä ulottuvuutta ovat energiavarmuus, energian oikeudenmukaisuus ja ympäristön kestävyys, jotka tunnetaan myös nimellä energiatrilemma (WEC 2022).



Kuva 1. Energiatrilemma (WEC 2022)

**World Energy Council** (2022) määrittelee energiatrilemmän kolme keskeistä osatekijää keinoiksi saavuttaa "vakaat, kohtuuhintaiset ja ympäristöä säästävät energiajärjestelmät". WEC kutsuu sitä "trilemmaksi", koska kyseessä on sosio-tekniisten elementtien yhdistelmä, "johon liittyy monimutkaisia toisiinsa kietoutuneita yhteyksiä julkisten ja yksityisten toimijoiden, hallitusten ja sääntelyviranomaisten, taloudellisten ja sosiaalisten tekijöiden, kansallisten resurssien, ympäristönäkökohtien ja yksilöiden käyttäytymisen välillä" (WEC 2022).

**Tämän energiaselonteon** kolme päälukua poikkeavat hieman WEC:n luokittelusta, sillä niissä keskitytään energiavarmuuteen, energian hinnoitteluun (sisältäen markkinahintojen muodostumisen ja energian loppukäyttäjien sopimusmallien kuvaukset), sekä energian kestävyteen, jossa yhdistyvät sekä ympäristöön että yhteiskuntaan kohdistuvat energiajärjestelmien muutoksen vaikutukset.



# 1. TIIVISTELMÄ

## Tausta

Ilmastonmuutoksen hillintä ja meneillään oleva energiamurros tuovat merkittäviä rakenteellisia muutoksia energiajärjestelmiin. Viimeaikaiset tapahtumat, joista suurimpana Venäjän hyökkäyssota Ukrainaan, on aiheuttanut lisää nopeita muutoksia ja monin paikoin energiakriisin, joka vaikuttaa eri alueiden energiajärjestelmiin eri tavoin riippuen niiden rakenteista. Suomessa muutokset ovat näkyneet erityisesti sähkön hinnan ajoittaisina nousuina ja energian saatavuuden liittyvinä epävarmuuksina.

Energiajärjestelmien kehittäminen yhteiskunnallisten tavoitteiden mukaisesti edellyttää monipuolista päätöksentekoa investointien, kehittämisen ja ohjauksen osalta. Kehittyvät uudet rakenteet ja teknologiat energiajärjestelmässä tekevät tilanteesta kuitenkin helposti monimutkaisen ja vaikeaselkoisen kokonaisuuden. Jotta päätöksenteko jatkuvasti muuttuvassa ympäristössä on mahdollista, tarvitaan hyvää ja luotettavaa tietoa energiajärjestelmän tilasta ja erilaisista vaihtoehdoista. LUT-yliopisto tukee energiajärjestelmän kehittämistä tarjoamalla energia-asiantuntijoidensa kokoamaa tietoa energiajärjestelmän tilasta ja teknologiasta.

Ensimmäisessä, vuonna 2022 julkaistussa selonteossa keskityttiin tarjoamaan yleistajuista perustietoa energiajärjestelmästä ja antamaan kokonaiskuva sen kehittämiseen liittyvistä perustekijöistä sekä erilaisista poluista kohti hiilineutraalia Suomea. Tässä toisessa vuonna 2024 julkaistussa selonteossa keskitytään erityisesti energiajärjestelmien kolmeen keskeiseen pilariin sekä energiakriisin seurauksiin ja sen vaikutuksiin energiajärjestelmässä. Selonteossa käsitellyt kolme keskeistä pilaria ovat: energian saatavuuden varmuus, sähkön hinnan muodostuminen ja energiajärjestelmien kestävyys. Vaikka tärkeimmät energiateknologiat ja niiden piirteet on jo kuvattu ensimmäisessä energiaselonteossa, on tähän toiseen energiaselontekoon sisällytetty kaikkien keskeisten energiateknologioiden ja muiden tekijöiden viimeaikainen kehitys.

## Energiavarmuus

Suomen energiajärjestelmän varmuus on hyvällä tasolla sen monipuolisuuden, vähäpäästöisyyden, teknologisen kehityksen ja maan poliittisen vakauden ansiosta. Viime aikoina energian saatavuus ja omavaraisuus ovat parantuneet, kun investoinnit tuulivoimaan ovat lisänneet vähäpäästöistä kapasiteettia ja uusi ydinvoimala on otettu käyttöön Olkiluodossa.

Vaikka Suomen sähköjärjestelmän varmuus on suhteellisen hyvä, on tärkeää tehdä varautumissuunnitelmia. Erityisesti talven huippukäytön aikana on varmistettava, että kulutus ja tuotanto on tasapainossa ja tarvittava sähkömäärä voidaan toimittaa. Myös sähköverkon vakauden säilymiseen on kehitettävä ratkaisuja niin, että otetaan huomioon perinteisten vakautta tukevien voimalaitosten vähentyminen ja vakauteen haasteita aiheuttavan tuulivoiman nopea kasvu. Energiamurros muuttaa järjestelmää jatkuvasti, mikä korostaa tarvetta kehittää muutosjoustavaa eli resilienssiä energiajärjestelmää, sen infrastruktuuria sekä reservimarkkinoita ja varmuusvarastoja.

Energiamurroksessa tarvittavien komponenttien ja mineraaliraaka-aineiden maailmanlaajuinen saatavuus sekä niihin liittyvät geopoliittiset riskit on tällä hetkellä yksi suurimmista energiavarmuuteen liittyvistä huolenaiheista. Näihin haasteisiin voidaan vastata muun muassa kierrättämällä materiaaleja, kehittämällä turvallisempia toimitusketjuja ja hyödyntämällä vaihtoehtoisia teknologioita, jotka vähentävät riippuvuutta kriittisistä raaka-aineista ja yksittäisistä maista.

## Sähkömarkkinat ja sähkön hinnoittelu

Suomi on kiinteä osa Euroopan sähkömarkkinoita, mikä pyrkii toteuttamaan Lissabonin sopimuksen tavoitetta luoda yhtenäiset sisämarkkinat. Euroopassa on käytössä samantyyppiset markkinamallit, joiden perustana on samanlainen vyöhykehinnoittelu.

Energiakriisi synnytti laajan keskustelun Euroopan sähkön markkinamallien nykyisestä

toimivuudesta, jota seurataan ja kehitetään jatkuvasti. Nykyisiä markkinamalleja on kuitenkin kehitetty jo pitkään sopeutumaan teknologisiin, poliittisiin ja yhteiskunnallisiin muutoksiin, ja niiden kehittäminen jatkuu energiajärjestelmiemme jatkuvan kehityksen myötä. Esimerkiksi uusiutuvan energian osuuden kasvu, tuotantorakenteen hajauttaminen ja kysyntäjouaston kasvava tarve vaativat nykyisten markkinamallien mukauttamista.

Avoimien kilpailuun perustuvien sähkömarkkinoiden päätehtävänä on varmistaa markkinoiden tehokkuus, sähkön tehokas jakelu ja se, että hinnat vastaavat kysyntää ja sähkön tuotantokustannuksia. Sähkön hinnoittelu tapahtuu useilla eri markkinapaikoilla, joilla on erilaiset tarkoitukset ja toimijat.

### **Energiajärjestelmien kestävyys**

Euroopan komissio laati energiakriisin motivoimana REPowerEU-lainsäädäntöpakettin, jonka tavoitteena on tehdä sähkömarkkinoista kestävämmät ja kriisivalmiimmat. Pitkällisten keskusteluiden jälkeen komissio päätti lopulta pitää sähkömarkkinamallin lähes ennallaan, sillä nykyinen marginaalihinnoittelu on osoittautunut toimivaksi. Paketti kuitenkin uudisti ja edisti uusiutuvan energian tuotantoa parantamalla hintasopimuksia ja tukemalla energiankuluttajia joustavammilla sopimusmalleilla.

Energiasektorin kestävyuden lisäämisen ja hiilidioksidipäästöjen vähentämisen suurimmat ajurit ovat Suomessa tällä hetkellä siirtymisen fossiilisista energialähteistä vähähiiliseen energiantuotantoon ja sähköistämiseen, biologisen monimuotoisuuden säilyttäminen, maankäytön vaikutukset sekä muut energiajärjestelmien muutoksiin liittyvät luontovaikutukset. Energiajärjestelmien sosiaalinen kestävyys ja yhteiskunnalliset vaikutukset ovat myös nousseet keskeiseen rooliin oikeudenmukaisessa energiamurroksessa, ja ne huomioidaan entistä enemmän energiajärjestelmien kehitystyössä.

Energiamurros tarjoaa Suomelle monia taloudellisia ja yhteiskunnallisia etuja sekä tuottaa

tärkeitä kädenjalkivaikutuksia teknologian kehityksen, uuden liiketoiminnan ja korkealaatuisen koulutuksen ansiosta. Energiamurros kuitenkin samalla tuo mukanaan uusia poliittisia, yhteiskunnallisia, ympäristöllisiä ja teknologisia riskejä, joita täytyy tutkia lisää. Kansalaisten ja energiayhteisöjen rooli kasvaa kaikkialla Euroopassa, ja tämän odotetaan johtavan tulojen tasaisempaan jakautumiseen, demokraattisempaan päätöksentekoon energiajärjestelmissä sekä energiajoustavuuden ja kysyntäjoustoratkaisujen lisääntymiseen.

### **Energialähteet**

Merkittävimmät energialähteet Suomessa ovat bioenergia, ydinvoima sekä voimakkaasti lisääntynyt tuulivoima. Bioenergialla on edelleen keskeinen rooli Suomen energiajärjestelmässä metsäteollisuussektorin käyttämän bioenergian ja puujätteen ansiosta. Bioenergian kehittyviä energiamuotoja ovat nestemäiset ja kaasumaiset biopolttoaineet liikenteessä ja pienemmällä roolilla puupelletit, joiden kilpailukykyä heikentävät muut edullisemmat biopolttoaineet. Ydinvoimaa on käytetty perinteisesti suurissa yksiköissä sähkön peruskurmantuotantoon, mutta sitä voidaan käyttää myös joustavammin sähkön- ja lämmöntuotannossa. Suurten ydinlaitosten vaihtoehtoksi kehitteillä on pieniä, modulaarisia reaktoreita, joiden avulla Suomessa suunnitellaan tuotettavan kaukolämpöä tulevaisuudessa.

Suomessa on kehitteillä suuri määrä tuulivoimahankkeita, joista lähes puolet tulisi sijaitsemaan merellä. Tuulivoimaloiden korkeutta ja kokoa on kehitetty lähivuosina, minkä ansiosta niiden sähköntuotanto kasvaa merkittävästi alentaen tuotantokustannuksia. Tuulivoiman osuuden kasvu ja tuotannon riippuvuus olosuhteista luovat haasteita sähkönsiirrolle ja sähkömarkkinoille, sillä sähköjärjestelmässä tuotannon ja kulutuksen on oltava koko ajan tasapainossa. Tuulivoimalat eivät myöskään tue sähköverkon taajuuden vakauden ylläpitoa, joten osuuden kasvaessa on myös kiinnitettävä erityistä huomiota sähköjärjestelmän dynaamiseen ohjaukseen ja vakauteen. Tuulivoima on Suomessa edelleen keskittynyt maan länsiosiin.

Tuulivoiman rakentamista Itä-Suomeen ovat rajoittaneet sotilastutkien sijainnit, mistä on tehty vuonna 2023 erillinen selvitys, jossa on haettu mahdollisia keinoja tilanteen parantamiseksi.

Aurinkoenergian määrä on moninkertaistunut viime vuosina, mutta sen osuus on vielä melko pieni, noin 1 prosentti Suomen sähköntuotannosta. On kuitenkin arvioitu, että sen määrä voisi olla vuoteen 2030 mennessä jopa 7 gigawattia (7 000 megawattia), kun se vuonna 2022 oli yhteensä noin 635 megawattia. Vaikka Suomessa ei ole vielä paljon aurinkosähkön tuotantokapasiteettia, on useita suuria hankkeita suunnitteilla. Silti Euroopan merkittävä aurinkosähkön tuotanto on toisinaan heijastunut sähkömarkkinoiden kautta myös Suomeen edullisina, jopa negatiivisina iltapäivätunteina. Aurinkopaneelien teknologinen kehitys on ottanut merkittäviä askelia, sillä paneelien hyötysuhteet ovat kasvaneet ja painoteho-suhteet pienentyneet huomattavasti.

Lämpöpumppujen rooli on tunnistettu merkittäväksi fossiilisten energialähteiden käytön vähentämisessä ja lämmöntuotantoon liittyvien päästövähennysten saavuttamisessa tulevaisuudessa. Suomessa 40 prosenttia kiinteistöistä on varustettu lämpöpumpuilla, joista suurin osa on ilmalämpöpumppuja, ilma-vesilämpöpumppuja sekä maalämpöpumppuja. Kiinteistökokoluokan lämpöpumppujen kasvun lisäksi suurissa teollisen kokoluokan laitoksissa on tunnistettu lämpöpumppujen käytön mahdollisuudet. Lämpöpumpputekniikan kehitys ja tutkimus keskittyvät lämpöpumppujen tehon ja niiden komponenttien kehittämiseen sekä yhä korkeampien lämpötilanousujen ja -tasojen saavuttamiseen. Lisäksi lämpöpumpuissa käytetyissä kylmäaineissa ollaan siirtymässä yhä enemmän kohti luonnollisten kylmäaineiden käyttämistä.

### ***Muut energiateknologiat, energiansäästö ja energiyhteisöt***

Vähäpäästöisen vedyn roolin odotetaan kasvavan merkittävästi tulevaisuuden energijärjestelmässä. Energijärjestelmässä vety voi

sellaisenaan tai sekoitettuna maakaasuun tai biokaasuun korvata fossiilisia polttoaineita lämmön- tai sähköntuotannossa. Muita vedyn käyttökohteita ovat erilaiset power-to-x-tuotteet, kuten kemikaalit, muovit ja liimat, joita valmistetaan nykyisin fossiilisesta öljystä tai kaasusta. Maailmanlaajuisesti vähäpäästöiselle vedyntuotannolle on vahva poliittinen kannatus, mutta sen tuotannon kasvu ei ole lähtenyt liikkeelle energiamurroksen 1,5 asteen skenaarioiden edellyttämällä tavalla muun muassa sen tuotantokustannusten ja puuttuvien poliittisten ohjausmekanismien ja kannustimien takia. Suomella on vähähiilisen sähköntuotantorakenteensa ja biopohjaisen hiilidioksidin ansiosta hyvät edellytykset kilpailukykyisen, sähköllä tuotetun vedyn ja sen jalosteiden merkittäväksi tuottajaksi Euroopassa.

Selonteossa on lyhyesti kuvattu myös muita energijärjestelmän kehittämiseen liittyviä elementtejä. Hiilidioksidipäästöjen talteenottoin, hallinnan ja hyödyntämisen osalta on Suomessa käynnistetty useita alustavia hankkeita, mutta niiden toteutuminen on vielä epäselvää. Energiavarastoinnissa litium-ioniakut ovat olleet nopeimmin kasvava sähkön varastointiteknologia etenkin liikenteen sähköistymisen tarpeisiin. Energian kausivarastointiin on ollut vaikea saada kilpailukykyisiä ratkaisuja, sillä vuotuisia latauskertoja on vain muutamia, jolloin taloudellinen kannattavuus nykyisellä energiamarkkinalla on haasteellista.

Energiansäästön ja energiatehokkuuden osalta Suomen saavutukset ovat usein ylittäneet monet muiden maiden toimet, mitä EU:n energiatehokkuusdirektiivi ei ota huomioon ja edellyttää samaa energiatehokkuuden suhteellista parannusta lähtökohdasta huolimatta. Energiyhteisöt, kuten esimerkiksi asunto-osakeyhtiöt, ovat tulleet osaksi energijärjestelmän kehittämistä investoimalla omaan hajautettuun energiantuotantoon, energiatehokkuuteen, varastointiin, kulutusjoustoon tai muunlaisiin älykkäisiin energiaratkaisuihin.

# 2. KATSAUS ENERGIAJÄRJESTELMIEN MUUTOKSIIN

## 2.1 Energiamurros

### 2.1.1. Energiamurroksen taustaa

Energiamurroksen tärkein ajuri on kasvihuonekaasupäästöjen vähentäminen, jotta voidaan rajoittaa ilmaston lämpenemistä, joka aiheutuu pääasiassa fossiilisten polttoaineiden poltosta. Lähes 80 prosenttia maailman energiantuotannosta perustuu fossiilisiin polttoaineisiin (IEA 2023a). Yhdistyneiden kansakuntien ilmastonmuutoskonferenssissa - joka tunnetaan yleisesti nimellä COP-konferenssi – sovittiin vuonna 2015 Pariisissa, että yhteisiä ponnisteluja on jatkettava, jotta maailmanlaajuisen lämpötilan nousu voitaisiin rajoittaa 1,5 celsiusasteeseen. Seuraavissa konferensseissa, COP 22–COP 28, on tarkasteltu edistymistä ja tehty tarvittavat päätökset yleissopimuksen tehokkaan täytäntöönpanon edistämiseksi. EU on hyväksynyt joukon asetuksia täyttääkseen Pariisin sopimuksen mukaiset kansainväliset sitoumuksensa ja vähentääkseen kasvihuonekaasujen nettopäästöjä vähintään 55 prosenttia vuoteen 2030 mennessä.

Suomen kansallinen ilmasto- ja energiastrategia on yhdenmukainen EU:n tavoitteiden kanssa, ja siinä luetellaan toimenpiteitä EU:n ilmastositoumusten saavuttamiseksi vuoteen 2030 mennessä sekä esitetään täytäntöönpanostrategia tavoitteiden saavuttamiseksi. Strategiasa, jota kutsutaan myös nimellä Hiilineutraali Suomi vuoteen 2035 mennessä, Suomi sitoutuu vähentämään kasvihuonekaasupäästöjä 60 prosenttia vuoteen 2030 mennessä ja 80 prosenttia vuoteen 2040 mennessä ilmastonmuutoslain mukaisesti ja saavuttamaan hiilineutraaliuden vuoteen 2035 mennessä (TEM 2022). Sen lisäksi, että se kattaa päästökauppasektorin, ponnistusten jakamisen ja maankäytön päätöt, se pyrkii kattamaan myös maankäytön ja muiden sektoreiden hiilinielut. Arvioissa siitä, miten Suomi on saavuttamassa päästövähennystavoitteet, on todettu, että uusiutuvan energian osuudet ovat jo tavoitteitakin korkeammat,

mutta esimerkiksi EU:n Fit-for-55-paketissa asetetut energiankulutuksen enimmäisrajat ylittyvät (TEM 2022).

Näiden tavoitteiden saavuttamiseksi strategiassa korostetaan muun muassa muita kuin polttoon perustuvia lämmitysmuotoja, energiajärjestelmän sähköistämistä ja järjestelmäintegraation käyttöä aloilla, joilla hiilidioksidipäästöjen vähentäminen on haastavaa. Lisäksi strategiaan sisältyy kansallinen vetystrategia, jolla pyritään lisäämään erilaisia sähköpolttoaineita ja määrällisiä tavoitteita vetyelektrolyysikapasiteetille.

Energiamurros on laajempi meneillään oleva yhteiskunnallinen muutos, joka ulottuu teknologisia muutoksia pidemmälle. Se on pitkäaikainen sosio-tekniinen muutos, johon osallistuu useita aloja ja erilaisia yhteiskunnallisia toimijoita, kuten poliittisia päättäjiä ja virkamiehiä, sääntelyviranomaisia, teollisuuden ja yhteiskunnan järjestöjä, yrityksiä, kuntia ja kansalaisia. Sen lisäksi, että energiamurroksella pyritään vähentämään hiilidioksidipäästöjä ja muita kasvihuonekaasupäästöjä ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi, sillä pyritään myös vähentämään energiantuotannon ja -kulutuksen muita ympäristövaikutuksia, lisäämään sosiaalisesti ja taloudellisesti oikeudenmukaisempia energiajärjestelmiä sekä parantamaan energiavarmuutta.

Energiamurros liittyy läheisesti myös moniin muihin aikamme haasteisiin. Ilmastonmuutoksen, Ukrainan sodan ja sen energiavarmuuteen kohdistuvien vaikutusten lisäksi on myös kii-reellisesti pysäytettävä biologisen monimuotoisuuden kiihtyvä häviäminen. Kymmenen vuoden aikajänteellä tehdyssä maailmanlaajuisessa riskiluokituksessa maapallon järjestelmien muutoksiin, biologisen monimuotoisuuden vähenemiseen ja ekosysteemien romahtamiseen sekä luonnonvarojen niukkuuteen liittyvät riskit ovat neljän suurimman riskin joukossa heti äärimmäisten sääilmiöiden jälkeen (WEF 2024).

Näistä syistä on tärkeää löytää synergioita ja kompromisseja ilmastonmuutoksen hillitsemisen ja biologisen monimuotoisuuden suojelun ja ennallistamisen välille, mikä voi sisältää esimerkiksi ekosysteemien, kuten kosteikkojen, suojeluun ja ennallistamiseen tähtäviä toimia, jotka edistävät myös ilmastonmuutoksen hillitsemistä (Pörtner et al. 2021).

Ilmastopolitiikka ei ole ainoa lainsäädäntötoimenpide, joka ohjaa kestäväää energiamurrosta, vaan sitä ohjaavat myös monet erilaiset politiikat ja säännökset, kuten turvallisuusmääräykset, biologisen monimuotoisuuden tavoitteet, luonnonsuojelu- ja ennallistamislaki sekä teknologiakohtaiset säännökset. Esimerkiksi keskipitkän aikavälin ilmastopoliittisessa suunnitelmassa (KAISU) määritellään poliittisia toimenpiteitä niin sanotuille ponnistusten jakamisen aloille, jotka eivät kuulu päästökaupparjestelmään. Maankäyttösektorin ilmastonmuutossuunnitelma (MISU) puolestaan kattaa maa- ja metsätalouden sekä muun maankäytön, ja sen tavoitteena on parantaa yleistä kestävyttä ja hillitä näiden sektorien toiminnasta aiheutuvia kasvihuonekaasupäästöjä.

Tässä energiaselonteossa aiomme mennä teknisiä järjestelmäkuvauksia pidemmälle ja lähestyä energiamurrosta kokonaisvaltaisesti. Koska LUT-yliopiston energijärjestelmien tiedekunnan tutkijoiden asiantuntemus on keskittynyt energiateknologian kehittämiseen, annamme myös monipuolisen katsauksen energiateknologian viimeisimpään kehitykseen.

### 2.1.2 Tärkeimmät teknologiset keinot energiamurroksessa

Kun pyritään hillitsemään ilmastonmuutosta energiateknologian avulla, kokonaisvaltainen strategia käsittää useita toimenpiteitä, joilla pyritään mullistamaan energiantuotanto, -kulutus ja -hallinta. Tätä aihetta on käsitelty laajasti LUTin ensimmäisessä, vuonna 2022 julkaistussa energiaselonteossa. Tässä luvussa esitellään lyhyesti tärkeimmät nykyiset teknologiset keinot ilmastonmuutoksen torjumiseksi.

Loppukäytön energiatehokkuuden lisääminen edellyttää sellaisten tekniikoiden ja käytäntöjen käyttöönottoa, joilla minimoidaan energian tuhlausta eri aloilla, kuten rakennuksissa,

liikenteessä ja teollisuudessa. Optimoimalla energiankäyttöä voimme vähentää merkittävästi kasvihuonekaasupäästöjä ja samalla alentaa energiakustannuksia ja parantaa energiavarmuutta.

Samalla on välttämätöntä lisätä merkittävästi vähähiilisten energialähteiden käyttöä. Siirtymisen pois fossiilisista polttoaineista uusiutuviin energialähteisiin, kuten aurinko-, tuuli-, vesi- ja geotermiseen energiaan tai vähäpäästöiseen ydinenergiaan, on ratkaisevan tärkeää. Nämä energialähteet tarjoavat kestävämmän tuotettua energiaa, jonka kasvihuonekaasupäästöt ovat vähäiset, ja luovat pohjan puhtaammalle ja joustavammalle energijärjestelmälle.

Siirtymän nopeuttamiseksi on fossiilisten polttoaineiden käyttöä merkittävästi ja kiireellisesti vähennettävä. Tämä tarkoittaa hiilen, öljyn ja maakaasun asteittaista käytöstä poistamista puhtaampien vaihtoehtojen hyväksi, mikä vähentää sähköntuotannon, liikenteen ja teollisuusprosessien päästöjä.

Vetyratkaisut edustavat jälleen uutta eturintamaa energiamurroksessa. Hyödyntämällä vetyä ja myös power-to-x (P2X) -ratkaisuja puhtaina energiankantajina voimme parantaa hiilestä irtautumista teollisuudessa, liikenteessä ja lämmityksessä samalla, kun hyödynnämme uusiutuvia energialähteitä vedyn ja P2X:n tuotannossa.

Sähköistäminen nousee keskeiseksi strategiaksi erityisesti liikenteessä ja teollisuudessa. Siirtymällä sähköajoneuvoihin ja sähköistämällä teollisuusprosesseja voimme merkittävästi vähentää riippuvuutta fossiilisista polttoaineista ja hyödyntää synergiaetuja uusiutuvien energialähteiden kanssa.

Lisäksi kysyntäalojen uusien ja mullistavien teknologioiden kehittämiseen ja käyttöönottoon liittyy paljon potentiaalia. Energian varastointiin, älykkäisiin verkkoihin ja kehittyneisiin materiaaleihin liittyvät innovaatiot lupaavat mullistaa energijärjestelmiä, lisätä tehokkuutta ja vähentää päästöjä.

Teknisillä hiilinieluilla, kuten hiilidioksidin talteenotolla ja sitomisella (CCS), on ratkaiseva merkitys raskasta teollisuutta ja esimerkik-

si sementintuotantoa harjoittavien, vaikeasti torjuttavien alojen päästöjen vähentämisessä. Lisäksi hiilidioksidin poistotekniikat ja luonnolliset hiilinielut, metsät ja kosteikot, tarjoavat keinoja saavuttaa nettonegatiiviset päästöt, mikä auttaa kompensoimaan jäljellä olevia päästöjä ja vakauttamaan ilmastoa.

Yhteenvetona voidaan todeta, että ilmastonmuutoksen torjuminen energiateknologian avulla edellyttää monipuolista lähestymistapaa, jossa yhdistyvät tehokkuuden parantaminen, uusiutuvien energialähteiden käyttöönotto, fossiilisten polttoaineiden käytön lopettaminen, sähköistäminen, innovointi, hiilidioksidin talteenotto ja vaihtoehtoisten polttoaineiden, kuten vedyn, hyödyntäminen. Ottamalla nämä strategiat käyttöön voimme suunnata kohti kestävämpää ja vähähiilistä tulevaisuutta.

### 2.1.3 Energiamurroksen maailmanlaajuiset ajurit

Maailmanlaajuinen energiamurros tapahtuu aiempaa nopeammin ja entistä haastavammassa taloudellisissa ja maantieteellisissä olosuhteissa. Viimeaikainen energiakriisi lietsoi jo ennestään vallitsevia jännitteitä maailmanlaajuisilla energiamarkkinoilla, kun maailmanlaajuisen energiatarjonnan epävakaumus lisääntyi. Puhtaan energiatalouden ja -teollisuuden mahdollisuudet kasvavat nopeasti, mutta olemassa on myös epävarmuustekijöitä, kuten energiantoimitusketjujen kestävyys, energiavarmuusriskit ja kohtuuhintaisuuteen liittyvät haasteet. Lisäksi ilmastonmuutoksen seuraukset ovat entistä näkyvämpiä ja kohdistuvat erityisen voimakkaasti jo ennestään haavoittuviin yhteisöihin.

World Energy Outlookin skenaarion mukaan (IEA 2023d) kaikkien kolmen fossiilisten polttoaineluokan (maakaasu, hiili, öljy) odotetaan saavuttavan huippunsa vuoteen 2030 mennessä matalapäästöisen sähkön ja polttoaineiden täyttäessä yhä suuremman osan maailman kasvavista energiatarpeista. Jos fossiilisten polttoaineiden kysyntä pysyy yhtä suurena kuin esimerkiksi hiilen kysyntä on ollut viime vuosina, se on kuitenkin kaukana ilmastotavoitteiden saavuttamisen edellyttämistä tasoista. Merkkejä muutoksesta oikeaan suuntaan on kuitenkin

havaittavissa. Maailmanlaajuisesti kivihiili- ja maakaasuvoimaloiden rakentaminen on puolitunut, ja lämpöpumppujen myynti Euroopassa ja Yhdysvalloissa on ylittänyt kaasukattiloiden myynnin.

IEA:n (2023e) Net Zero Roadmap -suunnitelman mukaan sähkön kysynnän odotetaan kasvavan kaikilla aloilla. Kasvun tärkeimpiä ajureita ovat kehittyvät markkinat, kehittyvät taloudet, väestön ja tulojen kasvu, yhä useampien uusien loppukäyttäjien sähköistäminen ja eri prosessien sähköistäminen. Sähkön lisäkysyntään odotetaan vastattavan vähäpäästöisillä energialähteillä, kuten uusiutuville energialähteillä, ydinvoimalla, hiilidioksidin talteenotolla varustetuilla fossiilisilla polttoaineilla, vedyllä ja ammoniakilla. Viimeaikaiset poliittiset tavoitteet ovat lisänneet uusiutuvan energian näkymiä tärkeimmillä markkinoilla eri puolilla maailmaa, kuten Kiinassa, Euroopan unionissa, Intiassa, Japanissa ja Yhdysvalloissa. Myönteistä maailmanlaajuista kehitystä ovat muun muassa tuuli- ja aurinkosähköasennukset, akkujen ja sähköajoneuvojen myynti on linjassa tavoitteiden kanssa, mutta nämä teknologiat eivät yksinään riitä nollapäästöjen saavuttamiseen, vaan maailmanlaajuisia hiilidioksidipäästöjä on vähennettävä jyrkästi.

World Energy Transition Outlook -julkaisussa (IRENA 2023b) muistutetaan, että hiilidioksidipäästöjen vähentäminen on jäänyt jälkeensä. Jotta ilmaston lämpeneminen voitaisiin rajoittaa 1,5 celsiusasteeseen, hiilidioksidipäästöjä on vähennettävä 37 gigatonnia vuoden 2022 tasosta, jotta energiasektorin nettonollapäästöt saavutettaisiin vuoteen 2050 mennessä. Tämä tarkoittaa, että uusiutuvan energian sähkötuo- tuotantoa on lisättävä vuosittain noin 1 000 GW. Toimitusketjujen suuri keskittyneisyys aiheuttaa kuitenkin edelleen huolta, sillä se on altis poliittisille valinnoille, yritysten päätöksille ja luonnonkatastrofeille. Puhtaan energiateknologian toimitusketjut, erityisesti tuulivoiman, aurinkosähkön, akkujen, kriittisten mineraalien ja elektrolyyserien toimitusketjut, ovat maantieteellisesti keskittyneempiä kuin fossiilisten polttoaineiden toimitusketjut, ja Kiinalla on merkittävä rooli. Kolme suurinta aluetta hallitsevat 80–90 prosenttia maailmanlaajuisesta kapasiteetista, ja yhden tuottajan osuus on usein jopa 80 prosenttia (IEA 2023c).

Globaaleja energia-alan yhteiskunnallisia haasteita ovat energian saatavuuden ja kohtuuhintaisuuden puute sekä työllisyysvaikutukset, jotka toisaalta luovat uusia työpaikkoja mutta toisaalta vähentävät työllisyyttä fossiilisen energian aloilla. IEA:n arvioiden mukaan niiden ihmisten määrän, joilla ei ole mahdollisuutta käyttää sähköä (760 miljoonaa) tai esimerkiksi valmistaa ruokaa vähäpäästöisillä polttoaineilla (2,3 miljardia), odotetaan vähenevän noin 15 prosenttia vuoteen 2030 mennessä. Erityisen tärkeää on tukea niitä, joilla ei tällä hetkellä ole mahdollisuutta käyttää nykyaikaisia energialähteitä (IEA 2023b). Lisäriskejä syntyy ilmastomuutoksen aiheuttamista sääilmiöistä ja niiden vaikutuksista haavoittuviin yhteisöihin. Oikeudenmukainen energiamurros riippuu myös siitä, että ihmiset asetetaan etusijalle energian tulevaisuutta koskevissa keskusteluissa. Oikeudenmukaisen energiamurroksen toteuttaminen edellyttää jatkuvaa tukea ja aktiivista osallistumista myös kansalaisilta.

## 2.2 Energiakriisin vaikutukset

### 2.2.1 Tilanne Euroopassa

Taloudet olivat vielä toipumassa Covid-19-pandemiasta ja energian hinnat olivat jo koholla, kun Venäjä hyökkäsi Ukrainaan helmikuussa 2022. Hyökkäys vaikutti voimakkaasti maailmanlaajuisten energiamarkkinoiden dynamiikkaan, mikä johti maailmanlaajuiseen energiakriisiin. Energiakriisiin kuuluu määritelmän mukaan energian tarjonnan niukkuus, joka johtaa energian hintojen nousuun ja laajempiin sosiaalisiin ja taloudellisiin ongelmiin (Grossman 2015). Viimeisin energiakriisi oli seurausta erilaisten tekijöiden yhdistelmästä, kuten toimitusketjun häiriöistä, äärimmäisistä sääilmiöistä, pandemia-aikana viivästyneestä huollosta, öljy- ja kaasuinvestointien vähenemisestä sekä jo olemassa olevista geopolittisista jännitteistä. Venäjän manipuloimat kaasutoimitukset Eurooppaan jo ennen hyökkäystä johtivat siihen, että kaasun hinnat nousivat ennätyksellisen korkeiksi, mikä lisäsi osaltaan jo ennestään korkeaa maailmanlaajuisista inflaatiota ja nosti esiin energian kohtuuhintaisuuteen liittyviä kysymyksiä.

Hyökkäys ja siitä johtuvat Venäjän öljyn ja hiilen tuonnille asetetut talouspakotteet vaikuttivat erityisen voimakkaasti Euroopan energiamark-

kinoihin, koska ne ovat hyvin riippuvaisia Venäjän polttoaineiden tuonnista, mikä paljasti Euroopan energiaturvallisuuden haavoittuvuuden. Tämä johti muutoksiin energian globaaleissa kauppareiteissä ja energian hintojen nousuun entisestään. Välittömiin toimiin kriisin lieventämiseksi kuuluivat tuonnin lisääminen vaihtoehdoilta kaasuntoimittajilta ja investoinnit nesteitetyn maakaasun infrastruktuuriin, perinteisten energialähteiden, erityisesti hiilen, käytön lisääminen, ydinvoimaloiden käyttölopun pidentäminen ja ydinvoiman vaiheittaisen lopettamisen lykkääminen joissakin maissa, energiansäästötoimenpiteiden käyttöönotto hallituksen kampanjoilla sekä IEA:n kaikkien aikojen suurin öljyn varmuusvarastojen vapauttaminen.

Energiakriisi on luonut tarpeen arvioida uudelleen energiapolitiikkaa ja maakaasun roolia siirtymävaiheen polttoaineena, mikä on korostanut energian toimitusketjujen energiaturvallisuuteen ja geopolitiikkaan liittyviä kysymyksiä sekä luonut tarpeen monipuoliselle energialähteiden yhdistelmälle ja investoinneille uusiutuviin energialähteisiin, tehokkuuteen ja sähköistämiseen. Venäjän fossiilisten polttoaineiden tuonnin asteittaiseksi lopettamiseksi Euroopassa sekä uusiutuvaan energiaan ja energiatehokkuuteen tehtävien investointien edistämiseksi EU käynnisti toukokuussa 2022 RePowerEU-suunnitelman (EC 2022).

Pohjoismaissa energiakriisi näkyi loppukäyttäjille pääasiassa energian korkeina hintoina ja maakaasun toimitusten vähenemisenä Venäjältä. Kustannusten nousu on tuntunut kaikkialla Pohjoismaissa, mikä on johtanut sosioekonomisiin vaikutuksiin, kuten energiaköyhyyteen pienituloisemmissa ryhmissä. Pohjoismaisen energiatutkimuksen (NER 2023) raportissa luetellaan kahdeksan energiakriisin taustatekijää. Niitä ovat sähkömarkkinoiden rakenne, kysynnän ja kotitalouksien rahoituksen joustamattomuus, käytöstä poistettu säädettävä sähkökapasiteetti, kysynnän ja tarjonnan tasapainottaminen, siirtoinfrastruktuurin puute, maakaasun toimitusten väheneminen, riippuvuus energian tuonnista ja säästä riippuvainen sähköntuotanto.

NER-raportissa (2023) Pohjoismaille ehdotetaan seuraavia poliittisia suosituksia: energialähteiden monipuolistaminen, yhteisten

suunnitelmien laatiminen, tiedon jakaminen energiahankkeiden julkisen vastustuksen poistamiseksi, verkkoinfrastruktuurin ja energiamarkkinoiden välisen yhteistyön vahvistaminen sekä riippuvuuden rajoittaminen tuontimateriaaleista ja -metalleista.

### 2.2.2 Tilanne Suomessa

Maailmanlaajuiset tapahtumat, kuten Covid-19-pandemia, joka vaikutti energiantoimitusketjuihin, energiateknologian raaka-ainesten tarjontaan ja energiamarkkinoiden dynamiikkaan, sekä geopoliittiset jännitteet, joita lisäsi Venäjän hyökkäys Ukrainaan, joka pysäytti Euroopan ja Venäjän välisen energiakaupan, ovat vaikuttaneet merkittävästi globaaleihin ja eurooppalaisiin energiantoimitusketjuihin ja energiapolitiikkaan. Nämä tapahtumat ovat aiheuttaneet useita reaktioita ja muutoksia Suomen energiajärjestelmässä energian kohtuuhintaisuuden ja toimitusvarmuuden varmistamiseksi.

Suomen energiakriisi on tuonut esiin energiarvarmuuskysymykset ja edellyttänyt riippuvuuden vähentämistä Venäjän energiantuonnista. Ennen Venäjän sotaa Ukrainassa Suomen energiassektori oli vahvasti riippuvainen fossiilisten polttoaineiden tuonnista Venäjältä, koska Suomessa ei ole kotimaisia fossiilisia polttoaineita tai uraania. Vuonna 2021 Suomi toi Venäjältä 81 prosenttia raakaöljystä, 75 prosenttia maakaasusta ja yli 50 prosenttia kivihiiilestä (IEA 2023f). Lisäksi Venäjältä tuotiin energiaa, 50 prosenttia sähkön tuonnista, puutuotteita ja ydinpolttoainetta.

Vastauksena geopoliittisiin jännitteisiin ja Suomen tukeen Ukrainalle Venäjä lopetti kaiken

puuhakkeen tuonnin Suomeen maaliskuussa 2022 sekä sähkön ja maakaasun tuonnin toukokuussa 2022. Huolimatta pohdinnoista kieltää ydinpolttoaineen vienti Suomeen, ydinpolttoaineen tuonti Venäjältä jatkui Loviisan ydinvoimalan kahta VVER-tyyppistä ydinreaktoria varten. Venäjän hyökkäys johti kuitenkin Hanhikivi 1 -ydinvoimalahankkeen peruuttamiseen. Hankkeen oli määrä perustua venäläiseen teknologiaan ja johon osallistui Venäjän valtion omistama ydinvoimayhtiö Rosatom.

Euroopan unioni asetti Venäjää kohtaan pakotteita, joilla kiellettiin venäläisen kivihiiilen tuonti elokuusta 2022 alkaen, venäläisen raakaöljyn merituonti joulukuusta 2022 alkaen ja venäläisten öljytuotteiden tuonti helmikuusta 2023 alkaen. Toukokuussa 2022 Huoltovarmuuskeskus julisti Suomen maakaasumarkkinoille ”ennakkovaroituksen” maakaasun toimituskatkon vuoksi, kun maakaasun toimitus putkiston kautta Venäjältä loppui. Vastauksena tähän Suomi vähensi maakaasun kysyntää, jolloin hätätoimenpiteitä ei tarvinnut toteuttaa.

Äkilliset muutokset energian toimitusketjuissa aiheuttivat energian hinnannousua ja huolta Suomen energian toimitusvarmuudesta, mikä vuoksi Suomi joutui etsimään vaihtoehtoisia energianhankintalähteitä, mukaan lukien energiantuonti muista maista, ja ryhtymään toimiin maan energiaturvallisuuden parantamiseksi. Yksi näistä toimista oli Suomen ja Viron maakaasun kysyntää tyydyttävän, kelluvan varastointi- ja uudelleenkaasutusyksikön vuokraaminen kymmeneksi vuodeksi, ja se aloitti kaupallisen toiminnan joulukuussa 2022. Energiakriisin seurauksena Suomi ja EU ryhtyivät toimiin riippuvuuden lopettamiseksi Venäjän energiasta REPowerEU-suunnitelmalla,





johon sisältyy merkittävää avustusrahoitusta ja jonka tavoitteena on tukea energiamurrosta ja samalla lopettaa riippuvuus Venäjän energiantuonnista. Nämä toimenpiteet ovat osa Suomen laajempaa strategiaa, jolla pyritään parantamaan energiavarmuutta ja -kestävyyttä ja joka on linjassa Suomen hiilineutraaliutta ja riippuvuuden vähentämistä energian tuonnista erityisesti Venäjältä koskevien tavoitteiden kanssa.

Energiakriisi nosti merkittävästi energian maailmanmarkkinahintoja. Energian hinnannousu Suomessa ja huoli siitä, miten saatavilla oleva energia riittää kattamaan kysynnän suurimman kysynnän kuukausina talvella 2022–2023, edellyttivät ratkaisuja sähkön kohtuuhintaisuuden ja energian toimitusvarmuuden varmistamiseksi. Vastauksena tähän Suomi käynnisti toimenpiteitä kulutuskysynnän alentamiseksi, jolla pyrittiin vähentämään energian kysyntää talven aikana. Tähän liittyi ”Astetta alemmas” -kampanja, jota hallitus tuki arviolta miljoonan euron vuosibudjetilla ja joka johti merkittäviin sähkönsäästöihin elokuusta joulukuuhun 2022.

Suomen sähkömarkkinoiden hintavaihtelut viimeisen muutaman vuoden aikana ovat heittäneet paljon keskustelua energiamarkkinoiden toiminnasta. Tuulivoimakapasiteetin kasvaessa yli 50 prosenttiin tyypillisestä vuorokausitehosta, päivät, jolloin sähkön hinta on lähes nolla, lisääntyivät yli kahteenkymmeneen päivään vuodessa. Sähkömarkkinahinnat nousivat 5.1.2024 yli 2 €/kWh ja johtivat asiakkaiden suureen kritiikkiin sähkömarkkinoita kohtaan. Korkea hinta johtui pääasiassa siitä, ettei markkinoilla ollut riittävästi huipputehoa, mikä johtui vanhan fossiilisen tuo-

tantokapasiteetin käytöstä poistamisesta ja sähkömarkkinajärjestelmästä, joka ei tällä hetkellä kannusta uuden huippukapasiteetin rakentamiseen.

Energiakriisi motivoi myös Suomea edistämään nopeasti kehittyviä vetyratkaisuja, jota pidetään yhtenä tärkeimmistä keinoista lisätä energiaomavaraisuutta ja vähentää eri teollisuudenalojen, erityisesti teräs- ja kemianteollisuuden sekä liikenteen, hiilidioksidipäästöjä (Sivill et al. 2022). Lisäksi vedyn odotetaan lisäävän energiajärjestelmien joustavuutta, koska se pystyy varastoimaan energiaa. Vetyä koskevat skenaariot perustuvat siihen, että Suomessa on suuri potentiaali saada merkittävästi lisää tuulivoimaa. Tämä avaisi mahdollisuuksia edistää vähähiilistä teollisuutta, luoda uusia työpaikkoja ja kehittää Suomessa uudenlaisia, pitkälle jalostettuja energiatuotteita, kuten sähköpolttoaineita, joita voitaisiin viedä ulkomaille. Vetyyn liittyy kuitenkin monia kuljetukseen, varastointiin ja kustannuksiin liittyviä epävarmuustekijöitä ja haasteita sekä epäselvyyksiä siitä, miten vihreiden vetyratkaisujen kehittämistä tuetaan poliittisesti.

Lisäksi vihreä vety edellyttää uusiutuvan energian tuotannon merkittävää lisäämistä tuuli- ja aurinkoenergiateknologian avulla, mikä tarkoittaa myös lisääntyvää maan- ja merenkäyttöpaineita, joita tuuli- ja aurinkovoimaloiden rakentaminen maalle ja merelle aiheuttaa. Voimaloiden huolellinen sijoittaminen on avainasemassa, kun pyritään ratkaisemaan mahdolliset ristiriidat luontoarvojen ja paikallisyhteisöjen kanssa. Myös VTT (2023a) on todennut erilaisten kestävyysvaikutusten mahdolliset ristiriidat yhdeksi Suomen energiamurroksen suurimmista pullonkauloista.



# 3. ENERGIAVARMUUS

Energiavarmuus tai energiaturvallisuus (engl. energy security) on yleismaailmallinen aihe, joka muokkaa politiikkaa ja sääntelyä. Se toimii taloudellisen hyvinvoinnin ja yhteiskunnallisen vakauden edistämisen kulmakivenä, joka vaikuttaa yksilöihin kaikkialla maailmassa. Energian saannin tarve juontaa juurensa alkukantaiseen tarpeeseen hallita tulenteon taitoa ja lämmitystä ruoanlaittoa ja muita välttämättömiä tarpeita varten.

Energiavarmuuden tieteenala kehittyi, kun öljykriisit kiristivät maailmantaloutta vuonna 1970 ja edellyttivät, että toimitusvarmuuteen keskityttäisiin aiempaa enemmän. 1980-luvulla se tarkentui kattamaan myös kansainvälisen vakauden, ja 1990-luvulla tieteenala laajeni koskemaan myös sosiaalista hyvinvointia (energiaköyhyyttä) siinä tapauksessa, että energian hinnat ovat liian korkeita tai voimakkaasti vaihtelevia. 2000-luvulla otettiin huomioon myös muita näkökohtia, kuten riskittömyys ja häiriöttömyys, infrastruktuurin rooli ja erityisesti kestävyys. 2010-luvulla energiavarmuutta koskeva näkemys vahvistui, ja siinä luoteltiin kaikki näkökohdat, mutta samalla korostettiin tärkeimpiä niistä. Viime vuosina energiakriisi on vaikuttanut merkittävästi sekä energian hintaan että saatavuuteen maailmanlaajuisilla ja kansallisilla markkinoilla, mikä on lisännyt merkittävästi energiavarmuuteen liittyvää huolta.

Energiavarmuuden käsitteen tulkinta ei ole yksiselitteisesti vakioitu, ja se ilmenee nykyisessä keskustelussa monin eri muodoin. Kokonaisvaltaisimmillaan se kattaa kaikki energiahuoltoon liittyvät ulottuvuudet, täyttää yhteiskunnalliset odotukset ja on samalla vastustuskykyinen uhkille. Tarkemmin määriteltynä energiavarmuus määritellään ”kyvyksi tyydyttää nykyinen ja tuleva energiankysyntä luotettavasti sekä kestää ja toipua järjestelmään kohdistuvista häiriöistä tehokkaan kriisinhallinnan avulla”, kuten esimerkiksi Pohjoismainen energiaturvakeskus (NER

2023) ja Maailman energianeuvosto (WEC 2022) ovat todenneet. Kun nämä tahot ovat analysoineet energiakriisien vaikutuksia, ne ovat erottaneet kolme toisiinsa liittyvää tekijää: varmuus, kohtuuhintaisuus ja kestävyys. Nämä kolme tekijää ovat myös Suomen kansallisen energiastrategian peruspilarit. Kansainvälinen energiajärjestö (IEA) sisällyttää energiavarmuuden määritelmäänsä hinnoittelunäkökulman luonnehtimalla sitä ”energiälähteiden keskeyttömäksi saatavuudeksi kohtuuhintaan” (IEA 2023a). Sovelletuista vivahteikkaista määritelmistä riippumatta energiavarmuuden käsite kietoutuu läheisesti kaikkiin energiaan liittyviin näkökohtiin.

Tässä julkaisussa omistamme erilliset luvut energian hinnoittelulle ja energian kestävyydelle. Siksi tässä luvussa keskitymme ensisijaisesti suhteellisen kapeaan teknisen energiavarmuuden näkökulmaan. Kokonaisvaltaisempi näkökulma on kuitenkin välttämätön kohdassa 4.1, kun käsitellään energiavarmuuteen kohdistuvia uhkia. Tässä keskustelumme keskittyy pääasiassa Suomen energiavarmuuteen ja tarkastelee kansallisia tarpeita, vaihtoehtoja ja ratkaisuja. Poikkeuksena on jakso 4.3, jossa keskustelu siirtyy raaka-aineisiin ja arvoketjuihin, jotka ovat tiiviisti kytköksissä maailmanlaajuisiin resursseihin.

## 3.1 Energiavarmuuteen kohdistuvat uhat

Energiavarmuus on elintärkeää vakaalle ja hyvinvoivalle yhteiskunnalle. Laajasti tulkittuna käsite kattaa keskeiset tekijät, jotka vaikuttavat energiahuoltomme luotettavuuteen ja kestävyteen. Keskeiset ulottuvuudet voidaan jaotella seuraavasti:

- » **Saatavuus:** Jatkuvan ja luotettavan energiahuollon varmistaminen.
- » **Kustannukset:** Kuluttajille kohtuuhintaisen energian hallinta.
- » **Ympäristövaikutukset:** Ympäristöön kohdistuvien kielteisten vaikutusten minimointi.

- » **Monimuotoisuus:** Erilaisten energialähteiden käytön edistäminen haavoittuvuuden vähentämiseksi.
- » **Teknologia ja energiatehokkuus:** Tehokkaan ja kehittyneen teknologian käyttöönotto.
- » **Energiapolitiikka:** Tehokkaan ja kestäväen energiapolitiikan toteuttaminen.

Näiden pilarien lisäksi on muita ulottuvuuksia, joilla voi olla erittäin tärkeä rooli. Ne ovat seuraavat:

- » **Sijainti:** Maantieteelliset tekijät, jotka vaikuttavat energian saatavuuteen.
- » **Aikataulu:** Sekä lyhyen että pitkän aikavälin energiatarpeiden huomiointi.
- » **Kestävyys/resilienssi:** Vastustuskyvyn kehittäminen häiriöitä tai kriisejä vastaan.
- » **Terveys, kulttuuri, lukutaito, työllisyys:** Sosiaalisten ja taloudellisten vaikutusten tunnistaminen.
- » **Sotilas- ja kyberturvallisuus:** Näiden alojen mahdollisiin uhkiin puuttuminen.

Energiavarmuuden kaikkiin ulottuvuuksiin liittyvät haasteet voivat aiheuttaa merkittäviä uhkia. Historialliset esimerkit korostavat energiavarmuuden ylläpitämiseen liittyvää haavoittuvuutta. Esimerkiksi kaasutoimitukset Eurooppaan keskeyttänyt Venäjän hyökkäys Ukrainaan korostaa saatavuusulottuvuuden haavoittuvuutta. Lisäksi öljyn hinnanvaihtelujen kaltaiset kriisit ja ympäristövaikutukset, kuten ilmastonmuutos ja ekosysteemien romahtaminen, korostavat haasteiden monitahoisuutta. Lisäksi teknologialla, tehokkuudella ja energiapolitiikalla on ratkaiseva merkitys energiavarmuuden muotoutumisessa.

Tutkimus (Azzuni ja Breyer 2020) on osoittanut, että Suomen energiavarmuus on yksi maailman parhaista, jos kaikkia ulottuvuuksia painotetaan yhtä paljon, kuten kuvassa 2 esitetään. Yksityiskohtainen tarkastelu paljastaa Suomen vahvuudet ja haasteet. Saatavuusulottuvuus on arvioitu absoluuttisilla luvuilla maailmanlaajuisesti, mikä johtaa Suomen alhaisiin suhteellisiin lukuihin, kun taas asukaskohtaiset arvot ovat parempia. Vähäpäästöisen sähköntuotantokapasiteetin lisääminen, erityisesti huomattavien tuulivoimainvestointien ja Olkiluodon uuden ydinvoimalan käyttöönoton myötä vuonna 2023, on vaikuttanut myönteisesti saatavuuteen. Haasteita on kuitenkin edelleen, kuten tuulivoiman vaihtelevuus

sääolojen mukaan ja suurten ydinvoimaloiden aiheuttamien äkillisten sähkökatkosten riski energian tarjonnan ja kysynnän tasapainottamisessa erityisesti kylminä talviaikoina. Näihin haasteisiin vastaaminen edellyttää Suomen energiainfrastruktuurin, varastojen ja muiden keinojen kehittämistä ja parantamista energian tarjonnan ja kysynnän välisen tasapainon ylläpitämiseksi. Sähköntuotannon vaihtelut voivat johtaa merkittäviin hintavaihteluihin, mikä aiheuttaa haasteita ja epävarmuutta energiankuluttajille ja vahvistaa tarvetta strategioihin, joilla näitä vaihteluita voidaan lieventää.

Vaikeudet kansainvälisten energiaraaka-aineiden saannissa voivat rajoittaa tiettyjen energialähteiden saatavuutta erityisesti geopolittisten jännitteiden keskellä. Vaikka tuuli-, aurinko-, bio- ja vesivoima tarjoavat suhteellisen riippumattomia energialähteitä, Suomen riippuvuus tavanomaisen energian tuonnista aiheuttaa haavoittuvuutta erityisesti pitkittyneiden kriisien aikana, jos asiaankuuluvat raaka-ainetarannot ehtyvät. Pyrkimykset vähentää energiantuontiriippuvuutta erityisesti Venäjältä ovat lieventäneet geopolittisten jännitteiden vaikutusta Suomen energiajärjestelmään.

Suomen riippuvuus fossiilisista polttoaineista on merkittävä mutta vähenevä. Fossiiliset polttoaineet tuodaan Suomeen, koska kotimaista tuotantoa ei ole. Ydinenergia, joka on yksi Suomen energiajärjestelmän tärkeimmistä osatekijöistä, on tällä hetkellä riippuvainen tuontiuraanista, vaikka pääosin valtion omistama kaivosyhtiö Terrafame onkin ryhtynyt toimiin kotimaisen luonnonuranin tuotannon (150–200 tonnia) käynnistämiseksi sen päätuotteiden, kuten akkuteollisuuden tarvitsemien nikkelin, kobolttin, sinkin ja kuparin tuotannon, sivuvirtana. Reaktoripolttoaineeksi käsiteltävä luonnonuraanimäärä ylittäisi Olkiluoto 1:n tai 2:n täyteen lataukseen tarvittavan määrän.

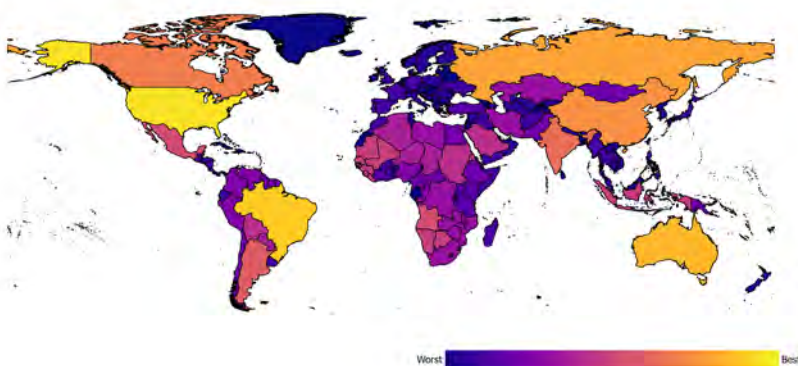
Päästöttömään energiajärjestelmään siirryttäessä fossiilisista polttoaineista luovutaan asteittain, mikä johtaa energian kysynnän ja tarjonnan tasapainottamiseen perinteisesti käytetyn, säädettävissä olevan sähkökapasiteetin käytöstä poistamiseen (NER 2023). Kun ohjauskapasiteetti vähenee ja säästä riippuvainen sähköntarjonta lisääntyy, tasapainon hallitsemiseksi on esitetty monia keinoja ja vaihtoehtoja, joita käsitellään tarkemmin kohdassa 3.5. Lisäksi fossiilisia polt-

toaineita käyttävien voimalaitosten synkronisen sähköntuotannon väheneminen aiheuttaa haasteita järjestelmän vakaudelle, kun ne korvataan sähköverkkoon tehoelektronisten muuntimien avulla liitettyä tuuli- ja aurinkovoimalla. Jos näihin haasteisiin ei puututa ajoissa ja riittävästi, vakavien ja jopa kriittisten järjestelmähäiriöiden riski kasvaa pohjoismaisten siirtoverkko-opeaattorien mukaan huomattavasti (NGDP 2023). On kokemuksia verkoista, joissa inverttereihin perustuvan vaihtelevan tuuli- ja aurinkosähkön syötön hetkellinen osuus on suuri ja jotka toimivat ilman raportoituja haasteita verkon stabiilisuudelle. Näitä kokemuksia ei kuitenkaan voida suoraan soveltaa pohjoismaiseen verkkoon. Invertteripohjaisen sähköntuotannon aiheuttamat haasteet sähköjärjestelmän vakaudelle jätetään usein huomiotta, ja nykyiset tutkimus- ja kehitystoimet keskittyvät sellaisiin tekniiikka- ja markkinaratkaisuihin, jotka mahdollistavat vaihtelevien invertteripohjaisten uusiutuvien energialähteiden suuret osuudet (Hodge ym. 2020).

Suomen energijärjestelmän monimuotoisuus, joka koostuu erilaisista vähähiilisistä energialähteistä, kuten tuuli-, aurinko- ja ydinvoimas-

ta, vesivoimasta ja bioenergiasta, lisää joustavuutta ja vakautta. Jokaisella energialähteellä on omat ainutlaatuiset ominaisuutensa, jotka muodostavat vankan, toisiaan täydentävän yhdistelmän. Tuulivoima on noussut taloudellisesti ja ympäristön kannalta edulliseksi investoinniksi, kun taas ydinvoima tarjoaa vakautta vaihtelevissa sääolosuhteissa ja voi osaltaan tasata kuormitusta sähkön ylituotannon aikana. Bioenergia voi tasapainottaa suunniteltua jakelua. Lisääntyvä aurinkoenergia on puolestaan pääasiassa ajoittaista, mutta sen ajallinen tuotantoprofiili poikkeaa tuulivoimasta.

Energiavarmuus on erittäin tärkeä käsite taloudellisen vakauden ja inhimillisen hyvinvoinnin kannalta. Suomen sähköjärjestelmän siirtyessä vähäpäästöiseen energiaan tarvitaan monipuolisia kehityspolkuja, jotta voidaan vastata haasteisiin, kuten sähkönjakelun katkonaisuuteen ja toimitus- tai infrastruktuurihäiriöihin. Kaiken kaikkiaan Suomen energijärjestelmä erottuu kansainvälisissä vertailuissa edukseen vähäpäästöisen energian suuren osuuden, monimuotoisuuden, teknologian, joustavuuden ja poliittisen järjestelmän vakauden ansiosta.



Kuva 2. Energiavarmuusindeksi, joka kattaa kaikki ulottuvuudet kaikkien maiden osalta (vasemmalla), ja yksityiskohtaisempi näkymä Suomen osalta (oikealla).

### 3.2 Tapahtumat, jotka vaikuttavat energian toimitusvarmuuteen Suomessa

Suomen energijärjestelmän varmuus joutui kovalle koetukselle syksyllä 2022 ja keväällä 2023, kun Ukrainan tilanteesta johtuvat taloudelliset järjestykset koettelivat Suomea.

Sama toistui pienemmässä mittakaavassa vuoden 2024 alussa. Gazprom Export ilmoitti 20.5.2022 maakaasun jakelija Gasum Oy:lle, että maakaasutoimitukset Suomeen katkaistaan 21.5.2022 klo 7.00. Suomi oli saanut Baltic Connector -maakaasuyhteyden rakennettua, joten maakaasutoimituksia voitiin jatkaa Virossa. Lisäksi Suomen hallitus teki nopeasti so-

pimuksen LNG-terminaalilaivasta, joka aloitti toimintansa vuoden 2023 alussa. Valitettavasti Baltic Connector -yhteys vaurioitui lokakuussa 2023, ja korjauksen arvioitiin kestävän ainakin huhtikuuhun 2024 asti. Koko Euroopan maa-kaasutilanne oli synkkä syksyllä 2023.

EU on myös lopettanut polttoaineiden, kuten raakaöljyn, ostamisen Venäjältä Unkaria lukuun ottamatta. Siksi Suomen on täytynyt neuvotella öljykauppa uudelleen, mutta se on onnistunut siinä erinomaisesti. Tämä on merkinnyt myös sitä, että venäläisen kivihiiilen kauppa on loppunut. Se ei ollut Suomelle kovin suuri asia, koska hiiilen käyttö on ollut laskussa jo pitkään ja Venäjän kaupan muutos koski lähinnä Helsingin seutua. Suomi on päättänyt lopettaa kivihiiilen käytön sähköntuotannossa vuonna 2029.

Kotimainen turve on ollut öljykriisistä lähtien yksi suurista kansallisista keinoista huoltovarmuuden parantamiseksi. Turpeen polttamisen kannattamattomaksi tehneiden päästökaupparjestelmän hinnoittelun ja hiiliveron vuoksi turve on hitaasti hupenemassa. Julkisista vaatimuksista huolimatta turvetuotanto on hiljalleen loppumassa, mikä johtuu pääasiassa voimalaitosten haluttomuudesta käyttää turvetta.

Turpeen varmuusvarasto on perustettu, mutta kesällä 2023 siinä ei edistytty. Kasvava tukeutuminen kotimaisen biomassavaraston energiakäyttöön voi vaikuttaa myös metsä- ja muun maankäytön hiilivarastoon, mikä saattaa vaikuttaa Suomen ilmastotavoitteisiin ja EU-tason LULUCF-asetuksen (maankäyttöä, maankäytön muutosta ja metsätaloutta koskeva asetetus) ja taakanjakosektorin velvoitteiden täyttämiseen (Soimakallio ja Pihlainen 2023).

Biomassakaupan sulkeminen Venäjältä johti siihen, että Suomessa käytettävissä olevassa biomassassa oli noin 15 prosentin vaje, mikä johti energiabiomassan hinnan nousuun ja biomassapulaan. Pelosta huolimatta puuperäisen biomassan käyttö väheni Suomessa vuonna 2023, mikä lievittää pelkoa siitä, että biomassan käytön lisääntyminen haittaisi Suomen LULUCF-velvoitteiden täyttymistä.

Merkittävää myönteistä kehitystä on hitaasti tapahtunut, sillä tuulivoimakapasiteettia on rakennettu noin 6 000 MW ja aurinkoenergiaa noin 1 000 MW. Tuulivoiman tuottama vaihteleva energia on lisännyt uusiutuvien energialäh-

teiden saatavuutta vesivoiman ja bioenergian tarjonnan lisäksi.

Toinen myönteinen kehitys tapahtui, kun kauan odotettu Olkiluoto 3:n (OL3) 1 600 MW:n ydinvoimalaitos aloitti toimintansa, ensin noin vuoden koekäytössä ja sitten 16.4.2023 alkaen säännöllisessä kaupallisessa käytössä. Vaikka suomalaisen ydinvoimaloiden laitospaikoilla on varastoituna noin kolmen vuoden käytön verran ydinpolttoainetta, on Loviisan ydinvoimaloihin neuvoteltava uudet polttoainesopimukset Ukrainan sodan synnyttämän tilanteen takia, koska ydinpolttoaineen ostaminen Venäjältä on nyt mahdotonta.

On olemassa huoli siitä, että talven huippukysynnän aikana Suomen sähköjärjestelmä ei pysty toimittamaan koko sähkön kysyntää. Tämä johtuu CHP-sähköntuotannon jatkuvasta väheneemisestä. Esimerkiksi Helsingin seudulla vanhoja hiilikäyttöisiä CHP-laitoksia korvataan pelkillä lämpö- ja lämpöpumppulaitoksilla. Suurempi sähkökatko lähivuosina ei kuitenkaan ole kovin todennäköinen, vaikka esimerkiksi useat sähköyhteydet naapurimaihin pettäisivätkin. Suuren kysynnän aikaan järjestelmän häiriönsietokyky kuitenkin heikkenee ja järjestelmässä on tarve toipua äkillisistä häiriöistä. Siksi tämä on yksi nykyisen hallituksen esittämistä huolenaiheista, ja sitä käsitellään tulevana vuosina.

### 3.3 Energiajärjestelmän teknologioiden edellyttämät raaka-aineet ja arvoketjut

Tässä luvussa käsitellään kriittisimpiä raaka-aineita, joita käytetään uusien energiajärjestelmien komponenttien valmistuksessa. Tämä on ollut aktiivinen puheenaihe viimeaikaisissa globaalia energiamurrosta käsittelevissä keskusteluissa. Energiajärjestelmässä siirrytään fossiilisten polttoaineiden käyttöön perustuvasta järjestelmästä energiajärjestelmään, joka perustuu mineraaleihin ja materiaaleihin. Niitä tarvitaan energiajärjestelmän komponenttien valmistukseen ja rakentamiseen ja käytetään ympäristössä olevien energjavirtojen (esim. vesi, tuuli ja auringon säteilyn energia) keräämiseen, tuotetun sähkön muuntamiseen tarvittavaan lopulliseen energiamuotoon ja energian varastointiin. Uusien, vihreiden energiajärjestelmäkomponenttien varsinainen toiminta ei kuitenkaan vaa- di juurikaan lisäenergiaa eikä -materiaaleja.



Uusien energiajärjestelmien komponenttien tarvitsemat materiaalmäärät ovat suurimmat muun muassa tuulivoiman, aurinkosähköenergian, kiinteiden akkujen energiavarastoinnin, sähköajoneuvojen akkujen, lämpöpumppujen ja vedyn tuotantoon käytettävien elektrolyysierien osalta. Kaikkien näiden tekniikoiden käytön odotetaan kasvavan valtavasti tulevina vuosina ja vuosikymmeninä, tyypillisesti 10–100-kertaiseksi. Materiaalihuollon haasteilla on useita pääulottuvuuksia: raaka-aineiden saatavuus, toimitusvarmuus ja toimitusketjun vakaus.

Nopeasti kasvavien energiateknologioiden raaka-aineiden tarjonta voi olla rajallista useiden keskeisten materiaalien osalta, joita käytetään tuulivoimassa (neodyymi, dysprosium), aurinkosähkötekniikassa (hopea), akuissa (litium, koboltti, nikkeli) ja elektrolyysereissä (iridium, nikkeli). Perusluonteiset haasteet on voitu poistaa lähimenneisyydessä käytännössä kaikissa tapauksissa. Tuulivoimageneraattorit voidaan suunnitella myös suoravetoisiksi sähköllä magnetoitaviksi tahtikoneiksi, jotka käyttävät virrallisia kupari- tai alumiinikäämejä magnetointiin harvinaisten maametallimateriaalien asemesta. Tämä tekniikka otettiin käyttöön useita vuosia sitten, ja eri tuuliturbiinivalmistajat tarjoavat sitä. Aurinkokennoissa käytetään tavallisesti hopeaa varauksen kuljettajien erottamiseen, kun taas sama voidaan tehdä kuparilla ja alumiinilla. Sitä voidaan pitää vaihtoehtoisena käytettävissä olevana tekniikkana, joka otetaan käyttöön heti, kun hopean hinta ylittää tietyn hintatason.

Koboltittomia ja nikkelittömiä litiumakkuja on ollut saatavilla jo yli kymmenen vuotta, ja niiden markkinaosuus kasvaa myös sähköajoneuvoissa. Litiumia itsessään voi olla riittävästi

saatavilla, mutta kaivostoiminnan laajentaminen voi olla rajallista kysynnän kasvuun nähden. Markkinoille on kuitenkin parhaillaan tulossa natriumioniakkuja, jotka valmistetaan kokonaan runsaasti saatavilla olevista materiaaleista. Iridiumia vaativat elektrolyserit ovat rajallisia tulevina vuosikymmeninä ennustetuille määrille, mutta emäksiset elektrolyserit perustuvat nikkelikatalyysaattoriin, joka voidaan käsitellä täysin uudelleen käyttöön päätyttyä, minkä ansiosta materiaalia ei menetetä. Kaiken kaikkiaan ei ole tiedossa mitään perustavanlaatuisia esteitä kestävän energiateknologian käyttöönotolle, mutta kiertotalous, jossa kierrätys on mahdollisimman täydellistä, on pakollinen edellytys, jotta näiden teknologioiden vaadittu valtava kapasiteettipohja voidaan saavuttaa pitkällä aikavälillä.

Perusmateriaalin saatavuutta haastavampaa voi olla teknologioiden toimittamiseen tarvittavien arvoketjujen vakaus. Vuosituhannen vaihteesta lähtien harjoitettu ja kohdennettu teollisuuspolitiikka on asettanut Kiinan keskeisten arvoketjujen ytimeen erityisesti akkujen ja aurinkosähköä tuottavien laitteiden valmistuksen osalta, mikä on johtanut muiden suurten talouskeskusten merkittäviin riippuvuussuhteisiin, erityisesti Euroopassa. Riittävän teollisuuspolitiikan puute Euroopassa johti siihen, että toimitusketjun vakaus ja Euroopan tuotantokapasiteetin saatavuus ovat erittäin haavoittuvia. Tämä rakenteellinen puute edellyttää Euroopan strategisen teollisuuspolitiikan ja Euroopan teollisuuden poliittista uudelleenjärjestelyä, jotta Euroopan toimitusketjuja voidaan kehittää. Suomen on yhdessä eurooppalaisten kumppaneidensa kanssa varmistettava, että vastaavat toimenpiteet toteutetaan mahdollisimman nopeasti. Merkittäviä kustannuseroja

ei ole, mutta teollisuuden skaalautuminen ja strateginen markkinarakenteen puuttuvat.

Suomi on myös lähellä saada aikaan omia akkutuotantolaitoksia, sillä useat yritykset ovat etenemässä teollisuuslaitoksien kanssa. Akunvalmistus sopii hyvin Suomeen paikallisten raaka-aineiden ja alhaisen sähkön hinnan vuoksi. Suomen houkuttelevia mahdollisuuksia akkumateriaalien teollisen kapasiteetin kasvattamisessa korostavat muun muassa katodin aktiivisen esiasteen materiaali (BASF Harjavallassa), katodin aktiivinen materiaali (CAM Kotkassa) ja anodimateriaali (Ningbo Shanshan Vaasan alueella). Lisäksi muita hankkeita liittyy nikkeliin ja litiumiin.

Raaka-aineiden saatavuuteen ja niiden tuleviin korvausvaatimuksiin liittyvien haasteiden sekä tasapainoisten ja joustavampien toimitusketjujen tarpeen lisäksi on välttämätöntä laajentaa kiertotalouden ratkaisuja huomattavasti, jotta kerran käytetyt materiaalit saadaan jatkuvasti yhteiskunnan käyttöön. Ilman kokonaisvaltaista kiertotaloutta sivilisaatiolle ei voida jatkuvasti toimittaa energiaa korkeimmalla toimintustasolla – varsinkaan, jos maapallolla asuu vuosisadan puolivälissä kymmenen miljardia ihmistä. Kokonaisvaltaisen kiertotalouden käytöllä ei ole perustavanlaatuisia esteitä kestäviin luonnonvaroihin perustuvan energian jatkuvalle tarjonnalle.

### 3.4 Energiainfrastruktuurin tila ja kehittämistarpeet

Kriittinen energiainfrastruktuuri käsittää lukuisia komponentteja, kuten sähkönsiirto- ja jakeluverkot, maakaasuverkko, sähkö- ja lämmöntuotantolaitokset, kaukolämpöverkko sekä polttoaineiden siirto, varastointi ja jakelu eri muodoissa. Perinteisesti jalostettujen neste- tai kiinteiden polttoaineiden jakelu perustuu joko perinteiseen maantiekuljetukseen tai rautatieverkkoon Suomessa. Lisäksi Suomen satamien kautta kulkee suurin osa kaikesta tuonnista ja viennistä, mukaan lukien energiaan liittyvät materiaalit, kuten raakaöljy. Liikenne onkin keskeisessä asemassa maan energiavarmuuden ja yleisen taloudellisen toiminnan varmistamisessa. Jotta Suomen energiavarmuutta voidaan tulevina vuosina lisätä,



on infrastruktuurin kehittämiseksi olemassa lukuisia suunnitelmia ja aloitteita.

Suomen työ- ja elinkeinoministeriön raportissa kansallisesta ilmasto- ja energiastrategiasta (2022) energiavarmuutta pidetään kriittisenä poliittisena huolenaiheena. Kriittisten polttoaineiden varastoinnin ja toimivan sähköjärjestelmän varmistamisen lisäksi varautumispyrkimykset ulottuvat muun muassa "lämpöhuoltoon, järjestelmäintegraatioon ja uusiin polttoaineisiin". Uudistettuun valmiusrakenteeseen kuuluisi polttoaine-, kaasu-, sähkö- ja lämpöpooli. Lisäksi on poliittisia tavoitteita, jotka liittyvät monipuolisten energiantoimituskanavien ylläpitämiseen, vesivoiman säädettävyyden ja toiminnan varmistamiseen, energia-alan kyberturvallisuuden parantamiseen ja sähköjärjestelmän turvaamisen korostamiseen liikenteen lisääntyvän sähköistämisen vuoksi. Strategian aikajänne on melko pitkä, joten myös kehittyvien teknologioiden, kuten power-to-x-prosessien, rooli on huomioitu. Esimerkiksi todetaan, että power-to-x:llä on potentiaalia lisätä elintarviketuotannon toimitusvarmuutta suoraan ja lannoitetuotannon kautta. Myös pienistä modulaarisista reaktoreista puhutaan mahdollisena vaihtoehtona sähkön- ja lämmöntuotannolle. Sekä power-to-x:n että pienten modulaaristen reaktoreiden yleistyminen riippuu muun muassa niiden teknistaloudellisesta kehityksestä ja vaikutuksesta tarvittavaan infrastruktuuriin.

Koska maakaasutoimituksia Venäjältä ei enää jatketa, nesteytetyn maakaasun (LNG) infrastruktuurin kehittäminen on tärkeää. Yhteistyö Baltian maiden kanssa kehittyä todennäköisesti edelleen

kelluvien nesteytetyn maakaasun varastojen osalta. EU:n ja Suomen hallituksen on selkiytettävä biokaasua ja RFNBO:ta (ei-biologista alkuperää oleviin uusiutuviin polttoaineisiin) koskevaa politiikkaansa, jotta voidaan varmistaa tarvittava taloudellinen muutos kohti hiilineutraaliutta.

Kansallisella huoltovarmuuskeskuksella (HVK 2023) on uudistettu strategiaohjelma ”Energia 2030”, jonka tavoitteena on käsitellä erilaisia energiavarmuuteen liittyviä kysymyksiä. Eriyisesti meneillään oleva energiamurros fossiilista järjestelmästä kestäviin järjestelmiin haastaa perinteiset, tähän asti käytössä olleet varautumistoimenpiteet. Esimerkkinä voidaan mainita, että sähköverkon tehonvaihtelut ovat tulevaisuudessa radikaalimpia, kun verkkoon otetaan lisää tuuli- ja aurinkokapasiteettia, mikä rasittaa joustavuutta sekä sähkön tasausyksiköitä ja -palveluja. Lisäksi eri polttoaineiden tyyppi ja määrä muuttuvat. Käytännössä strategiaa kehitetään pienemmissä teemahankkeissa, joissa keskitytään esimerkiksi öljylogistiikkaan ja lämpöhuoltoon, metsähakkeen lisääntyneeseen kysyntään, sähköasiakkaiden priorisointiin vikatilanteissa sekä viranomaisyhteistyöhön suurten sähkökatkojen aikana.

Tuulivoiman ja sähköenergian hajautettu tuotanto voisi haastaa energian siirtoinfrastruktuurin nykyistä merkittävämmiin. Maapinta-ala on elintärkeää uusiutuvan energian kannalta, ja suuri osa siitä voisi sijaita alueilla, joilla nykyinen sähköinfrastruktuuri ei ole yhtä kehittynyt. Esimerkiksi pohjois-etelä-yhteydet ovat sähköverkkoa varten tärkeitä. Verkon rajoitukset voivat osittain rajoittaa tai estää tuulivoiman kehittämistä. Vielä laajemminkin energiamäärät voivat olla sellaisia, että voi olla tarpeen kyseenalaistaa, mikä on sopiva kuljetusmuoto. Vetyä voitaisiin kuljettaa esimerkiksi putkistoissa. Myös hiilidioksidiputkia on käytetty vuosikymmeniä, ja ne voisivat osoittautua hyödyllisiksi power-to-x-tekniikan käytössä.

Meneillään oleva työ Aurora-linjan kanssa, joka yhdistää Suomen Pohjois-Ruotsin sähköalueeseen SE4 ja joka otetaan käyttöön vuonna 2025, vahvistaa sähkön toimitusvarmuuttamme entisestään, sillä SE4-alueella on runsaasti vesivoimaa. Suunniteltu lisäyhteys Viroon ei ole edennyt, koska sen ei ole katsottu parantavan Suomen sähkön saatavuutta. Suunniteltu merisähköyhteys Saksaan ei myöskään ole eden-

nyt, koska merisähkölinojen hinnat ovat nousseet dramaattisesti.

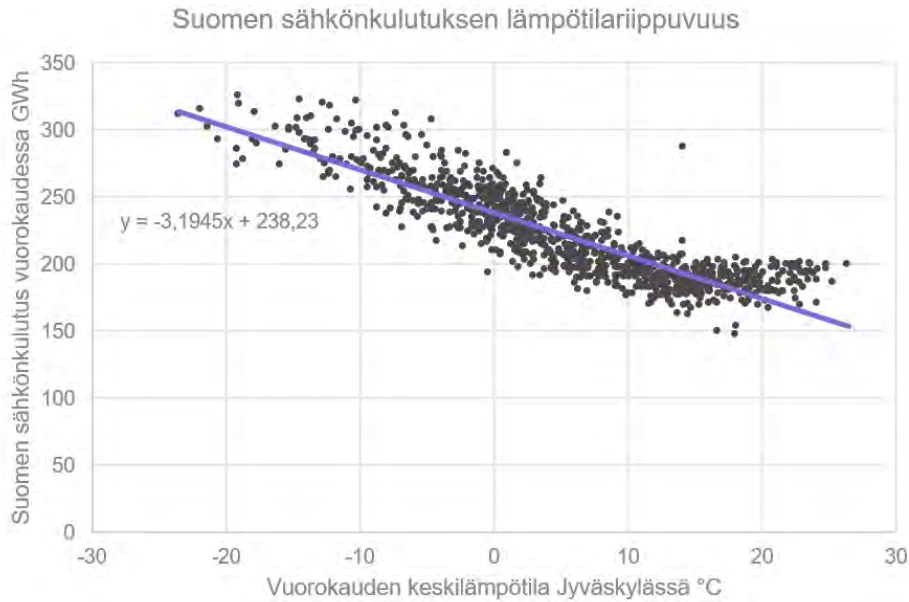
### 3.5 Tuotannon ja kulutuksen välinen tasapaino

Energiaviraston tehtävänä on seurata sähkön tuotannon ja -kulutuksen välistä tasapainoa. Se julkaisee vuosittain raportin, jossa käsitellään Suomen energiantuotannon riittävyyteen ja sähkömarkkinoiden tilaan liittyviä näkökohtia. Se myös määrää varakapasiteetin suunnittelusta, sillä varakapasiteetti ei voi osallistua sähkömarkkinoille. Tuotannon koordinoinnissa on kaksi aikahorisonttia. Päivittäisessä tuotantosunnittelussa 24 tunnin tuotantovastuut jaetaan sähkömarkkinoilla tehtyjen tarjousten perusteella. Pitkällä aikavälillä olisi rakennettava riittävästi kapasiteettia, jotta voidaan varmistaa, että on olemassa kapasiteettia, joka voi tehdä tarjouksia päivittäisillä markkinoilla.

Suomen kapasiteetin riittävyyden haasteena on, riittääkö kapasiteetti käsittelemään odotettavissa olevaa talvihiippua, jonka Energiavirasto (2023a) arvioi vuoden 2023 lopulla olevan noin 14 400 MW, mutta joka ylittyi tammikuun 2024 alussa ilman ongelmia sähkön saatavuudessa. OL3:n kanssa nykyinen kapasiteetti on 12 900 MW. On huomattava, että käytettävissä olevan kapasiteetin arvioinnissa on mukana vain tilastollisesti käytettävissä oleva osa muuttuvasta sähkökapasiteetista eli noin 300 MW noin 6 000 MW:n tuulivoimakapasiteetista ja hyvin vähän aurinkoenergiakapasiteettia, koska niiden ei odoteta olevan käytettävissä tyypillisen suomalaisen talvihiipun aikana, kun on kylmä, pimeä ja tyyni ilma.







Kuva 3. Suomen sähkönkulutus suhteessa ulkolämpötilaan (Väre 2023).

Yhtenä huolenaiheena on mainittu, että vaihtelevaa, ei-jakelukelpoista tuotantoa rakennetaan yhä enemmän, kun samaan aikaan jakelukelpoista lämpökapasiteettia puretaan esimerkiksi Helsingissä. Koska sähkömarkkinajärjestelmämme ei ole suunnattu rahoittamaan sähkön varastointia eikä varasähkökapasiteettia, vakavien sähkökatkojen riski kasvaa. Tällä hetkellä ei ole olemassa mekanismeja, jotka kannustaisivat investointeihin kysynnän joustavuuden lisäämiseksi tai joustavan kapasiteetin rakentamiseksi.

Sähkön hinnan negatiivisten tuntien lisääntyminen on kuitenkin saanut Suomessa aikaan massiivisen sähkökattiloiden rakentamisbuumin, ja arviolta 1 500 MW:n kapasiteetti otetaan käyttöön syksyllä 2024. Näitä sähkökattiloita on rakennettu hoitamaan kesäaikaista kaukolämpöä, mutta myös auttamaan teollisuuden höyryntuotannossa. Tämä tarkoittaa sitä, että sähkökattilat voivat hoitaa osan vaihtelevasta ylituotannosta, mutta todennäköisesti eivät riittävästi, jotta päästäisiin eroon tuulivoimasähkön hintojen syvästä laskusta (ns. kannibalisoinnista), jossa tuuli- tai aurinkosähkökapasiteetin merkittävä lisäys aiheuttaa markkinahintojen laskua tunteina, jolloin uusiutuvien energialähteiden kapasiteetti on huipussaan. Syyskuussa 2023 tuulivoiman saama keskimääräinen sähkönhinta oli 13,1 €/MWh, kun taas Suomessa saatu keskimääräinen sähkönhinta oli 33,7 €/MWh, mikä osoittaa 61 prosentin kannibalisaatiota.

Uuden tuulivoimainfrastruktuurin rakentaminen ei ole mahdollista tällä hinnanlaskun tasolla.

Ongelmien lieventämiseksi on ehdotettu, että kuluttajat osallistuisivat kuormituksen vähentämiseen ja auton akkujen hyödyntämiseen. Sähkömarkkinajärjestelmämme ei vielä palkitse tällaisesta käyttäytymisestä, jos sähkömarkkinatoimija säätelee kapasiteettia. Todennäköisesti jopa noin 600–800 MW:n sähkönkulutusta vähennettiin vapaaehtoisesti korkeiden sähkönhintojen ja hintariippuvaisten tariffien vuoksi syksyllä 2023.

Sähköakkuja rakennetaan jonkin verran, mutta toistaiseksi niiden kapasiteetti on hyvin rajallinen. Useat tahot ovat ilmoittaneet rakentavansa pumppuvesivoimavarastoja, mutta varsinaisia rakentamislmoituksia ei ole tehty.

### 3.6 Energian toimitusvarmuuden hallinta Suomessa

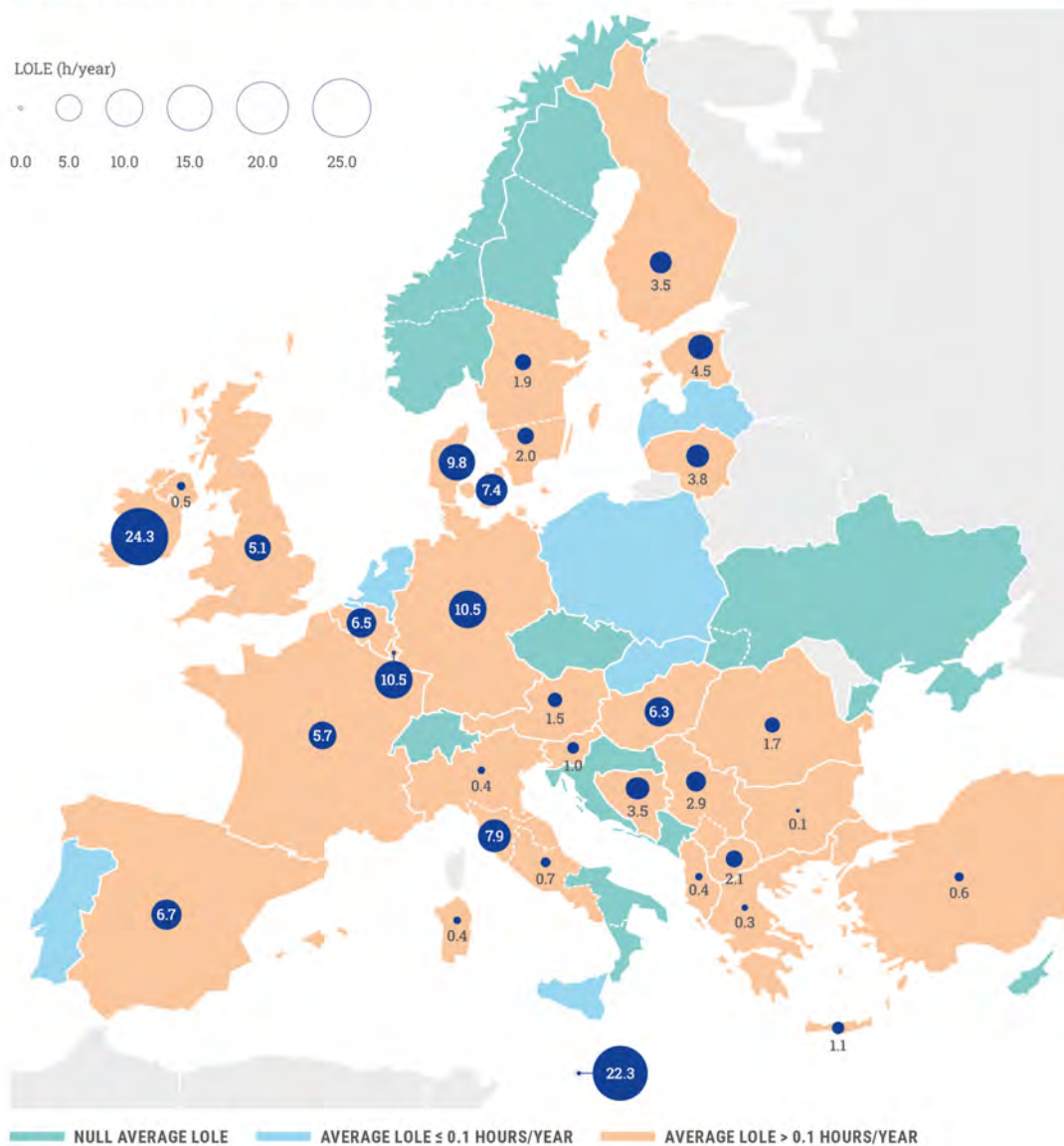
Suomen energiahuolto on monipuolista ja perustuu suurelta osin hajautettuun energiantuotantoon, joka puolestaan perustuu ydinvoimaan, vesivoimaan, biomassaan ja yhä enemmän uusiutuvaan tuuli- ja aurinkoenergiaan. Fossiilisten polttoaineiden (hiili, öljy, maakaasu) merkitys vähenee. Energiajärjestelmän siirtymisellä fossiilipohjaisesta energiasta uusiutuvaan energi-

aan on sekä myönteisiä että kielteisiä vaikutuksia kansalliseen energiavarmuuteen. Toisaalta riippuvuus tuontipolttoaineista vähenee, ja Suomi on tulossa entistä omavaraisemmaksi primäärienergiälähteiden osalta. Toisaalta uusi kapasiteetti on suurelta osin säästä riippuvaista muuttuvaa uusiutuvaa energiaa, mikä edellyttää suurta joustavaa sähkökapasiteettia. Fossiilisten polttoaineiden energiatiheys on suurempi kuin biomassan, minkä vuoksi fossiilisia polttoaineita on helpompi varastoida varmuusvarastoihin.

Omista ydin-, vesi- ja lämpövoimalaitoksistaan huolimatta Suomella on muutaman tunnin to-

dennäköisyys sähkökuorman katoamiseen, kuten kuvasta 4 Euroopan kuormituksen menetyksen odotusarvoista käy ilmi. Tämä johtuu siitä, että sähköyhteisissä naapurimaihin voi olla vikoja, samoin kuin osassa tuotantokapasiteettiamme. Vuonna 2022 Olkiluoto 3:lla oli esimerkiksi ongelmia syöttövesipumpun kanssa. Nyt ongelmia on usein Suomesta Ruotsiin johtavassa, vanhassa siirtolinjassa SE3. Yhteysongelma on vakavampi kuin aiemmin, koska Ukrainan sodan jälkeen sähköyhteys Venäjälle on katkaistu. Tilanne paranee, kun vuonna 2025 käyttöön otettava Aurora-lisäyhteysjohto yhdistää Pohjois-Suomen Pohjois-Ruotsiin.

### LOLE values for the Central Reference Scenario Without CM 2025



Kuva 4. Kuormituksen menetyksen odotusarvot ENTSO-E:n keskeisessä referenssiskenaariossa ilman kapasiteettimarkkinoita vuonna 2025.



Talvella 2022–2023 käytiin laajoja julkisia keskusteluja sähköpuutteesta ja sen ratkaisemiseksi tyypillisesti käytetyistä ennakovista toimenpiteistä, erityisesti vuorottelevista sähkökatkoista. Eri energijärjestöt ovat hahmotelleet erityisroolinsa tällaisten sähköpulumien aikana ja laatineet konkreettisia toimintasuunnitelmia eri skenaarioita varten. Esimerkiksi Fingridillä on käytössä kolmiportainen sähköpula-asteikko, jonka avulla yleisölle ja asianomaisille sidosryhmille viestitään sähköpulan vakavuudesta (Fingrid n.d.-b).

On olemassa selkeä suunnitelma, jota käytetään, jos maakaasusta tulee pulaa. Teollisuuskäyttäjät vähentävät ensimmäisenä kaasun käyttöä suurissa kombivoimalaitoksissa. Varmuusvarastot ovat riittävät, jotta kuluttajien maakaasun käyttö pysyy ennallaan.

Vakavan sähköpulan varalta on laadittu etukäteen katkaisusuunnitelmat, joilla taataan

sähkön jatkuva saanti kaikkein tärkeimmille kuluttajille, kuten sairaaloille. Fingrid valvoo näiden katkaisusuunnitelmien toteuttamista, ja niiden täytäntöönpanosta vastaa paikallinen sähkönjakeluverkko-yhtiö.

Suomessa Huoltovarmuuskeskus vastaa energian varmuusvarastojen ylläpidosta, jotta energiansaanti olisi mahdollisimman keskeytymätöntä kaikissa olosuhteissa, myös pitkittyneissä kriiseissä. Energiavirasto ylläpitää tällä hetkellä turpeen, kivihiilen ja öljyn varmuusvarastoja, jotka vastaavat viiden kuukauden kulutusta normaalioloissa. Ydinpolttoaineen tai maakaasun varmuusvarastoja ei ole käytettävissä. Bioenergia ja vesivoima eivät tarvitse pitkäaikaisvarastoja.

Fossiilisten polttoaineiden käytön vähentyessä myös varastot pienenevät. Toisaalta on arvioitu, että fossiilisten polttoaineiden rooli vara- ja huippuvoimana voi kasvaa, ja on ehdotettu, että fossiiliset varannot olisi sidottava usean vuoden keskimääräiseen kulutukseen,

jotta energian toimitusvarmuuden kannalta nykyinen taso voitaisiin säilyttää (AFRY 2021). Muille kotimaisille polttoaineille ei ole tällä hetkellä varmuusvarastointitarpeita lukuun ottamatta turvetta, jota varten perustettiin varasto vuonna 2022 lähinnä lämmön saannin varmistamiseksi ääriolosuhteissa.

Pidemmällä aikavälillä myös kaasun ja öljyn ei-fossiilisilla vaihtoehdoilla (uusiutuva vety, sen johdannaiset ja biokaasu) odotetaan olevan suurempi rooli energiahuoltovarastona. Vaihtoehtoiset polttoaineet saattavat myös edellyttää uusia varastointi- ja jakeluinfrastruktuureja. Häätävarastojen käyttöä valvotaan tiukasti ja rajoitetaan ääritapauksiin. Päätöksen varmuusvarastojen käytöstä tekee hallitus. Sähköpulan sattuessa voi olla tarpeen priorisoida myös sähkön käyttöä. Huoltovarmuuskeskus on toteuttanut kriittisten sähkönkäyttäjien keskuudessa kyselyn (HVK 2021), jonka tarkoituksena on luoda ohjeet sähkönkäytön priorisoimiseksi hätätilanteessa.

Energiavarmuusreservien lisäksi on turvettava energiantuotantokapasiteetti. Fingrid Oy

vastaa sähkön kulutuksen ja tuotannon tasapainottamisesta. Fingrid hankkii reservit Suomen, muiden Pohjoismaiden ja Viron reservimarkkinoilta. Reservit ovat voimalaitoksia, energiavarastoja ja kuluttajia, jotka voivat muuttaa kulutustaan ylös- tai alaspäin. Yhteispohjoismaisessa järjestelmässä reservien ylläpitovelvoitteista on sovittu pohjoismaisten sähköverkko-operaattorien kesken. Tällä hetkellä Fingridillä on omaa varavoimalaitoskapasiteettia 927 MW ja vuokrattuja varavoimalaitoksia 278 MW, mikä tekee yhteensä 1 300 MW manuaalista taajuuden palautusreserviä (mFRR) ylöspäin. Käytettävissä olevan kapasiteetin tulisi vastata suurimman sähköntuotantoyksikön häiriötilannetta. Tällä hetkellä Olkiluoto 3 -ydinvoimalaitos on suurin sähköntuotantoyksikkö, jonka maksimikapasiteetti on 1 600 MW, mikä on johtanut myös tarpeeseen lisätä käytettävissä olevan varavoiman määrää.

Perinteisten voimalaitosten vähentäminen ja nopeasti kasvava tuulivoiman määrä aiheuttavat myös haasteita verkon vakauden ylläpitämi-

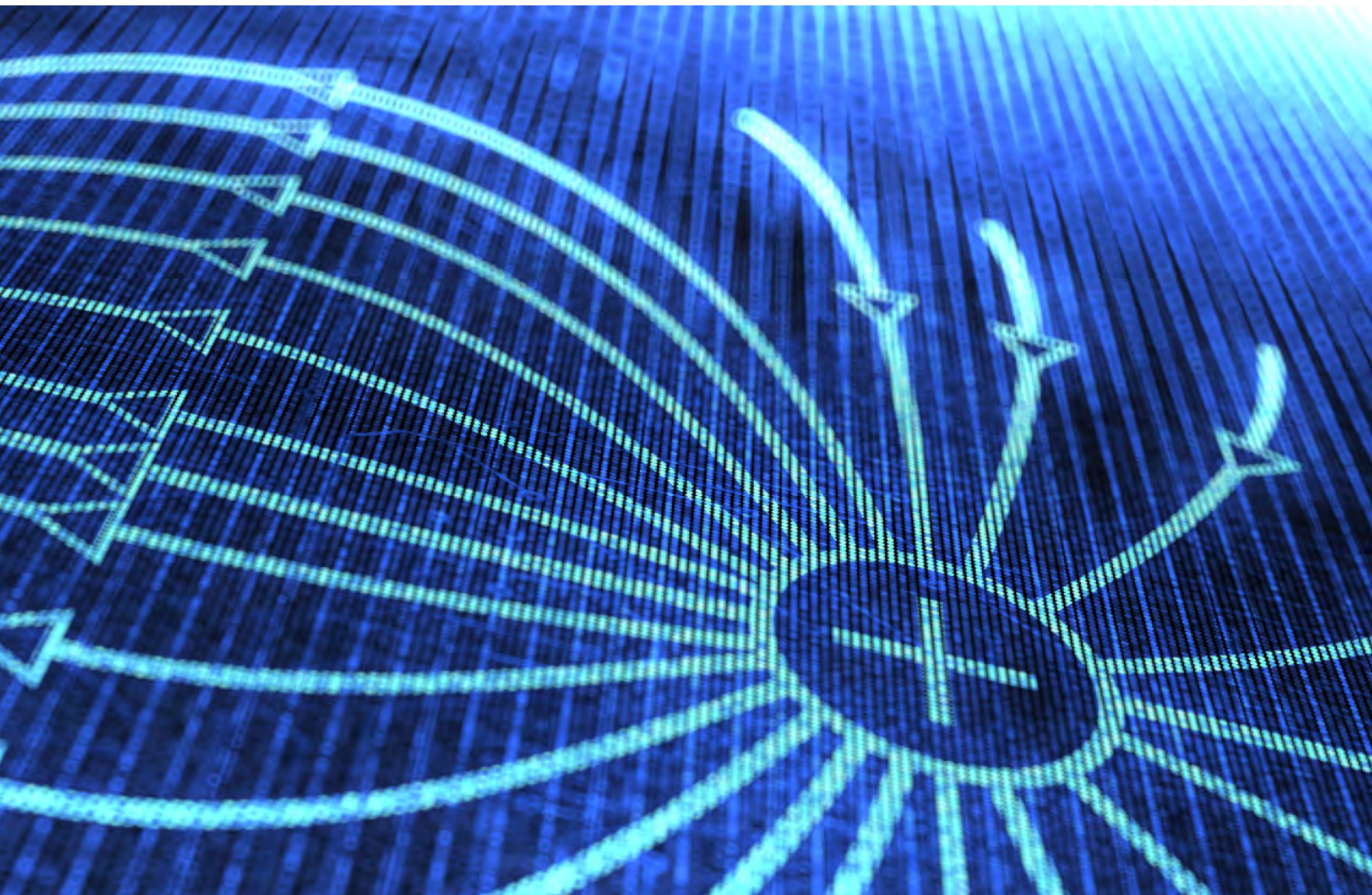


selle. Tämän vuoksi Pohjoismaissa on vuodesta 2020 lähtien käytetty nopeaa taajuusreserviä (Fast Frequency Reserve, FFR), joka reagoi taajuusvaihteluihin tarvittaessa. Sähköakut soveltuvat nopeisiin vasteisiin suhteellisen lyhyiden aikojen ajan, ja niiden roolin verkon vakauden ylläpitämisessä odotetaan tulevaisuudessa kasvavan. Fingrid kattaa reservien ylläpitokustannukset kantaverkkotariffilla ja tasepalveluissa kerätyillä maksuilla. Tasesähkömarkkinoiden (mFRR) kustannukset katetaan tasesähkömaksuilla, joita sähköntuottajat maksavat sähköntuotannon ja -myynnin erotuksen perusteella.

EU:ssa keskustellaan vilkkaasti kapasiteettitukien roolista. Nykyinen ajattelutapa, jonka mukaan kapasiteettitukea saavien laitosten ei pitäisi osallistua sähkömarkkinoille ja uusille laitoksille ei myönnetä tukea, on rajoittanut kapasiteettitukien roolia ja hyödyllisyyttä huomattavasti.

Energiaviranomainen ylläpitää voimalaitosrekisteriä ja seuraa sähköntuotantokapasiteettia yhdessä muiden energiemarkkinoiden toimijoiden kanssa ja raportoi kapasiteetin saatavuudesta. Lisäksi Energiavirasto seuraa sähkö- ja maakaasumarkkinoita sekä kehittää sähkön ja maakaasun toimitusvarmuutta. Energiavirasto on nimetty vastuuviranomaiseksi, joka vastaa alueellisiin ja kansallisiin sähkökriiseihin perustuvan riskivalmiussuunnitelman laatimisesta ja päivittämisestä Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivissä 2005/89/EY (EC 2005) edellyttämällä tavalla. Sähkökriisi on tilanne, jossa merkittävä sähköpula johtaa kiertävään kuormituksen katkaisuun ja jonka kesto on niin pitkä, että se aiheuttaa vakavia taloudellisia kustannuksia ja uhkaa kansalaisten turvallisuutta. Suunnitelmassa tarkastellaan kymmentä erilaista skenaariota ja niiden vaikutuksia energian toimitusvarmuuteen, kuten taulukossa 1 esitetään. Kaikkia skenaarioita pidetään mahdollisina, ja niiden rajat ylittävä riippuvuus on luokiteltu merkittäväksi. Taulukossa esitetään myös eri toimijoiden menettelyt ja vastuut energiakriisin uhatessa (Energiavirasto 2023c).

KUVA: ISTOCKPHOTO



Taulukko 1. Kymmenen eri skenaariota energiaviranomaisen riskivalmiussuunnitelmasta ja niiden vaikutukset energian toimitusvarmuuteen. (Energiavirasto 2023c).

Skenaario	Kuvaus	EENS <sup>1</sup>	LOLE <sup>2</sup>
Myrsky	Myrsky on voimakkaampi ja laajempi ja kestää odotettua kauemmin. Suuret tuhoalueet aiheuttavat pulaa materiaalista, varaosista ja henkilöstöstä.	Merkittävä	Merkittävä
Äärimmäinen säätilanne yhdistettynä useisiin vikoihin	Sähköjärjestelmä on jo nyt rasittunut lämpöaallon tai kylmän jakson vuoksi. Äärimmäisissä sääolosuhteissa alkaa esiintyä useita vikoja.	Merkittävä	Merkittävä
Pandemia	Nopeasti leviävä pandemia, joka voi johtaa siihen, että siirtoverkko-operaattorien, jakeluverkkoyhtiöiden ja voimalaitosten toimintahenkilöstö joutuu toimimaan kuormittuneesti tai rajoitetusti.	Merkittävä	Merkittävä
Tietoverkkohyökkäys liiketoiminnan kannalta kriittiseen tieto- ja viestintätekniiseen infrastruktuuriin (joka on fyysisesti yhteydessä sähköverkkoon).	Hyökkäys siirtoverkko-operaattorien, jakeluverkkoyhtiöiden, voimalaitosten ja suurten (teollisten) kuormittajien kriittisiä tieto- ja viestintätekniisiä järjestelmiä vastaan (esim. keskus-SCADA, sähköasemien SCADA, EMS, kuormituksen ja taajuuden säätöjärjestelmä, tietojen tallennus, aikataulukjärjestelmä, voimalaitoksen käyttöjärjestelmät, toimistotietotekniikka)..	Kriittinen	Katastrofaalinen
Tietoverkkohyökkäys liiketoiminnan kannalta kriittiseen tieto- ja viestintätekniikan infrastruktuuriin (ei yhteyttä sähköverkkoon).	Hyökkäys sellaisten markkinaosapuolten tieto- ja viestintätekniisiä järjestelmiä vastaan, jotka eivät ole suoraan fyysisesti yhteydessä sähköverkkoon (esim. markkinatoimijat, sähköpörs-sifoorumit, markkinatakaajat).	Merkittävä	Merkittävä
Avaintyöntekijöihin kohdistuva uhka	Kriittinen henkilöstö joutuu suorittamaan järjestelmää horjuttavia toimia. Tällaisia henkilöitä voivat olla esimerkiksi järjestelmäoperaattorit, tietotekniikan ylläpitäjät, henkilöt, joilla on käyttöoikeudet kriittisiin järjestelmiin ja laitteistoihin, toimitusjohtajat, talousjohtajat jne.	Merkittävä	Katastrofaalinen
Valvontakeskuksiin kohdistuvat fyysiset hyökkäykset	Fyysinen hyökkäys siirtoverkko-operaattorien, suurten jakeluverkkoyhtiöiden tai suurten voimalaitosten käyttökeskusten valvomoihin ja varavalvomoihin.	Merkittävä	Kriittinen
Valvontakeskuksiin kohdistuvat fyysiset hyökkäykset	Fyysinen hyökkäys voimalinjoja, muuntajia, sähköasemia, voimalaitoksia tai datakeskuksia vastaan.	Merkittävä	Merkittävä
Sisäpiirihyökkäys	Työntekijän (työntekijöiden) tai alihankkijan (alihankkijoiden) tekemä sabotaasi fyysisen puuttumisen tai tieto- ja viestintätekniisten järjestelmien väärinkäytön kautta. Siirtoverkko-operaattori, jakeluverkkoyhtiö tai voimalaitoksen operaattori ei enää hallitse tilannetta. Erityisesti kriittisiä järjestelmän osia ei voida enää valvoa.	Merkittävä	Katastrofaalinen
Poliittinen riski	Jossain päin maailmaa sijaitsevassa voimalaitoksessa on havaittu kriittinen turvallisuusriski. Mahdollisen turvallisuusriskin vuoksi tehdään poliittinen päätös sulkea kaikki samantyyppiset voimalaitokset Suomessa, kunnes kattavat tarkastukset on tehty. Tarkastukset on tehtävä välittömästi, eikä niitä voi lykätä seuraavaan vuosihuoltoon.	Merkittävä	Merkittävä

<sup>1</sup>EENS Energiantuotanto ei vastaa kysyntää

<sup>2</sup>LOLE Odotusarvo kuormitusmenetykselle

# 4. SÄHKÖMARKKINAT JA SÄHKÖN HINNOITTELU

Sähkömarkkinat ja sähkön oikea hinnoittelu liittyvät energian kohtuuhintaisuuteen, mikä on yksi kolmesta kestävästä energijärjestelmän peruspilarista. Luvussa 5 tarkastellaan eri toimijoiden roolia sähkömarkkinoilla, erilaisia tapoja hinnoitella sähkö ja vaihtoehtoisia sähkömarkkinoita ja hinnoittelutapoja. Osion lopussa kuvataan sähkömarkkinoiden tapahtumia viimeisimmän energiakriisin aikana ja energian loppukäyttäjien sopimusvaihtoehtoja kriisin jälkeen.

Keskeinen Euroopan unionin tavoite on muodostaa sisämarkkina, jolla ei ole sisäisiä rajoja ja jolla tavaroiden, henkilöiden, palvelujen ja pääomien vapaa liikkuvuus taataan (Euroopan unioni 2007). Siten yhteinen sähkön sisämarkkina toteuttaa näitä Lissabonin sopimuksen tavoitteita.

## 4.1 Sähkömarkkinoiden toimijat, roolit, oikeudet ja vastuut

Avoimilla sähkömarkkinoilla kilpailu on avattu tuotantoon ja myyntiin, joissa tavoitteena on kilpailun kautta luoda tehokkuuskannusteita ja siten matalammat hinnat. Suomessa on avattu tukkumarkkinan lisäksi myös vähittäismarkkina, jolloin jokaisella sähkönkäyttäjällä on vapaus valita sähkönmyyjä, jolta hän ostaa sähköenergian. Tehokkuuden ohella yksi keskeisistä kilpailun vapauttamisen ajureista on saada energiasektorille myös yksityistä pääomaa. Markkinoiden avaamisesta huolimatta energiayhtiöiden omistajia ovat Pohjoismaissa useimmiten julkiset tahot eli kunnat ja valtiot.

Sähkönsiirto- ja jakeluverkoissa on tunnistettu luonnollinen monopoli. Tällöin yksi alueellinen toimija voi tuottaa palvelun tehokkaammin kuin kilpailtu toiminta. Siirtoverkoissa on yleensä yksi valtakunnallinen siirtoverkko-operaattori, joka vastaa maanlaajuisesta sähkönsiirtoverkosta (110–400 kV jännitetasot) ja tehotasapainosta. Jakeluverkot ovat puolestaan alueellisia monopoleja, joissa yhdelle jakeluverkko-ope-

raattorille on määrätty maantieteellinen alue (esim. kaupunki tai maakunta), jossa ainoastaan kyseinen operaattori on oikeutettu harjoittamaan sähkönjakelua loppuasiakkaille keski- ja pienjännitteellä (0,4–20 kV). Jakeluverkko-operaattoreilla on liittämisen- ja jakeluvelvollisuus. Tämä tarkoittaa sitä, että ne ovat velvollisia liittämään toiminta-alueensa kuluksikohteet jakeluverkkoon ja hoitamaan sähkönjakelun alueellaan kohtuullisella hinnalla. Energiavirasto valvoo verkkoyhtiöiden hinnoittelun kohtuullisuutta, jotta ne eivät voisi väärinkäyttää monopoliasemaansa.

Sähköjärjestelmän keskeisin tekninen reunaehto on jatkuva tehotasapaino tuotannon ja kulutuksen välillä. Tuotannon ja myynnin / kulutuksen ja oston tasapainosta on vastuussa jokainen sähkömarkkinan osapuoli. Koska loppukuluttajan on hyvin vaikeaa huolehtia tästä tasapainosta, ketjutetaan tasevastuuta avoimen toimituksen ketjuilla. Loppukäyttäjä siis ostaa sähköä avoimella toimituksella, ja sähkön myyjä voi hankkia myynnin ja kulutuksen välisen eron tasevastaavalta toimijalta. Tämä tasevastuu ketjuuntuu siten, että viimeisenä valtakunnallisesta taseesta vastuussa on Fingrid, joka on ulkoistanut tasehallinnan pohjoismaiselle eSett-tasevastuuyritykselle.

## 4.2 Sähkömarkkinoiden kehitys ja rakenne

Euroopan energian sisämarkkinoiden luominen on ollut Euroopan unionin toimielinten tavoitteena jo 1980-luvulta lähtien (Meeus 2020). Kansallisia sähkömarkkinoita on pyritty integroimaan toisiinsa vuosina 1996–2019 hyväksytyjen neljän EU:n energialainsäädäntöpaketin avulla. Koko tämän ajan yhteistä markkinamallia on kehitetty teknologisiin, poliittisiin ja yhteiskunnallisiin muutoksiin sopeutumiseksi. Pitkästä kehitysjaksosta huolimatta markkinamalli kohtaa edelleen uusia haasteita, joihin sen

tulisi pystyä vastaamaan. Näistä esimerkkeinä ovat energia-alan viimeaikaiset muutokset, kuten uusiutuvan energian osuuden suuri kasvu, tuotantorakenteen muuttuminen hajautetumaksi sekä kysyntäjouston kasvava tarve.

Luottamus markkinoiden toimivuuteen perustuu siihen, että hinnat vastaavat kysyntää ja energiatuotannon kustannuksia. Pää tarkoitus vapaan kilpailun sähkömarkkinoilla on saada markkinat toimimaan tehokkaasti. Tämä edellyttää riittävää siirtokapasiteettia ja läpinäkyvyyttä markkinoilla. Kun sähkömarkkinoille suunnitellaan sääntöjä, tulee jokainen markkinatoimija ottaa huomioon, sillä sääntöjen tarkoitus on luoda markkinatoimijoille taloudellisia kannustimia toimia markkinoilla, jotka parantavat energijärjestelmän reaaliaikaista luotettavuutta ja riittävyyttä pitkällä aikavälillä. (Wolak 2021)

Sähkön hintojen suuret vaihtelut ja erittäin korkeat hintapiikit voivat luoda epäluottamusta markkinoita kohtaan. Sähkön korkeiden markkinahintojen aikana uusiutuvan energian tuottajat, joiden tuotantokustannukset ovat minimaaliset, voivat tilapäisesti tehdä suurtakin voittoa. Toisaalta, kun sähkön hinta on pidemmän aikaa alhainen, ovat erityisesti perinteisten

tuotantomuotojen sähköntuottajat haastavassa asemassa, kun laitosten käyttökustannuksia on vaikea kattaa. Sähkön hintataso antaa myös pitkän aikavälin signaaleja kapasiteetin riittävyydestä: esimerkiksi korkea hinta kannustaa investointeihin ja kasvanut kapasiteetti laskee hintaa.

Euroopan markkinajärjestelmän tulisi pyrkiä poistamaan fossiilisten polttoaineiden, erityisesti maakaasun, aiheuttamaa epävarmuutta sähkömarkkinoilta (EC 2021). Tässä epävarmuudella ei viitata pelkästään korkeisiin sähkön hintoihin, vaan energiavarmuuden kannalta kestävän järjestelmän tulisi saavuttaa myös geopoliittinen riippumattomuus. Kun vihreä siirtymä etenee ja sitä kautta fossiilisten polttoaineiden käyttö vähenee, tulee näin käymään luonnollisesti siirtymäajan puitteissa. Toisaalta esimerkiksi venäläisestä kaasusta irtautuminen tapahtui kerralla, kun Eurooppa luopui venäläisen kaasun käytöstä Venäjän hyökättyä Ukrainaan.

#### 4.2.1 Sähkömarkkinoiden markkinapaikat

Euroopan sähkömarkkinoilla kauppaa voidaan käydä joko sähköpörsseissä (kuten Nord Pool tai EPEX SPOT) standardoiduilla tuotteilla tai vastaavasti kahdenvälisillä OTC-kaupoilla







(Over-The-Counter) tai PPA (Power Purchase Agreement) sopimuksilla. OTC-kaupassa sähkön osto ja myynti tapahtuvat suoraan ostajan ja myyjän välillä kahdenvälisessä kaupassa ilman välittäjiä eli käytännössä sähköpörssien ulkopuolella. Yksittäiset pienkuluttajat eivät voi suoraan osallistua sähköpörssiin, vaan niiden edustajana sähköpörssissä toimii useimmiten energiayhtiö eli sähkönmyyjä. Suomessa pienkuluttaja voi kuitenkin ostaa sähköä sähkönmyyjältä markkinahintaan (tunneittain vaihtuva spot-hinta), johon lisätään usein sähkönmyyjän marginaali. Toinen vaihtoehto on erilaiset kiinteän hinnan sopimukset ja niiden eri variaatiot. Kiinteähintaisten sopimusten etuna kuluttajalle on ollut se, että riski hinnannoususta jää sähkönmyyjälle. Markkinoilla on myös niin sanottuja hybridisopimuksia, joissa hinta vaihtelee sovitussa raameissa pörssihinnan ja kulutuksen ajoittamisen mukaisesti.

Sähkönmyyjät voivat itse suojautua etukäteen hinnannousun riskiltä johdannaismarkkinoilla tehtävillä sopimuksilla sopimuskauden ajaksi. Sähkönmyyjä voi esimerkiksi ostaa futuurisopimuksella sähköä pörssistä tiettyyn hintaan sopimuskauden ajan. Jos sähkönmyyjä saisi futuurisopimuksen edullisemmin kuin mitä on sitoutunut myymään asiakkailleen kiinteän hinnan sopimuksella, sopimusten hintaero olisi voittoa yhtiölle. (Rothovius ym. 2013). Näin vältyttäisiin hinnannousun riskiltä, mutta vastaavasti pörssihinnan laskusta yhtiö ei hyötyisi, sillä futuurisopimuksen hinta olisi kiinteä.

Sähköyhtiön on mahdollista tehdä myös osto-optiosopimus, jossa se maksaa preemion ver-

ran oikeudesta ostaa sähköä tiettyyn hintaan. Vaikka markkinahinta (spot-hinta) olisi edullisempi kuin optiosopimuksessa määritelty hinta, sähköyhtiö saisi edelleen ostaa sähkön markkinahintaan. Kun markkinahinta on matalampi kuin kuluttajalle myydyssä kiinteässä sopimuksessa, sähköyhtiö tekisi voittoa markkinahinnan ja sopimushinnan erotuksen vähennettynä preemiolla. (Rothovius ym. 2013). Vastaavasti jos optiohintaa olisi edullisempi kuin markkinahinta, voitto markkinahintaan nähden olisi niiden erotus vähennettynä preemiolla. Jos markkinahinta pysyy muuttumattomana, ei voittoa kerry, mutta preemio jää edelleen maksettavaksi. Edellä kuvatun hintasuojausprosessin vuoksi kiinteähintainen määräaikainen sopimus sitoo sekä ostajaa että myyjää.

Energiantuottajien kanssa voidaan solmia suoraan myös niin sanottuja PPA-sopimuksia (Power Purchase Agreement), jotka solmitaan usein moneksi vuodeksi kerrallaan. Näissä tapauksissa esimerkiksi teollisuus tai yritys sitoutuu ostamaan tuulivoimantuottajalta sähköä tiettyyn hintaan useaksi vuodeksi kerrallaan. Tällainen sopimus voidaan solmia jo ennen itse energiantuotantolaitoksen rakentamista. Tuotannon etukäteen myyminen tyypillisesti pienentää tuotantolaitoksen investoinnin riskiä ja siten parantaa mahdollisuuksia saada projektille rahoitus. PPA-sopimus voi olla fyysinen tai synteettinen. Fyysisessä sopimuksessa tuottaja myy sähkön suoraan käyttäjälle, kun taas synteettisessä sopimuksessa sähkökauppa tapahtuu pörssin välityksellä ja PPA-sopimus on johdannaisopimus, joka tili-

tetään perustuen pörssihinnan ja sopimushinnan väliseen eroon (Tuulivoimayhdistys 2019).

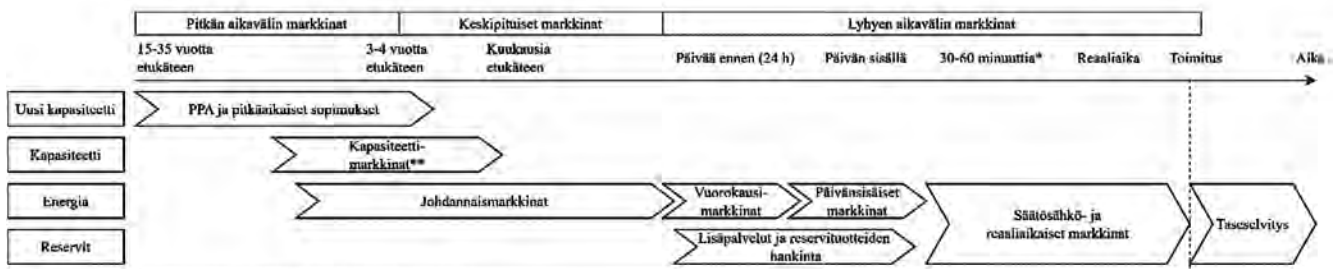
Sähköstä käydään kauppaa erimittaisissa ajanjaksoissa erilaisilla markkinoilla, joilla kaupankäyntimallit vaihtelevat. Sähkömarkkinoiden eri markkinapaikat on esitetty kuvassa 5. Eri markkinoilla on erilaisia tehtäviä: johdannaisoppimuksia käytetään riskien hallintaan ja vuorokausimarkkinalla myydään ja ostetaan valtaosa energiasta, kun taas reservimarkkinoita tarvitaan varmistamaan hetkellinen tehotasapaino. Eri markkinoiden yhteistyöllä varmistetaan, että tehotasapaino pysyy markkinalla jatkuvasti ja mahdollisimman kustannustehokkaasti. Esimerkiksi sähkön johdannaismarkkinoilla (forward markets) kauppaa käydään futuureista, forwardeista, hintaerosopimuksista ja optioista. Johdannaismarkkinoilla kauppaa käydään joko kahdenvälisesti (OTC-markkinat) tai NASDAQ Commoditiesin kautta. (Meeus 2020). Johdannaiskauppaan ei liity välttämättä sähkön fyysistä toimitusta, ja kauppaa voidaan tehdä päivä-, viikko-, kuukausi-, vuosineljännes- ja vuosisopimuksina tuotteesta riippuen.

Vuorokausimarkkinoilla (day-ahead market), joka toimii myös referenssimarkkinana esimerkiksi finanssituotteille, käydään vuorokautta ennen sähköntoimitusta kerran päivässä suljettu huutokauppa, jossa markkinaosapuolet jättävät tarjouksensa kansallisten sähkömarkkinatoimijoiden kautta eurooppalaiselle EUPHEMIA-nimiselle markkinoiden selvitysalgoritmillemme, joka

on kehitetty laskemaan sähkön kohdentamista ja sähkön hintojen jakautumista koko Euroopassa. Markkinaselvityksessä muodostetaan markkinaosapuolien tarjousten perusteella (kysyntä ja tarjonta) sähkölle sekä tunneittainen aluehinta että systeemi hinta. Aluehinta on tarjousvyöhykkeelle muodostuva hinta, joka eroaa systeemi hinnasta, jos siirtokapasiteettia ei ole tarpeeksi. Vastaavasti systeemi hinnassa ei ole huomioitu siirtorajoituksia, vaan se on koko pohjoismaisella markkina-alueella annettujen myynti- ja ostotarjousten muodostamien tarjouskäyrien leikkauspiste.

Päivänsisäisiä markkinoita (intraday market) käytetään ennakoimattomien tuotannon ja kulutuksen muutosten sopeuttamiseen, ja kaupankäynti tapahtuu samana päivänä kuin toimitus. Useimmat Euroopan maat käyttävät päivänsisäisillä markkinoilla jatkuvan kaupankäynnin järjestelmää, ja heti kun osto- ja myyntitarjous kohtaavat, kauppa toteutuu. Esimerkiksi Suomessa päivänsisäiset markkinat ovat auki toimitustuntiin asti. (Fingrid n.d.-a).

Näiden lisäksi Suomessa toimivat vielä säätösähkö- ja reservimarkkinat. Säätösähkömarkkinat ovat pohjoismaisten kantaverkko-yhtiöiden ylläpitämät säätöenergiamarkkinat, joiden tarkoituksena on ylläpitää sähkön tuotannon ja kulutuksen välistä tasapainoa. Suomessa reservituotteilla on käytännössä kaksi käyttötarkoitusta, joita ovat jatkuva taajuudenhallinta sekä taajuuden palauttaminen normaalialueelle häiriötilanteessa.



\* Suomessa viimeistään 45 minuuttia ennen käyttötuntia.

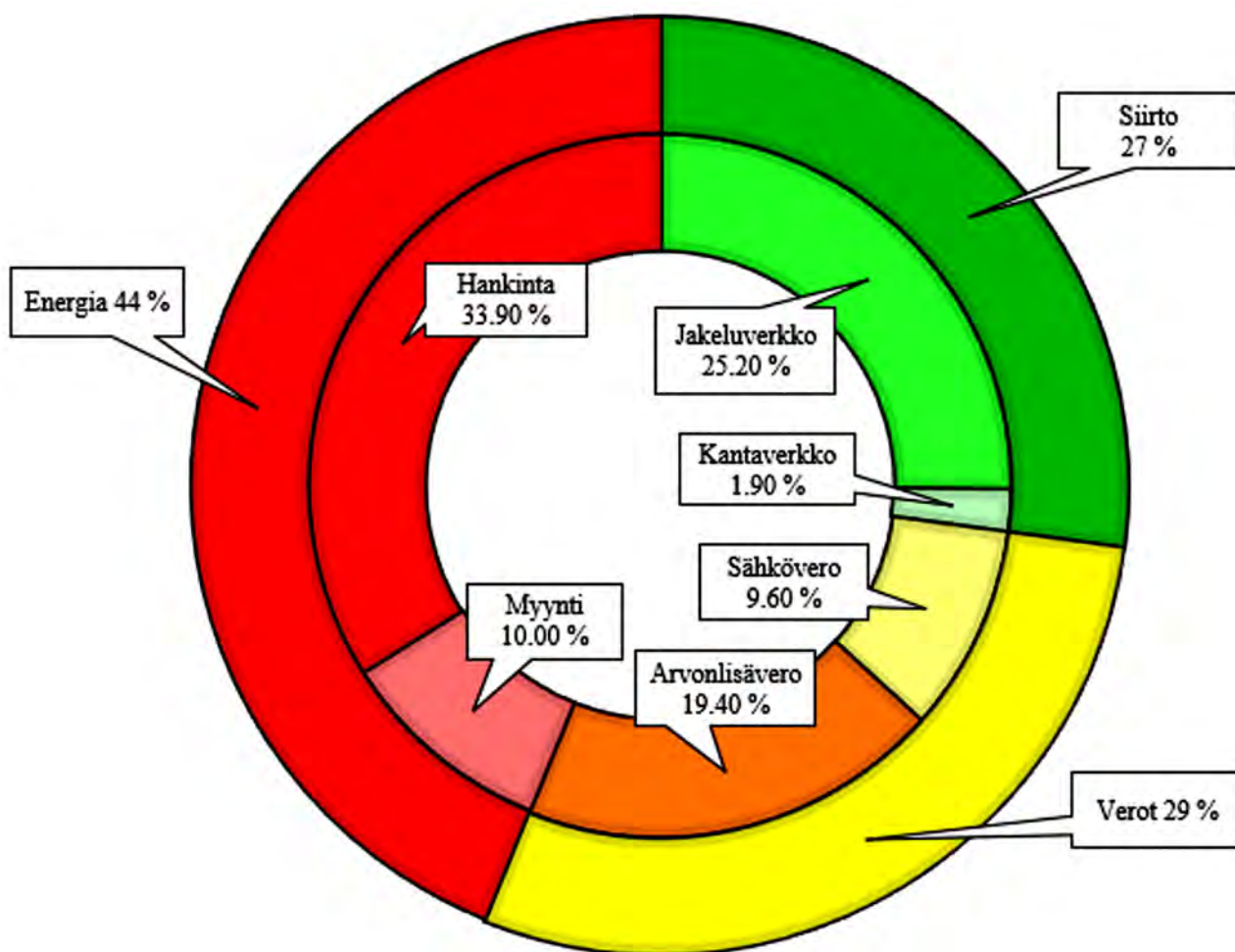
\*\* Suomessa on käytössä kapasiteetti-perusteinen reservituote (säätökapasiteettimarkkina, mFRR) sekä tehoreservijärjestelmä. Tehoreservijärjestelmä on strateginen reservi, joka turvaa sähkön riittävyyden silloin, kun markkinaehtoinen sähkön tarjonta ei siihen kykene. Strateginen reservi, joka saa tehoperusteista korvausta, ei voi osallistua muille sähkömarkkinapaikoille.

Kuva 5. Markkinapaikat sähkömarkkinoilla. Mukailten lähdettä (IEA 2016).

#### 4.2.2. Sähkön kuluttajahinnan muodostuminen

Kuluttajan sähkön hinta muodostuu kolmesta eri osa-alueesta: sähköenergian hinnasta, sähkönsiirron kustannuksista sekä sähkö- ja arvonlisäverosta. Sähköenergian hintaan kuuluu sähkön hankinnasta ja myynnistä koituneet kustannukset. Sähkönsiirtoon liittyvillä maksuilla katetaan kantaverkossa, alueverkossa ja jakeluverkossa syntyvät kustannukset. Kustannuksia sähköverkoissa aiheuttavat verkon ylläpito ja kunnostaminen, uudistaminen ja kokonaan uuden verkon rakentaminen.

Sähkövero on porrastettu kahteen veroluokkaan, joista veroluokkaan I kuuluvat kotitaloudet, maataloussektori, julkinen sektori ja palvelutoiminnot, kun taas veroluokkaan II kuuluvat teollisuus, ammattimainen kasvihuoneviljely, kaivostoiminta sekä yli 5 megawatin konesalit (Energiaverotus n.d.). Veroluokan I sähköveron määrä on 2,253 snt/kWh (+ alv), kun taas veroluokan II määrä on 0,05 snt/kWh (+ alv). Sähköveron lisäksi maksettavaksi tulee myös huoltovarmuusmaksu 0,013 snt/kWh. Kuluttajahinnan muodostuminen vuonna 2022 on esitetty kuvassa 6.



Kuva 6. Sähkön kuluttajahinnan muodostuminen vuonna 2022, vuosikulutus 5 000 kWh. (Mukailten Sähkösanomien 2022).

### 4.3 Sähkömarkkinamallit ja niiden kehitys

Suomen sähkömarkkinat ovat osa eurooppalaista sähkömarkkinaa, jonka yhteiskunnallisten hyötyjen on arvioitu olevan yli 18 miljardia euroa vuodessa (ACER 2021). Jotta yhtenäisellä markkina-alueella voisi olla kaikkialla sama sähkön hinta, käytännössä alueiden välisen siirtokapasiteetin tulisi olla rajatonta, eikä häviöitä saisi syntyä. Tämä ei ole kuitenkaan mahdollista, ja siksi sähkön hinnoitteluun on kehitetty erilaisia vaihtoehtoja. Kun Yhdysvalloissa sähkömarkkinoilla vallitsee pääasiassa solmuhinnoittelujärjestelmä (*nodal pricing*), Euroopan yhtenäisellä sähkömarkkinalla on käytössä vyöhykehinnoittelu (*zonal pricing*).

Solmuhinnoittelussa tai paikallisessa marginaalihinnoittelussa sähkön hinnat heijastelevat siirtoverkon rajoituksia sekä sähköntoimituksen häviöitä solmujen välillä. Solmuhinnoittelun nähdään sopivan esimerkiksi markkinoille, joiden fyysinen siirtoverkko on heikko. Tällaisessa tapauksessa on helpompaa laskea jokaiselle verkossa olevalle solmukohtalle oma solmuhintansa kuin yrittää yhdistää niistä suurempia alueita.

Koska Suomi on osa eurooppalaista yhteis-sähkömarkkinaa, myös Suomessa on käytössä vyöhykehinnoittelun periaatteet. Vyöhykehinnoittelussa tarjousvyöhykkeet muodostetaan maantieteellisesti, usein joko valtioiden rajojen mukaan tai sitä suurempina tai pienempinä alueina. Kun alkuoletuksena sähköverkon kullakin vyöhykkeellä on se, ettei siirtolinjoissa ole ruuhkaa, siirtolinjojen ruuhkautuessa siirtokapasiteetti jaetaan tarjousvyöhykkeiden kesken. Ruuhkatilanteissa, tai niin kutsutuissa pullonkaulatilanteissa, eri tarjousvyöhykkeillä voi esiintyä toisistaan poikkeavia hintoja. Tällöin sähkö siirtyy pääsääntöisesti halvemman hinnan alueelta kalliimmalle. Esimerkiksi Suomessa, Virossa, Latviassa ja Liettuaassa on vain yksi tarjousalue kussakin, Ruotsissa on neljä ja Norjassa viisi eri tarjousaluetta. Vaikka Ahvenanmaa on maantieteellisesti osa Suomea, sähkömarkkinanäkökulmasta se kuuluu Ruotsin SE3-tarjousvyöhykkeeseen.

Sekä vyöhyke- että solmuhinnoittelussa markkinahinta määräytyy lyhyen aikavälin sähkömarkkinoilla käydyssä kaupankäynnissä marginaalihinnoittelujärjestelmän avulla. (Salovaara



ym. 2016). Marginaali- tai rajakustannushinnoittelussa on käytössä niin sanottu ajojärjestysperiaate (*merit order curve*), jossa eri energiantuotantomuotojen tuotantotarjoukset asetetaan järjestykseen rajakustannusten perusteella halvimasta energiantuotantomuodosta alkaen. Rajakustannuksia ovat esimerkiksi polttoaine- tai tuotantolaitoksen ylläpitokustannukset. Seuraavan päivän sähkönkulutusta vastaava määrä tuotantotarjouksia otetaan vastaan halvimasta tarjouksesta alkaen, kunnes korkeimman hyväksytyn tarjouksen hinta määrää sähkön markkinahinnan.

Ajojärjestyksessä ensimmäisenä ovat uusiutuvat energiat, kuten aurinko-, tuuli-, ja vesivoimatuotanto. Tämän jälkeen tulee useimmiten ydinvoima ja sen jälkeen hiilivoima. Viimeisimpänä ovat useimmiten maakaasulla toimivat kaasuturbiinit. Luonnollisesti sähkön tukku- ja markkinahinta nousee korkeaksi, kun sähkön kulutus nousee lähelle käytössä olevaa enimmäistuotantokapasiteettia. Eri tuotantomuotojen kiinteät kustannukset katetaan pääasiassa sähkönkäytön ruuhka-aikoina. Uusiutuvan energian tuotantomuotojen rajakustannukset ovat marginaaliset tai niitä ei ole. Sään suo-

siessa sääriippuvaiset tuotantomuodot siirtävät korkeammilla rajakustannuksilla toimivat sähköntuottajat oikealle ajojärjestyskäyrässä. Kun uusiutuvalla energialla saadaan katettua suurempi osa energiantarpeesta, eikä kalliimpia tuotantomuotoja tarvita energian kysynnän tyydyttämiseen, toteutunut markkinahinta laskee.

Eurooppalainen eli myös Suomea koskeva sähkömarkkinamalli ja sen kehittäminen herättävät jatkuvaa keskustelua. Energiakriisi kiihdyttää keskustelua entisestään. Markkinamallin kehittämisessä jäädään useimmiten kuitenkin markkinamekanismitasolle, eikä kokonaisvaltaisia radikaalimpia uudistuksia ole juurikaan esitetty (Honkapuro ym. 2023; Silva-Rodriguez ym. 2022). Esimerkiksi hintavyöhykkeiden uudelleenjakoa on tutkittu lähteissä (Bertsch ym. 2017; Felling ja Weber 2018; Lundin 2022), kun taas (Ashour Novirdoust ym. (2021) ehdottavat kokonaan siirtymistä vyöhykehinnoittelusta solmuhinnoitteluun. Myös kapasiteetinpalkitsemismekanismia on tutkittu useassa eri lähteessä (kts. esimerkiksi Hach ym. 2016; Keles ym. 2016; Rios-Festner ym. 2020). Cramton (2017) puolestaan ehdottaa, että tulevaisuuden haasteisiin vastaamiseksi paras markkinamal-



li on jatkossakin tehokkaat spot-markkinat, joiden tukena on johdannaismarkkinat sekä kilpailukykyiset jälleenmyyntimarkkinat, jotka kannustavat kysyntäjousto.

Honkapuron ym. (2023) kirjallisuuskatsauksen mukaan yksittäisten markkinamekanismien haasteet tunnistetaan hyvin, muutokset niihin nähdään toivottavina ja sähkömarkkinoiden ja energijärjestelmän tämänhetkisiä tarpeita paremmin vastaavia markkinamekanismeja pyritään kehittämään jatkuvasti. Samaisessa kirjallisuuskatsauksessa aineistona olevat tutkimukset ja niissä esitetyt ratkaisut tai kehitysehdotukset tähtäävät pääasiassa eurooppalaisen energiapolitiikan tavoitteiden saavuttamiseen sekä Euroopan laajuisten sähkömarkkinoiden vahvempaan integraatioon. Sinällään tämä on luonnollista, sillä yksittäisten maiden energiapolitiikka heijastuu väistämättä niiden naapurimaihin, ja näin ollen eri toimijoiden välinen koordinointi ja päätöksenteko Euroopan tasolla on tärkeää (Corona ym. 2022). Yhteismarkkinan kehittämistä perustellaan myös parantuneella likviditeetillä ja tehokkuudella sekä sosiaalisen hyvinvoinnin lisääntymisellä (Koltsaklis ja Dagoumas 2018).

#### 4.4 Vuoden 2022 energiakriisi – mitä sähkömarkkinoilla tapahtui?

Energian hinnat alkoivat nousta Euroopassa syksyllä 2021. Maakaasun saatavuus heikentyi huoltotöiden vuoksi ja lisäksi kuivuus ja kuumuus häiritsivät vesi- ja lauhdevoimaa. Samanaikaisesti kulutus kasvoi talouden kasvussa koronapandemian jälkeen. Venäjän helmikuussa 2022 aloittaman hyökkäyssodan seurauksena energian tuonti Venäjältä tyrehtyi. Maakaasuvarastot olivat jo valmiiksi matalalla tasolla, minkä seurauksena kaasun saatavuus heikentyi ja hinta kasvoi ennätyskorkeisiin lukemiin. Maakaasun hinta oli ennen kriisiä alle 20 €/MWh, nyt hinnat nousivat yli 300 €/MWh (Trading Economics 2023). Myöhemmin opittiin, että aikaisemmat, "huoltotöistä" johtuneet kaasun saatavuusongelmat olivat osa Venäjän strategiaa käyttää "energia-asetta" Eurooppaa vastaan.

Epäonnisesti Ranskan ydinvoimalaitoksissa oli vuoden 2022 aikana merkittäviä teknisiä ongelmia. Ydinvoiman saatavuusongelman vuoksi Euroopassa jouduttiin käyttämään ta-

vallista enemmän huomattavasti kalliimpaa maakaasua. Polttoaineen hinnan lisäksi myös päästöoikeuksien hinnat kasvoivat merkittävästi; päästöoikeuksien hintataso oli ollut pitkään alle 10 €/CO<sub>2</sub>tn, nyt hintataso oli noin 100 €/CO<sub>2</sub>tn (Trading Economics 2023). Vesivarastot olivat myös keskimääräistä matalammalla tasolla, ja syksyllä huoli energian riittävydestä talven yli oli todellinen. Tämä kaikki johti ennätyskorkeisiin sähkön hintoihin.

On kuitenkin hyvä huomata, että kyse oli nimenomaan hintakriisistä, joka aiheutti merkittäviä haasteita kotitalouksissa ja yrityksissä. Sähkömarkkina sinällään toimi sen periaatteiden mukaisesti: Niukkuus saatavuudessa nosti hintaa. Kohonnut hinta puolestaan laski kulutusta. Tämä johti toivottuun lopputulokseen, ja Euroopassa riitti energiaa. Tehopulan ja sen seurauksena kiertävien sähkökatkojen riski koski myös Suomea, mutta loppujen lopuksi korkeiden hintojen, viestinnän (Suomessa Motivan astetta alemmas -kampanja) ja leudon talven alentaman kulutuksen myötä niitä ei tarvittu.

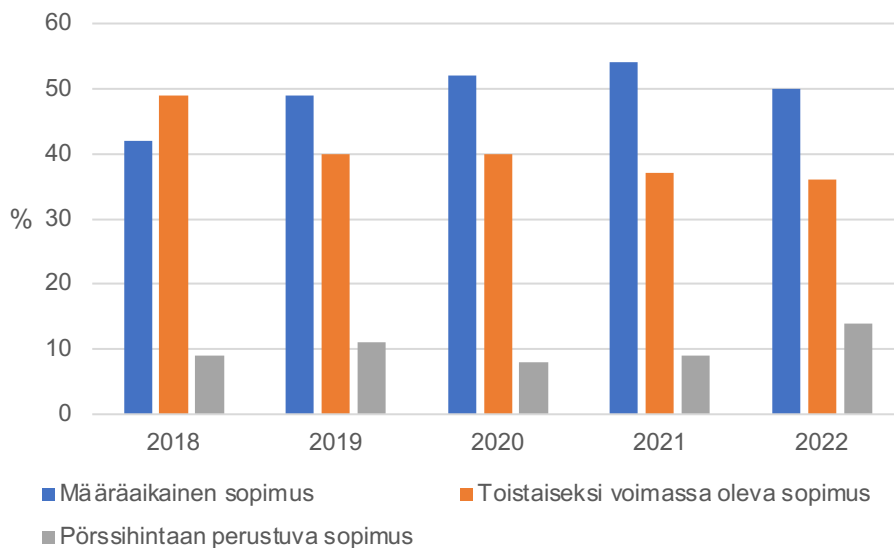
Kriisin keskellä alkoi kuitenkin keskustelu markkinamallin toimivuudesta. Vaihtoehtoisia markkinamalleja ehdotettiin ja Euroopan sähkömarkkinan totaalisella uudistamisellakin spekulointiin. Euroopan komissio alkoi kesällä 2022 valmistelemaan "REPowerEU"-lakipakettia, jolla sähkömarkkinaa muokattaisiin aiempaa kriisinkestävämmäksi. Lakipaketti saatiin kommentoille maaliskuussa 2023 (EC 2023a), ja lopputulos on, että isossa kuvassa sähkömarkkina säilyy lähes ennallaan. Keskeiset muutokset liittyvät uusiutuvan tuotannon edistämiseen esimerkiksi hinnanerosopimuksilla (CfD) ja pitkäaikaisilla sähkönmyyntisopimuksilla (PPA). Lisäksi kuluttajien oikeuksia parannetaan ja heidän saatavilleen taataan erilaisia sähkönmyyntisopimuksia, kuten dynaamisia sopimuksia, joilla edistetään kysyntäjousto, ja toisaalta kiinteähintaisia sopimuksia, joilla pienennetään kuluttajan riskejä. Jäsenvaltioille myönnetään myös oikeuksia tukea kuluttajia mahdollisessa sähkön hintakriisissä. Huomattavaa kuitenkin on, että toimivaksi havaittua marginaalihinnoitteluperiaatetta ei muuteta.

Kuluttajille tyypillisesti tarjotut sähköenergian sopimustyytit voidaan jakaa neljään eri luokkaan:

- » Toistaiseksi voimassa olevat sopimukset: Myyjä voi muuttaa hintaa ilmoittamalla siitä vähintään kuukausi ennen muutoksen voimaantuloa. Asiakas voi purkaa sopimuksen kahden viikon varoitusajalla.
- » Määräaikaiset kiinteähintaiset sopimukset: Sähköenergian hinta sovitaan määräajaksi, tyyppillisesti yhdeksi tai kahdeksi vuodeksi. Sopimuksen ennenaikaisesta purkamisesta voi joutua maksamaan sopimussakon.
- » Pörssihintaan perustuvat sopimukset: Hinta vaihtelee tunneittain muodostuen sähköpörssi Nord Poolin Suomen aluehinnasta ja myyjän marginaalista.
- » Määräaikaiset sopimukset joustokannustimella: Viime vuosina ovat yleistyneet hybridisopimukset, joissa hinnalle määritellään

tietty perustaso, mutta hintaan tulee korotus tai alennus riippuen siitä, ajoittuuko asiakkaan kulutus pörssin keskihintaa kalliimmille vai halvemmille tunneille.

Kaikki sähkökäyttäjät voivat valita sähkömyyjänsä vapaasti. Sähkömyyjällä, jolla on suurin markkinaosuus tietyn jakeluverkon alueella, on kuitenkin Sähkömarkkinalain (588/2013) mukaan velvollisuus toimittaa sähköä kohtuulliseen hintaan kuluttajille ja muille loppukäyttäjille, joiden käyttöpaikka on varustettu enintään 3 x 63 ampeerin pääsulakkeilla tai joiden sähkönkulutus on korkeintaan 100 000 kWh vuodessa. Toimitusvelvollisuuden piirissä olevien sopimusten hintoja ei säännellä, vaan asiakas voi halutessaan tehdä tutkintapyyntöä Energiavirastolle.

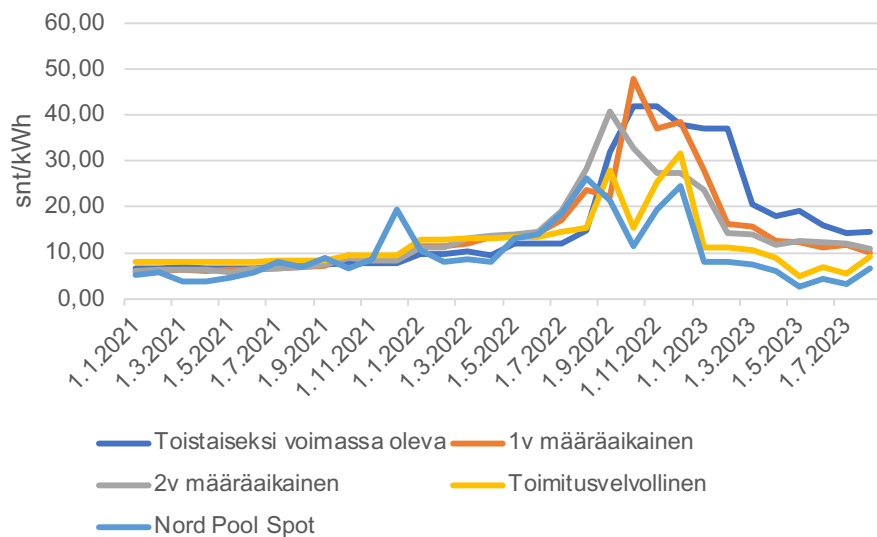


Kuva 7. Osuus vähittäisasiakkaista eri sopimustyypeillä 2018–2022. (Energiavirasto 2023b).

Kiinteähintaiset sopimukset ovat olleet suosittuja (Kuva 7), mutta energiakriisin vaikutuksesta kuluttajien valinnanvara pieneni talvella 2022–23, kun määräaikaisia ja toistaiseksi voimassa olevia sopimuksia tarjoavien sähkömyyjien määrä väheni huomattavasti (Energiavirasto 2023b). Ajankohdan markkintatilanteen mukaan vaihtelevia hintoja voidaan tarjota vähittäisasiakkaille, koska Suomessa

yli 99 prosentilla sähkökäyttäjistä on kulutuksen ajankohdan vähintään tuntitasolla rekisteröivä, niin sanottu älykäs sähkömittari.

Kuvassa 8. on esitetty sähkön toistaiseksi voimassa olevien sekä yhden ja kahden vuoden määräaikaisten tarjoushintojen, toimitusvelvollisuushintojen sekä sähköpörssin Nord Poolin Suomen aluehinnan kehitys 1.1.2021–1.8.2023.

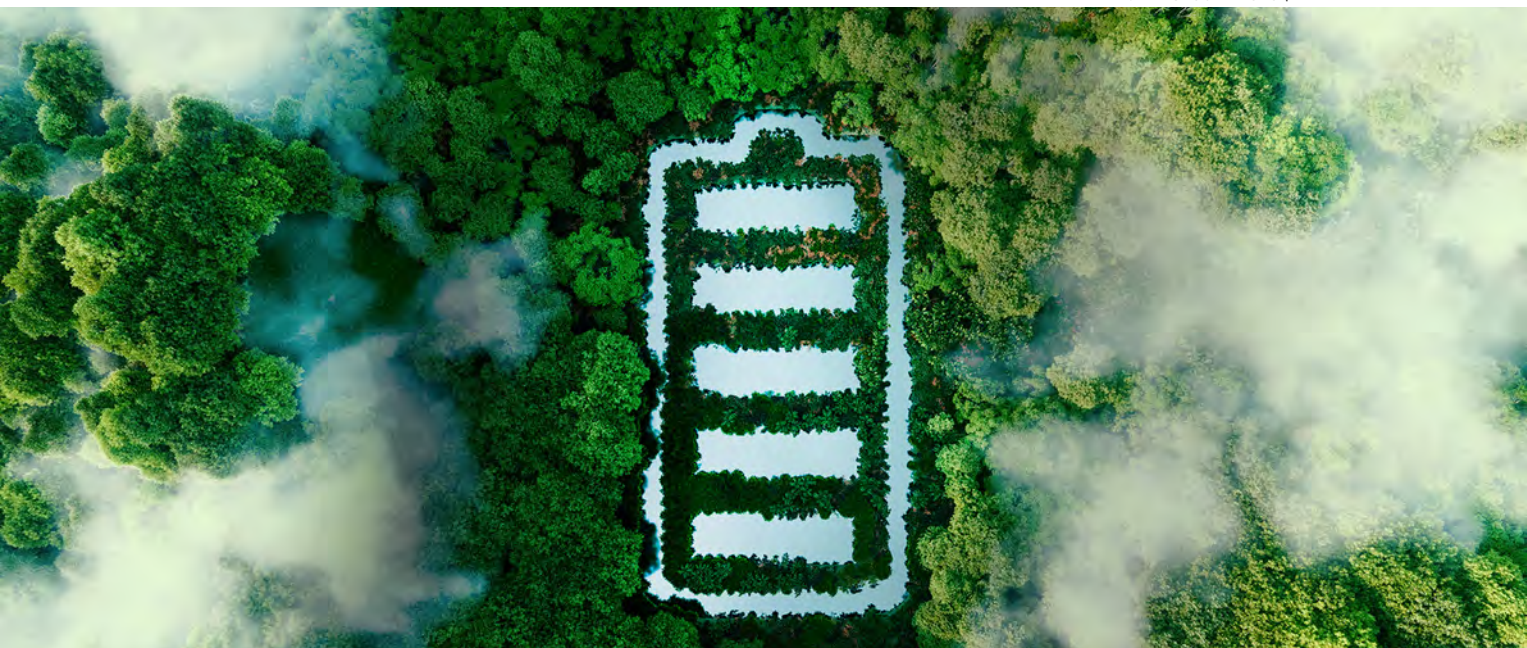


Kuva 8. Sähkön hinnan kehitys 5 000 kWh vuodessa kuluttavalle kotitaloudelle (sis. ALV, tarjous ja toimitusvelvollisuusuhintojen keskiarvo kuukauden 1. päivänä) ja sähköpörssi Nord Poolin Suomen aluehinnan kuukausikeskiarvot (ei sis. ALV).

Kuluttajat voivat hankkia sähköä myös investoimalla omaan tuotantoon tai osallistumalla energiayhteisöön. Suomen lainsäädännössä on määritelty yksi energiayhteistyötyyppi: paikallinen energiayhteisö (VnA 767/2021). Paikallinen energiayhteisö voi tuottaa, toimittaa, kuluttaa, aggregoida tai varastoida energiaa sekä tarjota energiatehokkuuspalveluja, sähköajoneuvojen latauspalveluja tai muita energiapalveluja jäsenilleen tai osakkailleen. Yhteisön jäsenet tai osakkaat voivat olla luonnollisia henkilöitä, kuntia tai muita paikallisviranomaisia taikka pieniä tai keski-suuria yrityksiä. Paikallisen energiayhteisön

jäsenten/osakkaiden sähkökäyttöpaikkojen on sijaittava samalla kiinteistöllä tai sitä vastaavalla kiinteistöryhmällä ja niiden on oltava liitetty jakeluverkkoon samalla liittymällä. Käytännössä lainsäädäntö mahdollistaa siis energiayhteisön perustamisen esimerkiksi kerrostalossa tai teollisuusalueella, mutta erillisten liittymien takana sijaitsevien omakotitalojen muodostamaa yhteisöä ei tunnusteta nykyllä lainsäädännöllä. Työ- ja elinkeinoministeriön nimittämä Energiayhteistyöryhmä on kuitenkin suositellut hajautettujen yhteisöjen toteuttamisen selvittämistä (TEM 2023).

KUVA: ISTOCKPHOTO | PETMAL

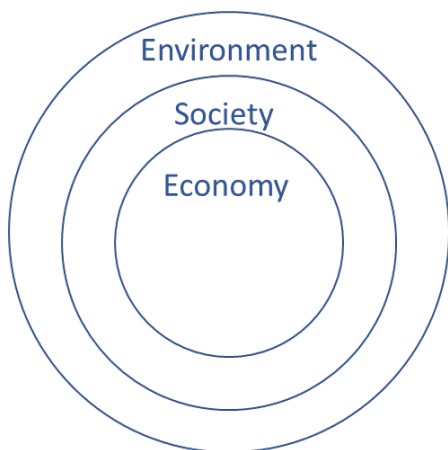




# 5. ENERGIAJÄRJESTELMIEN KESTÄVYYS

Energiavarmuuden ja energian kohtuuhintaisuuden lisäksi energiajärjestelmien kolmas pilarini on energian kestävyys, joka ohjaa kestäväää energiamurrosta Suomessa. Energiaturros, josta usein käytetään myös nimitystä energiatransitio, on käynnissä oleva energiajärjestelmien yhteiskunnallinen muutos. Sillä pyritään vähentämään hiilidioksidi- ja muita kasvihuonekaasupäästöjä sekä energiantuotannon ja -kulutuksen ympäristövaikutuksia sekä lisäämään energiajärjestelmien sosiaalista ja taloudellista oikeudenmukaisuutta. Energiaturros on pitkän aikavälin sosio-tekniinen muutos, johon osallistuvat kaikki yhteiskunnan eri toimijat ja sektorit, kuten politiikka ja sääntely, teollisuus ja yhteiskunnalliset järjestöt, yritykset, kunnat ja kansalaiset.

Energiajärjestelmien kestävyden lähtökohdina ovat planetaariset rajat (Rockström ym. 2023), jotka on otettava huomioon kaikessa päätöksenteossa. Vahvan kestävyden viitekehys viittaa siihen, että sekä ekologiset että ihmiselliset järjestelmät ovat luonnostaan sidoksissa toisiinsa ja että ekologiset järjestelmät muodostavat edellytyksen kaikelle ihmisen toiminnalle (Rockström ym. 2023; Neumayer 2003; Giddings ym. 2002).



Kuva 9. Vahvan kestävyden viitekehys, jonka lähtökohdina ovat planetaariset rajat. (Neumayer 2003; Giddings ym. 2002).

Kehittyneimmät maat käyttävät noin 75 prosenttia maailman kaikista materiaaliressursseista, mikä tarkoittaa, etteivät yhden planeetan resurssit riittäisi, jos kaikki maat kuluttaisivat saman verran (OECD 2021). Esimerkiksi keskivertosuomalaisen käyttämä yhteenlaskettu materiaalmäärä on yli satatuhatta kiloa vuodessa, mikä on enemmän kuin muissa Euroopan maissa keskimäärin, ja siitä suurin osa on tuonnin piileviä materiaaliavirtoja (Suomen ympäristökeskus 2023, Tilastokeskus 2023a). Näin ollen tarvittaisiin neljä planeettaa, jos kaikki kuluttaisivat saman verran kuin suomalaiset.

Keskivertosuomalaisen hiilijalanjälki on kuitenkin pienentynyt kaksi tonnia vuodesta 2005 vuoteen 2021, ollen 10 tonnia kasvihuonekaasupäästöjä vuodessa. Suurimman osan hiilijalanjäljestä muodostaa globaalisti organisoitu energiantuotantajärjestelmä, jossa 80 prosenttia energiasta tuotetaan edelleen fossiililla energialähteillä (IEA 2023a). Samaan aikaan yli 775 miljoonalla ihmisellä ei ole mahdollisuutta saada energiaa (IEA 2022a). Nykyisten energiajärjestelmien muuttaminen vähähiiliseksi tuotanto- ja kulutusjärjestelmiksi on valtava haaste. Siihen sisältyy resurssien ja materiaalien käytön vaikutusten analysointi, ympäristöllinen, yhteiskunnallinen ja taloudellinen oikeudenmukaisuus, terveys ja hyvinvointi, ilmastonmuutoksen hillitseminen sekä luonnon monimuotoisuuden lisääminen ja säilyttäminen.

Tässä luvussa 6 keskitytään kestävien energiajärjestelmien ajureihin, mahdollisuuksiin, ja vaikutuksiin, sekä uusiin kestävyyskysymyksiin ja riskeihin, jotka nousevat esiin vähähiilisten energiajärjestelmien myötä.

## 5.1 Kestävyystavoitteet ja päämäärät Suomessa

Suomen kansallisessa ilmasto- ja energi-strategiassa luetellaan toimenpiteet EU:n ilmastositoumusten saavuttamiseksi vuoteen 2030 mennessä sekä esitellään täytäntöönpanostrategia, jolla tavoitteet saavutetaan. Stra-

tegiassa Suomi on sitoutunut vähentämään kasvihuonekaasupäästöjä 60 prosenttia vuoteen 2030 mennessä ja 80 prosenttia vuoteen 2040 mennessä ilmastolain mukaisesti sekä hiilineutraaliuteen vuoteen 2035 mennessä (TEM 2022).

Näiden tavoitteiden saavuttamiseksi strategiassa korostetaan muun muassa muuhun kuin polttoon perustuvan lämmityksen edistämistä, energiajärjestelmän sähköistämistä ja järjestelmäintegraation käyttöä aloilla, joilla on haastavaa vähentää hiilidioksidipäästöjä. Strategiassa sisältyy myös kansallinen vetystrategia (TEM/2023/14), jolla pyritään lisäämään erilaisia sähköpolttoaineita ja määrällisiä tavoitteita vetyelektrolyysikapasiteetille. Suomen arvioidaan ylittävän uusiutuvan energian määrän tavoitteet vuoteen 2030 mennessä, mutta jäävän EU:n Fit-for-55-paketissa asetetusta energiankulutuksen enimmäisrajasta (TEM 2022).

Suomen energiajärjestelmän hiilidioksidipäästöt vähenevät, ja tavoitteiden saavuttamiseksi Suomella on useita seurattavia murrospolkuja (Energiaselonteko 2022). Suomen energiajärjestelmän etuja ovat olleet useita energialähteitä sisältävän järjestelmän monipuolisuus, uusiutuvan energian suuri ja pääasiassa bioenergiaan perustuva osuus ja luotettava infrastruktuuri. Suomi pyrkii hiilineutraaliuteen

ydinvoiman ja uusiutuvan energian, energiatehokkuuden ja sähköistämisen avulla sekä keskittyä päästöjen vähentämiseen liikenteessä ja valmistavassa teollisuudessa. Noin kolmannes Suomen sähköstä tuotetaan vähähiilisellä ydinvoimalla, jolla odotetaan olevan vahva asema Suomessa tulevaisuudessakin. Suomi on myös sitoutunut parantamaan energiatehokkuutta, jolla on ratkaiseva merkitys energiankulutuksen ja päästöjen vähentämisessä erityisesti liikenteessä ja eri teollisuuden aloilla.

Biomassalla, puupohjaisilla polttoaineilla ja biojätteellä on aina ollut tärkeä rooli Suomen energiavalikoimassa, mutta erityisesti nyt, kun turpeelle ja fossiiliselle energialle etsitään korvaajaa. Bioenergiaa käytetään pääasiassa lämmön ja sähkön tuotantoon. Puuenergian hyväksyttävyyttä lisäävät sen taloudellinen merkitys ja metsänomistuksen laaja jakautuminen, mutta kestävyysongelmat, kuten maankäytön muutokset ja niihin liittyvät biologisen monimuotoisuuden heikkeneminen, metsien hiilivarastot sekä käytön vaikutus vesistöjen tilaan, ovat edelleen akuutteja haasteita. Bioenergian käytöstä aiheutuvat muutokset metsäekosysteemeissä koskettavat suurta lajijoukkoa, sillä valtaosa Suomen lajeista on metsälajeja ja tämän takia myös uhanalaisista lajeista suurin osa (31 %) elää metsissä (Hyvärinen ym. 2019). Vastikään uudistettu luonnon-



suojelulaki (9/2023) määrittelee ensimmäistä kertaa ekologisen kompensaation kriteerit luonnonarvoja heikentävälle toiminnalle (Soimakallio ja Pihlainen 2023). Kompensaatio on toistaiseksi vapaaehtoista, mutta yhä useammat toimijat haluavat hyvittää suurten hankkeiden aiheuttamia luontohaittoja osana kestävyystyötään. Energiaselonteon kirjoittamisen aikaan vielä keskeneräinen EU:n ennallistamisasetus muodostaisi tärkeän kokonaisuuden Euroopan Green Deal -ohjelmassa, jonka tavoite on määritellä ja sovittaa yhteen EU:n ja sen jäsenvaltioiden sitoumukset ilmastonmuutoksen ja luontokadon ratkaisemiseksi.

Metsäsektorin kestävyyttä, sen luonto- ja vesistövaikutuksia sekä maaperän hiilensitomispotentiaalia voidaan parantaa muun muassa uudistamalla metsänhoitokäytäntöjä. Esimerkiksi lisääntynyt tutkimustieto maaperän hiilensitomispotentiaalista (Mäkipää ym. 2023) auttaa kehittämään monipuolisempia päätöksentekoa tukevia malleja, joihin liitetään tietoa esimerkiksi metsänhoidon vaikutuksista maaperän hiilinieluihin puustotiedon lisäksi. Tämä auttaa tehostamaan ilmastopolitiikkaa ja optimoimaan resurssien käyttöä, sillä bioenergian käyttö on olennainen osa useita teollisuudenaloja Suomessa myös tulevaisuudessa, ja niiden osuus teollisuuden energiankulutuksesta on huomattava.

Suomen hiilineutraaliustavoitteiden saavuttamiseksi tuuli- ja aurinkoenergian tuotanto laajenee, ja sen odotetaan kasvavan merkittävästi tulevaisuudessa. Koska uusiutuva energia vaatii suurempia maa-alueita, maankäytön muutokset tulevat kasvamaan. Tällä hetkellä tuuli- ja aurinkovoiman säätelyssä, kaavoituksessa ja rakentamisen lupaprosesseissa on eroja, johon muun muassa ympäristöministeriön käynnissä oleva hanke etsii ratkaisuja (hankenumero YM014:00/2023). Lisäksi merituulivoima laajenee nopeasti. Demonstraatiohankkeisiin odotetaan kuitenkin huomattavaa investointitukea, ja rannikon merituulivoiman kehittämiseksi tarvitaan vielä selkeää ja yhdenmukaista lainsäädäntöä. Uusiutuvan energian kasvu synnyttää uusia ympäristö- ja yhteiskunnallisia vaikutuksia, joihin on tarve löytää ratkaisuja kestävästi toteuttamiseksi.

## 5.2 Suomen mahdollisuudet ja riskit energiamurroksessa

Hyvin toteutettu energiamurros voi tarjota Suomelle monenlaisia mahdollisuuksia. Lähestymme näitä mahdollisuuksia kädenjälkijattelulla, jolla tarkoitetaan kestävästä ratkaisusta syntyviä positiivisia ja laajempia ympäristö- ja yhteiskunnallisia vaikutuksia. Esimerkiksi organisaatiot voivat pienentää asiakkaidensa jalanjälkeä tarjo-



amalla tuotteita tai palveluja sekä viestiä näistä positiivista vaikutuksista (Pajula ym. 2021).

Energiamurrokseen liittyy myös uusia ympäristöön, yhteiskuntaan ja talouteen kohdistuvia negatiivisia vaikutuksia, jotka ovat tärkeää tunnistaa, jotta haitallisia vaikutuksia voidaan vähentää ja myönteisiä vaikutuksia vahvistaa. Energiamurrokseen liittyviä uusia riskejä jaotellaan tässä selonteossa neljään kategoriaan: 1) sääntelyyn ja politiikkaan liittyvät riskit, jotka saattavat hidastaa energiamurrosta, 2) yhteiskunnallisiin vaikutuksiin liittyvät riskit, jotka voivat lisätä muun muassa eriarvoisuutta, 3) uusiin uusiutuvaan energiaan liittyviin ympäristöriskeihin, jotka nousevat pääosin maankäytön muutoksista 4) uusiin teknologisiin ratkaisuihin liittyvät teknologiset ja taloudelliset riskit.

#### ***Kädenjälkijattelu tuottaa myönteisiä ympäristö- ja yhteiskunnallisia vaikutuksia***

Suomen energijärjestelmien kädenjälkivaikutuksiin kuuluvat kestävä teknologian kehittäminen, kestävien tuotteiden ja polttoaineiden tuotanto, energiatehokkaat ja älykkäät ratkaisut sekä korkea koulutustaso. Suomi on älykkäiden energiaratkaisujen ja älykkään teknologian kehittäjämaa, sekä yksi maailman edistyneimmistä älykkäiden sähköverkkojen markkinoista. Tämän lisäksi Suomen kunnianhimoisen tavoite on edistää kiertotalousmarkkinoita, mikä kannustaisi investointeihin ja uusien ratkaisujen luomiseen globaalisti.

Suomen energiamurroksen myönteiset ympäristö- ja yhteiskunnalliset vaikutukset keskittyvät hiilidioksidipäästöjen vähentämiseen ja sähköistämiseen, vihreiden tuotteiden ja vähähiilisten energiatuotteiden viennin lisäämiseen, riippuvuuden vähentämiseen tuontienergiasta, ilmanlaadun parantamiseen sekä energiasektorin ilmastonmuutosvaikutusten vähentämiseen. Sähköistämisestä on tullut merkittävä suuntaus koko maassa ja erityisesti liikenteessä ja teollisuudessa, mikä on puolestaan vauhdittanut esimerkiksi lämpöpumpputekniikoiden, sähköisten latausasemien ja -toimintojen sekä vety- ja muiden sähköisten polttoaineratkaisujen kehittämistä.

Suomen mahdollisuuksille tuottaa edullista ja puhdasta sähköä on asetettu suuria odotuksia, minkä toivotaan lisäävän fossiilipohjaisia



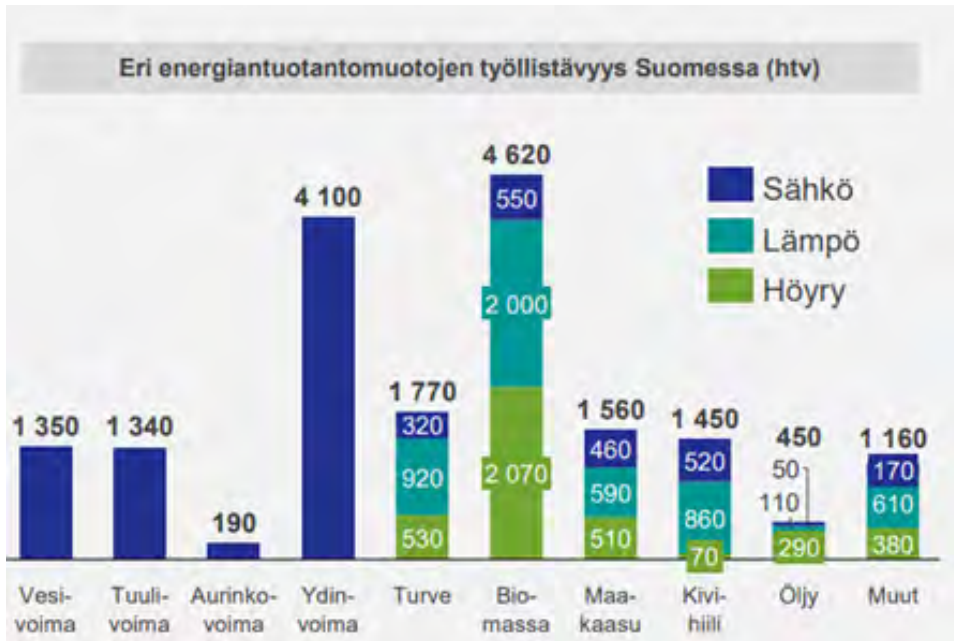
tuotteita korvaavien tuotteiden, kuten erilaisia power-to-x-ratkaisujen kehittämistä (P2X, ks. myös kohta 7.2.3) tai puhtaan energian vientiä. Kasvihuonekaasupäästöjen radikaali, jopa 90 prosentin vähentäminen on mahdollista, mutta se vaatii hiilipohjaisten tuotteiden, kuten polttoaineiden, kemikaalien ja teräksen korvaamista uusiutuvaan energiaan perustuvilla P2X-tuotteilla (Guzmán ym. 2021; Isaacs ym. 2021; Razon ym. 2021; Zhang ym. 2017). Viemällä ja korvaamalla päästöintensiivisempiä tuotteita globaaleilla markkinoilla voidaan saada aikaan laajempia kädenjälkivaikutuksia ja suurempia päästösäästöjä kuin keskittymällä pelkästään Suomen energijärjestelmän hiilestä irrottamiseen. Esimerkiksi Suomen vetyklusteri on koonnut yhteen kaikki suunnitellut P2X-hankkeet, mukaan lukien vihreän teräksen, synteettisen ammoniakkin ja synteettisen metanolin tuotannon (H2-klusterihankkeet, ks. myös kohta 7.2.1).

Power-to-x- (P2X)-tuotteiden onnistunut toteuttaminen edellyttää mittavia investointeja ja uusiutuvan energian kapasiteetin lisäämistä. Suomessa on jo suhteellisen suuri määrä bioeenisiä CO<sub>2</sub> lähteitä, kuten sellutehtaita, joiden tuottamat hiilidioksidipäästöt voidaan ottaa talteen ja hyödyntää erilaisten P2X-tuotteiden tuotannossa (Kujanpää ym. 2023). Suunnitteilla on myös suuria uusia teollisen mittakaavan aurinko- ja tuulivoimalaitoksia (Tuulivoimayhdistys 2023a; Aurinkoenergiayhdistys 2023). Näiden hankkeiden toteutuessa ainakin osa suunnitelluista power-to-x-hankkeista toteutuu. Eri alojen toimijat pitävät erilaisten P2X-ratkaisujen potentiaalia Suomessa erittäin lupaavana (Sillman ym. 2023a). Kaikki edellä mainitut hankkeet vaativat kuitenkin laajaa ympäristö- ja yhteiskunnallisten vaikutusten arviointia.

Energiamurros tuo mukanaan useita myönteisiä yhteiskunnallisia hyötyjä, joita mitataan useim-

miten bruttokansantuotteen avulla ja arvioimalla uusien työpaikkojen määrää. Kansainvälinen uusiutuvan energian järjestö IRENA arvioi, että uusiutuva energia (aurinko-, tuuli-, vesi- ja biopolttoaineet) työllistää maailmanlaajuisesti 12,7 miljoonaa ihmistä. Työpaikoista noin 60 prosenttia on Aasiassa (Kiinan osuus 42 %), 10 prosenttia Euroopassa, 10 prosenttia Brasiliassa,

7 prosenttia Yhdysvalloissa ja 7 prosenttia Intiassa (IRENA 2022). Vertailun vuoksi IEA arvioi, että vuonna 2019 fossiiliset energiateollisuuden alat työllistivät 32 miljoonaa ihmistä (IEA 2022b). Suomessa energiateollisuus työllisti noin 40 000 henkilöä (henkilötyökuukausina), joista suoraan 23 000 henkilöä ja välillisesti 19 000 henkilöä (ks. kuva 10.).



Kuva 10. Suoran työllisyyden jakautuminen energiantuotantomuotojen mukaan vuonna 2019. [Energiateollisuus 2021].

Uusiutuvan energian toimialalla luotujen työpaikkojen lisäksi puhtaan energian kasvu voi luoda myönteisiä taloudellisia heijastusvaikutuksia koko arvoketjussa, joista hyötyvät paikalliset yritykset, kunnat kiinteistö- ja tuloverojen kautta sekä kotitaloudet ja erityisesti maanomistajat vuokratulojen kautta. Esimerkiksi Suomessa tuulivoimayhtiöt maksavat maanomistajille vuokraa ja kunnille maaveroa, joka riippuu maan arvosta, tuulivoimalan rakennusten koosta ja sähköntuotannosta. Jos voimalan kapasiteetti on alle 10 MW, vero vaihtelee 0,93–1,80 prosentin välillä maan arvosta laskettuna. Jos voimalan kapasiteetti on suurempi kuin 10 MW, voimalaitos maksaa erityistä voimalaitosveroa, joka voi olla jopa 3,1 prosenttia.

### **Kestävään energiamurrokseen liittyvät uudet riskit ja miten niihin voidaan vaikuttaa**

Energiamurros tuottaa monia myönteisiä yhteiskunnallisia hyötyjä, mutta se luo myös uusia riskejä ja vaikutuksia yhteiskuntaan, ympäristöön ja talouteen. Niitä on analysoitava ja tutkittava, jotta haitallisia vaikutuksia voidaan lieventää tai kompensoida ja myönteisiä vaikutuksia vahvistaa. On tärkeää huomata, että nämä ovat riskejä, jotka on tunnistettu aiemmissa tutkimuksissa, mutta jotka eivät ole vielä Suomen osalta toteutuneet ja voivat jäädä toteutumatta, jos niihin voidaan vaikuttaa tarpeeksi ajoissa. Taulukossa 2 on lyhyt katsaus ja kuvaus energiamurrokseen liittyvistä riskeistä, joita käsitellään tarkemmin tässä osiossa.

### **Sääntelyyn ja politiikkaan liittyvät riskit**

Uusien ja vanhojen säännösten, direktiivien ja lakien epäjohtonmukaisuus ja ristiriitaisuus muodostavat suurimmat sääntelyriskit. Lisäksi energiamurroksen nopeuttamiseksi tehtäviin päätöksiin voi sisältyä haitallisia yhteiskunnallisia vaikutuksia eri ryhmiä kohtaan, mikä voi esimerkiksi johtaa työpaikkojen menetykseen, joten poliittisen päätöksenteon lykkääminen on riski. Eri poliittiset ryhmittymät lobbaavat etujaan, mikä johtaa uusien direktiivien tai sääntelyn vesittämiseen.

### **Yhteiskunnalliset riskit**

Energiamurrokseen liittyviä merkittäviä yhteiskunnallisia riskejä on muun muassa se, että heikommassa asemassa olevat ryhmät eivät osallistu ja jäävät ulkopuolelle, että hyödyt, työpaikat ja haitalliset vaikutukset jakautuvat epätasaisesti yhteiskunnassa ja luottamuksen puute energiantoimijoita kohtaan vähentää energiamurroksen yhteiskunnallista hyväksyttävyyttä. Maankäytön muutokset vaikuttavat paikallisiin elinkeinoihin, kaikkien käytävissä oleviin ympäristöpalveluihin ja maiseman kulttuuriseen arvoon.

### **Ympäristöriskit**

Fossiilisen energian käytön vähentäminen laskee kaikkia haitallisia kasvihuonekaasupäästöjä, pienentää ilmastonmuutoksen vaikutuksia, lisää terveyttä ja pienentää globaalisti ympäristövaikutuksia. Energiamurroksen uudet ympäristöriskit liittyvät uusiutuvan energian tuotannon paikallisiin vaikutuksiin, kuten maankäytön ja maaperän muutoksiin, vesivaroihin, paikallisiin lajeihin ja luonnon monimuotoisuuteen. Lisäksi ympäristövaikutukset ja kaivannaisjätteen määrä, joka syntyy akkuihin ja muihin uuteen energiateknologiaan tarvittavien mineraalien louhinnasta, sekä teknologiajätteen määrä elinkaaren lopussa luovat uusia ympäristöriskejä.

### **Taloudelliset ja teknologiset riskit**

Investointiriskit, jotka liittyvät uusien hankkeiden ja ratkaisujen toteuttamatta jäämiseen, hiilidioksidiveroihin liittyvät riskit, ja maan arvon aleneminen uusien teollisuusalueiden vuoksi.

### **Yhteiskunnalliset, poliittiset ja sääntelyyn liittyvät riskit**

Tällä hetkellä monet toimijat tutkijoista päätöksentekijöihin ja yrityksistä järjestöihin ovat yksimielisiä siitä, että energiamurros sisältää suuren yhteiskunnallisen muutospotentialin, joka mahdollistaa taloudellisen kehityksen, sosiaalisen osallisuuden, energiavarmuuden, terveyden parantamisen, työpaikkojen luomisen ja muiden yhteiskunnallisten hyötyjen kasvamisen (UN 2021). Näiden hyötyjen saavuttaminen edellyttää kuitenkin eri toimijoiden, kuten pienten ja keskisuurten yritysten, kuntien ja kansalaisyhteiskunnan, aktiivista osallistumista. Energia-alojen poliittinen ja taloudellinen valta on Suomessa kuitenkin usein keskittynyt muutamille vaikutusvaltaisimmille toimijoille – usein suuryrityksille, joilla on huo-

mattava vaikutusvalta taloudellisten resurssien, lobbaustoimintamahdollisuuksiensa, markkinajohtajuuden ja/tai poliittisten yhteyksiensä ansiosta (Heiskanen ym. 2018).

Vaikka vallan keskittyminen on osittain välttämätöntä energiajärjestelmän monimutkaisuuden ja sen toiminnan koordinoimisen vuoksi, on sillä myös tahattomia negatiivisia seurauksia. Vallan keskittyminen voi rajoittaa näkökulmien moninaisuutta, jolloin marginaaliset ryhmät ja haavoittuvassa asemassa olevat ihmiset, kuten pienituloiset kotitaloudet, vammaiset tai etniset vähemmistöt, voivat jäädä päätöksentekoprosessien ulkopuolelle (kts. esimerkiksi Kosanic ym. 2022). Tällainen yhteiskunnallinen poissulkeminen saattaa johtaa siihen, että tavalliset kansalaiset joutuvat kärsimään taloudellisista, ympä-

ristöön liittyvistä tai terveydellisistä seurauksista, kun taas etuoikeutetut toimijat hyötyvät uusiutuvan energian investoinneista. Lisäksi äänen moninaisuuden rajoittaminen energiamurrosta koskevassa keskustelussa voi johtaa siihen, ettei ympäristö- ja sosiaalisia näkökohtia oteta riittävästi huomioon. Esimerkiksi tutkijoiden tai ympäristöjärjestöjen poissulkeminen voi johtaa riittämättömään tarkasteluun, joka saattaa vaarantaa kestävyyskriteereiden täyttymisen.

Vallan keskittyminen voi myös vähentää avoimuutta ja vastuullisuutta energiamurroksessa, mikä voi johtaa uusiutuvan energian hankkeiden yhteiskunnallisen hyväksyttävyyden heikkenemiseen ja sosiaalisen eriarvoisuuden lisääntymiseen (Gallop ym. 2021). Se puolestaan hidastaa hankkeiden etenemistä. Lisäksi paikallisyhteisöjen kuulemisen laiminlyöminen hankesuunnittelussa voi johtaa laajoihin julkisiin protesteihin ja vastustukseen (Ogilvie ja Rootes 2015). Näiden haasteiden ratkaisemiseksi on olennaisen tärkeää käydä laajasti osallistavaa vuoropuhelua, jossa otetaan huomioon kaikkien asianosaisten näkökulmat ja edut. Eri sidosryhmät, kuten kansalaisjärjestöt, paikallisyhteisöt, aluepoliitikot ja paikalliset yritykset, olisi otettava mukaan varhaisessa vaiheessa uusiutuviin energialähteisiin liittyvien hankkeiden suunnittelussa. Tällainen osallistava lähestymistapa lisää uusiutuvan energian hankkeiden onnistunutta läpivientiä sekä lisää yhteiskunnallista hyväksyttävyyttä ja luottamusta. Osallistuviin lähestymistapoihin liittyy myös haasteita, jotka liittyvät osallistujien erilaiseen kiinnostukseen, tietotasoihin, tiedonsaantiin ja resurssien erilaisuuteen (Lukkariinen ym. 2023). Näitä ongelmia voidaan hallita harkitulla suunnittelulla ja avoimilla viestintäkanavilla, joilla varmistetaan, että kaikki osallistujat voivat tuoda esiin huolenaiheensa ja saada valtaa päätöksentekoprosessissa.

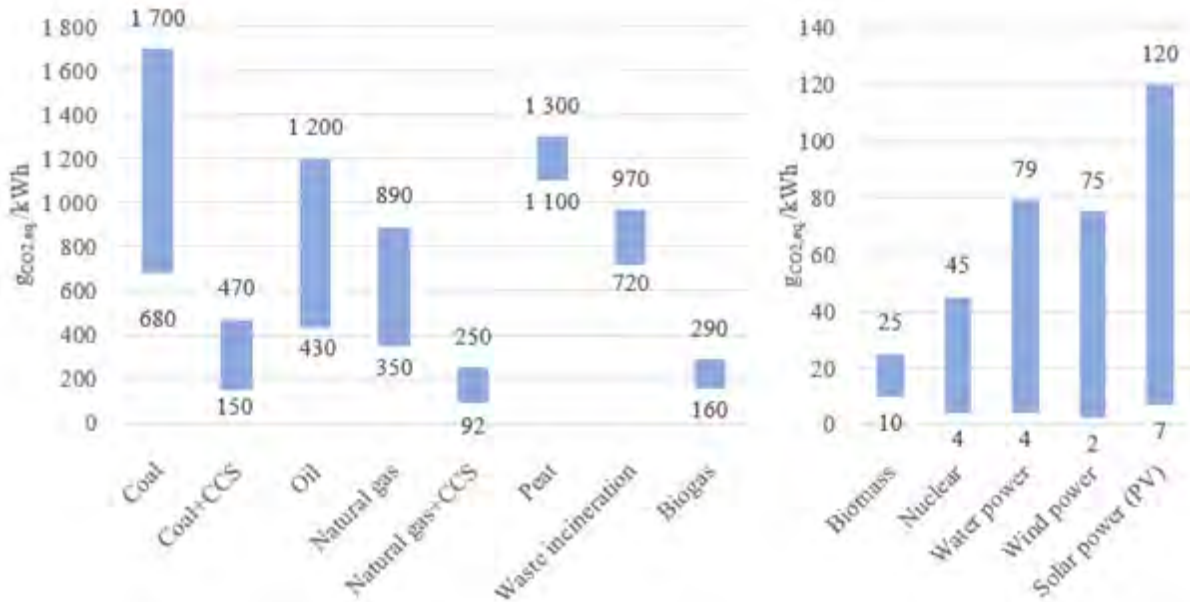
### **Ympäristöriskit**

Energiantuotannon ympäristövaikutuksia aiheuttavat prosessit voidaan ryhmitellä kolmeen elinkaaren vaiheeseen; 1) energiainfrastruktuuriin (louhinta, valmistus ja rakentaminen) ja polttoainekiertoon (louhinta, tuotanto, jalostus ja toimitus) liittyviin tuotantoketjun alkupään prosesseihin, 2) käytön aikaisiin vaikutuksiin (poltto, huolto ja muut toiminnot) ja 3) tuotantoketjun loppupään prosesseihin (purkaminen, käytöstä poistaminen ja kierrätys).

Energiantuotannon yleisimmät ympäristövaikutukset ovat kasvihuonekaasupäästöt. Kuvaan 11 on koottu tietoja eri polttoaineilla ja tekniikoilla tuotetun sähkön kasvihuonekaasupäästöjen vaihteluväleistä. Fossiilisilla polttoaineilla tuotetun sähkön kasvihuonekaasupäästöt liittyvät enimmäkseen käytönaikaisiin poltto päästöihin, kun taas uusiutuvan sähköntuotannon, kuten tuuli- ja aurinkovoiman, suurimmat ympäristövaikutukset syntyvät rakentamisen aikana (NREL 2021). Tämä tarkoittaa sitä, että kun uusiutuvan energian tuotanto kasvaa, rakentamisen päästöt kasvavat mutta tuotetun sähkön päästöt vähenevät. Lisäksi, jos tuulivoimaloiden kapasiteettikerroin ja odotettu käyttöikä kasvavat (Tuulivoimayhdistys 2020), elinkaaren aikaiset päästöt voivat pienentyä entisestään. Tuulivoimaloiden lapojen kierrätystä on pyritty tehostamaan (Tuulivoimayhdistys 2021). Jätteiden ja biokaasun sähköntuotannon osalta kuvassa 11 on huomioitava, että mukaan on otettu vain suorat vaikutukset, eikä esimerkiksi kaatopaikkasijoituksen välttämisen säästäviä päästöjä ole huomioitu.

Ilmastovaikutusten lisäksi energiantuotanto kuluttaa vesivarastoja. Suomea kuivemmilla tai kuumemmilla alueilla energiantuotantoa joudutaan joskus säännöstelemään liian kuumien tai vähäisten vesivarastojen vuoksi, kuten esimerkiksi Ranskassa kesällä 2022. Fossiiliset polttoaineet, mutta myös jotkin uusiutuvat luonnonvarat, kuten biomassa, kuluttavat runsaasti vettä jäähdytyksessä ja polttoaineen tuotannossa. Tuulivoimalla on pienempi vesijalanjälki kuin aurinkoenergialla, sillä aurinkopaneelien valmistukseen kuluu raaka-ainehankinnan vuoksi paljon enemmän vettä kuin tuulivoimaloiden valmistukseen (Mekonne ym. 2015). Näin ollen aurinkopaneelien tuonnilla vesipulasta kärsiviltä alueilta voi olla vakavia kielteisiä paikallisia vaikutuksia.





Kuva 11. Kooste sähköntuotannon kasvihuonekaasupäästökertoimista (CCS = hiilidioksidin talteenotto ja varastointi). (Arvesen ja Hertwich 2012; Asdrubali ym. 2015; Bruckner ym. 2014; Ecoinvent 2019; Hertwich ym. 2015; Spath ym. 1999; Sphera 2021; UNECE 2021; Van Der Giesen ym. 2017; Whitaker ym. 2012; Ovaskainen 2017).

Vaikka vähähiilisiin energiajärjestelmiin siirtymisellä on selviä ympäristöhyötyjä, kuten pienemmät elinkaaren aikaiset kasvihuonekaasupäästöt, liittyy niihin negatiivisia paikallisia vaikutuksia. Melu, lintukuolemat ja vaikutukset maankäytön muutoksiin ovat jo hyvin tunnettuja tuuli- ja aurinkovoimaloihin liittyviä ongelmia, vaikka monet näistä vaikutuksista ovatkin suhteellisen pieniä muuhun ihmisen toimintaan tai muihin energiantuotantotyyppeihin verrattuina (Dhar ym. 2020; Sayed ym. 2020; Tawalbeh ym. 2021). Ratkaisujen löytyminen näihin haasteisiin on kuitenkin yhä tärkeämpää, sillä tuuli- ja aurinkoenergiaan odotetaan suuria lisäinvestointeja lähitulevaisuudessa. Kapasiteetin kasvassa maankäytön muutokset ja luontovaikutusten kumulatiiviset vaikutukset lisääntyvät.

Sekä tuuli- että aurinkovoiman luontovaikutuksia on tutkittu eniten lentävien eläinten, lintujen ja lepakoiden osalta (Dohm ja Drake 2019; Hein ja Hale 2019). Vuosittaisten lintu- ja lepakko-kuolemien arvioidaan vaihtelevan 8–118 ja 12–53 välillä turbiinia kohti Espanjassa ja Yhdysvalloissa (Sánchez-Navarro ym. 2023; Wang ja Wang 2015; Wilson ym. 2022). Vertailtaessa eri kuolinsyitä on todettu, että perinteisen sähköntuotannon aiheuttamien lintukuolemien määrä on suurempi kuin tuulivoiman (Sovacool 2023).

Kuolemantapausten määrään liittyy kuitenkin suuria epävarmuustekijöitä, koska määrät ovat hyvin paikkakohtaisia. Esimerkiksi Suomessa

ympäristöministeriön vuonna 2016 tekemän selvityksen mukaan tuulivoimalaitosten vaikutus lintukantaan on verrattain vähäinen (0–50 lintua turbiinia kohden) – etenkin, jos tuulivoimalaitosten sijainnit suunnitellaan huolellisesti. Toisaalta suurilla, hitaasti lisääntyvillä lintulajeilla, kuten maakotkilla, jo pieni lisäkuolleisuus saattaa olla kohtalokas (Tikkanen 2022). Tiedetään kuitenkin, että jotkut lintulajit oppivat lopulta välttämään tuulivoimaloiden lapoja. Lintukuolemia voidaan vähentää merkittävästi esimerkiksi lapojen maalaamisella, mikä tekee niistä linnuille näkyvämpiä, voimaloiden tarkempien sijaintipaikkojen löytämisellä, jolloin voimalat ovat vähemmän haitallisia lentäville eläimille, sekä lapojen liikkeiden rajoittamisella lintujen muuttoaikoina.

Yksi tuulivoimalaitosten ympäristövaikutuksista on metsäalueiden pirstoutuminen, joka voi estää eläinten liikkumista, kaventaa yhtenäisiä elinympäristöjä, muuttaa mikroilmastoa, tuottaa häiritsevää valoa ja melua sekä edesauttaa haitallisten vieraslajien leviämistä (Tsoutsos ym. 2005; Hernandez ym. 2014; Walston ym. 2016; Grodsky ym. 2017; Gasparatos ym. 2017). Monet eläinlajit, mukaan lukien linnut ja lepakot, välttelevät tuuli- ja aurinkovoima-alueita jopa kilometrien päähän (Lloyd ym. 2022; Marques ym. 2019; Łopucki ym. 2017; Skarin ym. 2017; Heinänen ym. 2020). Elinympäristöjen pirstoutuminen muodostaa lisäuhan luonnon monimuotoisuudelle (Hanski 2015).



Kaikkein haitallisimpia muutoksia voidaan ennaltaehkäistä välttämällä rakentamista alueille, jotka ovat luonnontilaisia tai lähes luonnontilaisia sekä alueille, joiden tiedetään olevan ekologisesti tärkeitä. Tällaisia alueita ovat esimerkiksi lisääntymis-, talvehtimis- ja ruokailualueet sekä lintujen ja nisäkkäiden muuttoreitit. Melusaasteeseen voidaan puuttua sääntelyohjeilla, joissa on turvallisuusrajat jäännösalueille, mutta myös teknologinen kehitys voi helpottaa melusaastetta (Dai ym. 2015; Wang ja Wang 2015). Lisäksi on osoitettu, että laajamittaiset tuulipuistot voivat muuttaa paikallisia pintalämpötiloja ja hydrologiaa, koska tuulivoimalat aiheuttavat turbulenssia. Tämä voi aiheuttaa muutoksia paikalliseen säähän ja vaikuttaa paikalliseen biosfääriin. Mikroilmastoon kohdistuvien vaikutusten merkittävyyden ymmärtäminen vaatii kuitenkin lisätutkimuksia (Nazir ym. 2019).

Maankäytön muutosten vaikutukset ovat ajankohtaisia, koska maankäyttöön kohdis-

tuu monia ristiriitaisia tarpeita. Suomessa on esimerkiksi tarve lisätä luonnon monimuotoisuutta ja hiilinieluja. Niinpä aurinkovoimaloita ja tuulipuistoja suunniteltaessa nämä näkökohdat tulisi ottaa huomioon. Asianmukainen sääntely ja suunnittelu voivat jopa lisätä paikallista luonnon monimuotoisuutta (Walston ym. 2023). Näihin kysymyksiin vastaamiseksi tarvitaan lisää tutkimusta, sillä monet luonnon monimuotoisuuteen tai hiilinieluihin liittyvät tavoitteet ja säädökset ovat vielä suhteellisen uusia. Kun ajatellaan säästettyjä elinkaaren aikaisia kasvihuonekaasupäästöjä, joita fossiilisen sähköntuotannon korvaaminen aurinko- tai tuulivoimalla tuottaa, ovat saavutetut hyödyt moninkertaiset verrattuna siihen, että fossiilisten polttoaineiden käyttöä jatkettaisiin, vaikka metsää joudutaankin kaatamaan tarvittavan infrastruktuurin rakentamiseksi. Boreaalisten metsien vuotuinen hiilinielu on noin 3,7 tCO<sub>2</sub>-ekv hehtaaria kohti, kun taas tuulipuiston edellyttämä suora maankäyttö on arviolta noin 0–0,6 hehtaaria/MW ja aurin-



kopaneelien noin 0,001 hehtaaria/MW. Uusi tuulivoimala (4,2 MW) tuottaa Suomessa noin 19 000 MWh sähköä vuodessa (Ioannidis ja Koutsoyianni 2020; Tuulivoimayhdistys 2023).

Vaikka uusiutuvan energian hyödyt ylittävät negatiiviset ympäristövaikutukset, on erittäin tärkeää tarkastella, miten hyödyt ja ympäristö- ja luontovaikutukset jakautuvat, kun uusiutuvien energialähteiden osuus Suomen energiasjärjestelmässä kasvaa entisestään. Huolellinen suunnittelu, jossa otetaan huomioon paikallinen topografia ja luonto, kun sopivia paikkoja tuulivoima- tai aurinkovoimalle valitaan, auttaa minimoimaan useimmat kielteiset vaikutukset.

#### *Taloudelliset ja teknologiset riskit*

Useisiin uusiin teknologioihin liittyy mahdollisia taloudellisia ja teknologisia riskejä. Useimmat P2X-ratkaisut ovat edelleen uusia teknologioita, jotka vaativat tutkimus- ja kehitystyötä, ja niiden taloudellinen toteutettavuus on vielä epävarmaa. Esimerkiksi IPCC (2022) nosti esiin P2X-teknologioiden potentiaalın korvata fossiilipohjaisia tuotteita hiilipohjaisilla tuotteilla, mutta niiden päästövähennysvaikutukset riippuvat siitä, onko P2X-tuotteiden valmistuksessa käytetty hiilidioksidi peräisin biogeenisistä vai fossiilisista lähteistä, tuotetaan P2X-ratkaisut uusiutuville energialähteillä ja vähentävätkö sovellukset fossiilisten polttoaineiden kulutusta. Raportissa todetaan myös, että P2X-tuotteiden päästövähennyspotentiaalia on tutkittava lisää (IPCC 2022).

Päästövähennysten lisäksi monien P2X-ratkaisujen käyttöönotto edellyttää kannattavuuden parantamista. Muut energiamurrokseen liittyvät taloudelliset riskit liittyvät maankäytön muutoksiin ja uusiutuvan energian teollisuusalueiden läheisyydessä sijaitsevien maa-alueiden arvon mahdollisiin laskuihin. Tästä tarvitaan kuitenkin vielä lisätutkimusta. Kokonaisuudessa suurin taloudellinen riski aiheutuu fossiilisten polttoaineiden käytön jatkamisesta, sillä jos ilmaston lämpenemistä ei saada pidettyä siedettävissä rajoissa, on sillä globaalisti vakavia seurauksia. Lisäksi fossiilisten polttoaineiden käyttöön liittyvä sääntely kiristyy, mikä nostaa sen käytön kustannuksia esimerkiksi kasvihuonekaasupäästöjen hinnan noustessa päästökauppajärjestelmässä ja otettaessa käyttöön EU:n uusi hiilirajamekanismi (CBAM), mikä tuo

maahantuojille merkittäviä muutoksia ja pyrkii ehkäisemään hiilivuotoa eli päästöjen ohjautumista EU:n ulkopuolelle.

### **5.3 Kansalaisten ja yhteisöjen kasvava rooli**

Euroopan Green Deal-sopimuksissa korostetaan ihmisten keskeistä asemaa pyrittäessä saavuttamaan ilmastoneutraalius vuoteen 2050 mennessä ja varmistamaan oikeudenmukainen energiamurros (EC 2020). Energiamurroksen vaikutuksesta energiasjärjestelmät myös hajautuvat ja pienempiä energiantuotantoyksiköitä rakennetaan, minkä seurauksena energiademokratia eli kansalaisten osallistuminen energiapolitiikkaan lisääntyy. Tämä on merkittävä muutos, jonka myötä kansalaisten ja yhteisöjen odotetaan ottavan erilaisia uusia rooleja ja vastuuta.

Kansalaisten odotetaan osallistuvan energiamurrokseen monin eri tavoin, esimerkiksi sijoittajina, innovoijina, ylijäämäenergian varastojina, paikallisten energia-aloitteiden osallistujina tai ilmastoliikkeiden tukijoina. Ilmastoneutraaliuden saavuttaminen kohtuullisen nopeassa aikataulussa vaatii kaikkien yhteiskunnallisten toimijoiden panosta – sekä perinteisten energia-alan toimijoiden että kotitalouksien kaltaisten, aiemmin passiivisempien toimijoiden aktiivista osallistumista. Esimerkiksi kotitalouksien osuus Euroopan unionin energian loppukulutuksesta on 27 prosenttia (Eurostat 2022), mikä tekee kotitalouksista merkittävän energiatoimijan. Tämän takia voidaan myös puhua energiakansalaisuudesta, jossa kansalaiset nähdään yhä useammin energiamarkkinoiden aktiivisina toimijoina eikä enää pelkästään passiivisina kuluttajina, joiden tehtävänä on pelkästään maksaa energialasku ajallaan (Jimenez Iturriza ym. 2019). Yhteisöllinen energiantuotanto yleistyy, jossa niin sanotut energiaprosumerit eli energian kuluttaja-tuottajat voivat yhdessä tuottaa, varastoida, siirtää ja kaupata energiaa (Walker ja Devine-Wright 2008). Tällaisten aloitteiden tavoitteena on hyödyttää yhteisöjä taloudellisesti, sosiaalisesti ja ympäristöllisesti sekä luoda demokraattisempia ja avoimempia energiasjärjestelmiä (IRENA 2020; Wittmayer ym. 2020).

Energia-yhteisöjä on monenlaisia, ja esimerkiksi Euroopan puhtaan energian paketissa (EC 2019a) määritellään kahdenlaisia energia-yhteisöjä. Suomessa energia-yhteisöjä muodostetaan eniten jo

olemassa olevissa yhteisöissä, kuten taloyhtiöissä. Suomessa on yli 900 000 asunto-osakeyhtiötä, joten asuntosektorin paikallisen energiantuotannon ja -kulutuksen (ks. lisää kohdassa 7.2.5) potentiaali on suuri. Toisenlaiset yhteisölliset energiahankkeet Suomessa ovat kuitenkin suhteellisen harvinaisia verrattuna esimerkiksi Tanskaan, jossa osa tuulivoimaloista on ollut erilaisten yhteenliittymien, yhdistysten ja yhteisöjen omistuksessa. Yhteisölliset energia-aloitteet mahdollistavat energian, tulojen ja muiden hyötyjen jakautumisen sosiaalisesti oikeudenmukaisemmalta tavalla. Niiden odotetaan myös demokratisoivan energijärjestelmiä, tekevän niistä joustavampia ja varautuneempia muutoksiin sekä vähentävän energijärjestelmässä vallitsevia valtaeroja.

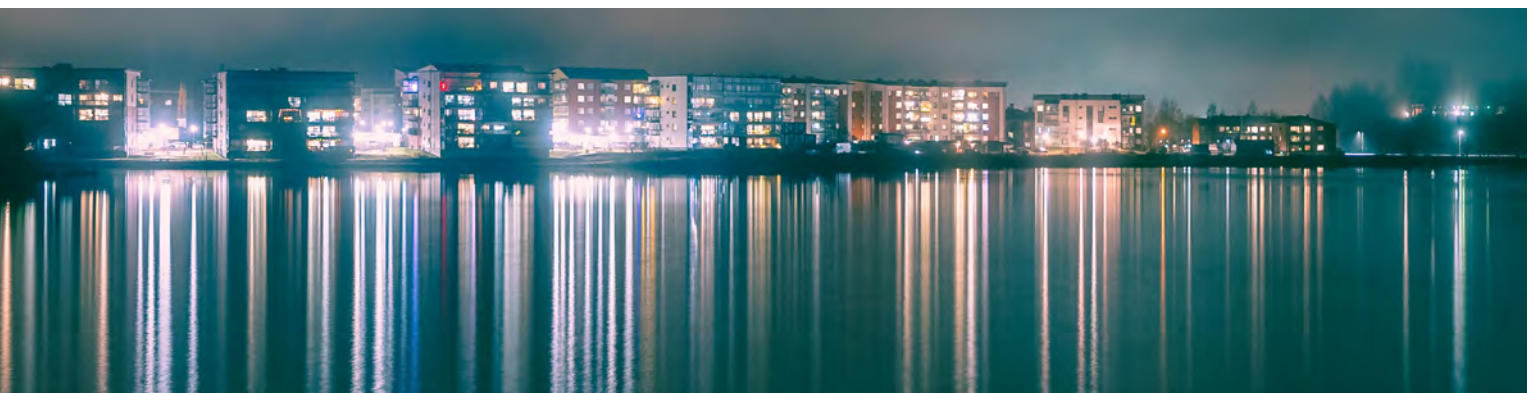
Samalla kun kansalaiset saavat enemmän oikeuksia ja valtaa omaan energiantuotanto- ja kulutustapoihinsa sekä vähentävät riippuvuuttaan keskitetystä energiantuotannosta ja -infrastruktuurista, heille syntyy uusia velvollisuuksia (Wahlund ja Palm 2022). Tämä voi herättää kysymyksiä eri yhteiskuntaryhmien tasavertaisesta osallistumisesta, sillä investointikyvyt, tekniset tiedot ja taidot sekä käytettävissä olevat resurssit, joita tarvitaan energiaprosumereiksi ryhtymisessä, saattavat vaihdella huomattavasti. Olosuhteet energiayhteisöjen muodostamiselle ja kansalaisten ymmärrys energiayhteisöistä myös vaihtelee Euroopan maiden välillä, mikä voi tuottaa haasteita ja jännitteitä (Apajalahti ym. 2023).

Energijärjestelmissä tarvitaan lisää joustavuutta ja kysyntäjoustoa, eli kulutuksen on ainakin osittain joustettava tuotannon kanssa, sillä vaihtelevasti sähköä tuottavan aurinko- ja tuulienergian kapasiteetti tulee kasvamaan. Tavanomaisia ratkaisuja verkon tasapainottamiseksi on ollut käyttää vesivoimaa tai nopeasti käynnistyviä voimalaitoksia, kuten kaasuturbiinivoimaloita. Perinteisten ratkaisujen ohella uudet teknologiat, kuten P2X-ratkaisut, akut ja virtuaaliset voimalaitokset (VPP), voivat lisätä verkon joustavuutta, koska ne voivat myös tarjota erilaisia kysyntäjoustopratkaisuja (Buttler ym. 2018; Fan ym. 2020; Vedullapalli ym. 2019). VPP:n ideana on esimerkiksi integroida useita kysyntäjoustopratkaisuja, kuten rakennusten lämpö-, ilmanvaihto- ja ilmastointijärjestelmiä (HVAC),

osaksi energiavarastointijärjestelmiä pilvipohjaisen alustan alla (Abbasi ym. 2019; Rotger-Griful ym. 2016; Royapoor ym. 2020). HVAC-järjestelmien yhdistäminen mahdollistaa sähkönkulutuksen välittömän säätämisen vähentämällä tai lisäämällä rakennuksen energiakulutusta sähköverkon taajuuden perusteella. Verkonhallinnan lisäksi kysyntäjoustopratkaisujen tarjoajat voivat toimia sähkömarkkinoilla sähköntoimittajina, mikä voi tuottaa taloudellisia voittoja ja ilmastohyötyjä vähentämällä samalla tarvetta käynnistää kaasuturbiineja verkon tasapainottamiseksi (Sillman ym. 2023b). Kehitteillä on useita uudenlaisia ratkaisuja sähkötalon tasaamisen lisäämiseksi, kuten vesipumppuja jo olemassa oleviin patoihin ja erilaisia varastointitekniikoita.

Energian käytön vähentäminen kulutuspiikkien aikana erilaisia energiansäästötoimenpiteitä hyödyntäen siirtää myös kulutusta erittäin tehokkaasti. Suomessa arkielämän energiaintensiteetti on kasvanut jatkuvasti, ja kansalaisten odotetaan yhä useammin muuttavan kulutustottumuksiaan energiatehokkaammiksi. Tällaista käyttäytymisen muutosta tarpeettoman tai tuhlailevan energiankulutuksen poistamiseksi – energiatehokkaiden lampujen ostamisesta lentomatkatamisen vähentämiseen tai sähköiseen liikenteeseen siirtymiseen – pidetään yhä useammin välttämättömänä ilmastoneutraaliustavoitteiden saavuttamisen kannalta (Johansson ym. 2021).

Ihmisten taipumus säilyttää vallitseva tilanne eli käyttäytymisen suuri inertia vaikuttaa kuitenkin siihen, että käyttäytymisen muutoksia on erityisen vaikea toteuttaa. Kansalaiset saattavat vastustaa muutoksia esimerkiksi tarvittavien investointien korkeaksi koettujen alkukustannusten vuoksi, elämäntapojensa muuttamiseen liittyvän epämuukavuuden takia (Ab-rardi 2018), koettujen vaihtoehtojen puutteen vuoksi tai yksinkertaisesti siksi, ettei muutoksiin ole varaa. Käyttäytymismuutokset eivät riipu vain yksilöllisistä valinnoista, vaan arkielämän energiakäytännöistä niin kotona kuin työpaikoilla, erilaisten politiikkakeinojen vaikuttavuudesta ja nykyisiin järjestelmiin liittyvistä ratkaisuista, kuten saatavilla olevista kestävästä teknologioista, tuotteista ja infrastruktuurista, joita voidaan tukea sääntelyllä.



# 6. ENERGIATEKNOLOGIOIDEN KEHITTYMINEN

## 6.1 Merkittävimmät energialähteet Suomessa

### 6.1.1 Bioenergia

Bioenergia on maailmanlaajuisesti suurin uusiutuvan energian lähde. Bioenergia kattaa nykyisin yli puolet kaikesta uusiutuvan energian tarjonnasta ja yli kuusi prosenttia kokonaisenergiasta. Maailman bioenergiakapasiteetti on kasvanut 85 GW:sta (vuosi 2013) 149 GW:iin (vuosi 2022), ja suurin osa siitä on kiinteitä biopolttoaineita ja orgaanisia jätevirtoja. Suomessa kapasiteetti kasvoi samalla ajanjaksolla 2,0 GW:sta 2,7 GW:iin (IRENA 2023a). Bioenergialla on keskeinen rooli Suomen energiajärjestelmässä, ja bioenergian tuotanto liittyy pitkälti metsäteollisuussektoriin, jonka prosesseissa syntyy valtavia määriä puujätettä ja bioenergiaa.

Nykyaikaisella bioenergian tuotannolla on tärkeä rooli fossiilisten energialähteiden korvaajana myös lähitulevaisuudessa. Sen käytön odotetaan lisääntyvän maailmanlaajuisesti esimerkiksi teollisuudessa, kaukolämmössä, tieliikentees-

sä ja ilmailussa. Bioenergian käytön kasvua tuetaan esimerkiksi EU:n, Yhdysvaltojen, Intian ja Australian politiikalla. Suurin potentiaali on orgaanisen jätteen tehokkaammassa hyödyntämisessä. Kestävät jätevirrat, kuten maatalousjätteet, yhdyskuntajätteet ja metsäteollisuuden jätteet, eivät tarvitse uutta ja erityistä maankäyttöä. Näin ollen jätehuoltoon investoiminen mahdollistaa parempilaatuisen biopolttoaineiden ja biokaasun tuotannon, jossa voidaan hyödyntää monenlaisia jätevirtoja (IEA 2021).

Suomi edistää bioenergian käyttöä liikenteessä, jossa käytetään nestemäisten ja kaasumaisten biopolttoaineiden yhdistelmiä muiden vaihtoehtojen, kuten vedyn, sähköpolttoaineiden ja sähköistämisen, ohella. Esimerkiksi biokaasun tuotantotavoitteeksi Suomessa on asetettu 2,5 TWh biokaasua liikenteessä vuoteen 2030 mennessä ja 5–6 TWh vuoteen 2045 mennessä (LVM 2020). Suurin osa biokaasusta tuotetaan Suomessa keskitetyissä laitoksissa, kuten yhteismädätyslaitoksissa, jätevedenpuhdistamoissa ja reaktorilaitosyksiköissä. Tällä hetkellä myös



maatilojen ja teollisuuden biokaasulaitokset tuottavat biokaasua, mutta niiden osuus on pienempi. Vuosina 2021–2023 on rakennettu yhteensä 26 uutta biokaasun tuotantolaitosta, ja nykyisten laitosten tuotanto on kasvanut laajenusinvestointien ansiosta. Suomessa sijaitsevat biokaasulaitokset löytyvät Googlen karttapalvelusta (Biokaasulaitokset kartalla 2024).

Kasvava kiinnostus biokaasun tuotantoon vaikuttaa myönteisesti suomalaisten maatilojen kannattavuuteen. Uusia hankkeita on kehitetty esimerkiksi maatilojen lannasta ja maatalousjätteistä saatavan biokaasun roolin vahvistamiseksi. Noin 40 biokaasulaitosinvestointia on joko suunnitteilla ja/tai rakenteilla. Esimerkiksi energiayhtiö St1 ja elintarvikevalmistaja Valio ovat sopineet, että Suomen Lantakaasu Oy tuottaa vuonna 2030 maatilojen tähteistä jopa 1 000 GWh biokaasua, joka käytetään pääasiassa raskaan liikenteen polttoaineena.

Suomen metsäteollisuuden mittakaavan ansiosta puupellettien raaka-aineita on hyvin saatavilla mutta niiden rooli on pieni. Vaik-

ka kulutus on kasvussa (530 kt vuonna 2022), puupellettiteollisuuden ei odoteta kasvavan merkittävästi Suomessa, koska saatavilla on muita kiinteitä biopolttoaineita, kuten metsäteollisuuden sivutuotteita ja metsähaketta, jotka ovat loppukuluttajalle edullisempia. Suomessa on meneillään muutamia puupellettihankkeita. Esimerkiksi Kuusankoskella Etelä-Suomessa sijaitseva Leca Finland Oy aikoo korvata 9 000 tonnia kivihiiltä 12 500 tonnilla paikallisesti tuotetuilla puupelletteillä, minkä on arvioitu vähentävän hiilidioksidipäästöjä nykyisestä 38 000 tonnista noin 15 000 tonniin vuodessa. Toinen esimerkki on Salmisaaren voimalaitos Helsingissä, jossa kivihiilellä toimiva kaukolämpökattila muutetaan 150 MW:n puupellettikapasiteetilla toimivaksi kuplivaksi leijukerroskattilaksi, jonka Valmet toimittaa.

### 6.1.2 Ydinenergia

Ydinenergiaa on perinteisesti pidetty sähkön peruskuormantuotantona luotettavuuden ja edullisten operaatiokustannusten vuoksi, mutta se on myös joustava energiamuoto, jolla voidaan

tuottaa lämpöä ja sähköä sekä näiden avulla muita energiahyödykkeitä, kuten vetyä. Ydinreaktorin lämpöteho vaihtelee reaktorin mukaan ja voi olla 15–4 500 MW, kun taas sähköteho voi olla 5–1 600 MWe. Yhdessä ydinvoimalassa voi olla useita reaktoreita. Vuonna 2023 ydinvoiman osuus maailman sähköntuotannosta oli 10 prosenttia ja Suomen sähköntuotannosta noin 41 prosenttia.

Perinteiset ydinvoimalaitokset tuottavat sähköä. Mittakaavaetua on haettu voimalaitosten suuresta koosta. Esimerkiksi Suomen suurin reaktori Olkiluoto 3 on sähköteholtaan 1 600 MW:n EPR-reaktori, ja se aloitti säännöllisen tuotannon huhtikuussa 2023. Reaktorin käyttöönotto viivästy, mikä on tyypillistä useille suurille voimalaitoshankkeille. Euroopassa rakennetaan parhaillaan uusia suuria voimalaitoksia, Ranskassa 1 600 MWe:n Flamanville 3 ja Iso-Britanniassa 3 200 MWe:n Hinkley Point C. Suunnitteilla on myös lisää kapasiteettia: Ranskaan suunnitellaan noin 10 000 MW:n (Penly, Gravelines ja Bugey) ja Iso-Britanniaan 3 200 MW:n laitoksia (Sizewell C) (EDF 2024). Puola aikoo korvata hiiltä ydinenergialla ja aloittaa kolmella yhdysvaltalaisella AP1000-reaktorilla (World Nuclear News 2023a). Pohjoismaissa Fortum ja Vat-

tenfall tutkivat mahdollisuuksia rakentaa sekä pienydinvoimaa että suuria reaktoreita (Fortum 2022).

Pienet modulaariset reaktorit (SMR, Small Modular Reactor) ovat vaihtoehto suurille laitoksille. SMR-voimaloissa mittakaavaetua haetaan yksiköiden suuresta lukumäärästä eli sarjavalmistuksesta. SMR-reaktorien sähköteho vaihtelee 5–500 MWe:n välillä. Pienen koon ansiosta turvallisuus voidaan varmistaa rakenteellisten ratkaisujen avulla ilman monimutkaisia järjestelmätoimintoja. SMR-reaktorin radioaktiivisen aineen määrä on sitä vähäisempi, mitä pienempi reaktori on. Siksi SMR-laitoksia voi turvallisesti sijoittaa lähelle loppukäyttäjiä, jotka voivat hyödyntää reaktorin tuottamaa lämpöä. Sähkön ja lämmön yhteistuotantoon hyvin soivia laitosmalleja ovat esimerkiksi Viroon kaavailtu 300 MWe:n GE Hitachin BWRX-300 (World Nuclear News 2023b), Yhdysvalloissa viranomaisen ennakkohyväksynnän saanut NuScale (World Nuclear News 2023c) (n. 300–900 MWe, 4–12 reaktoria per laitos) ja Ranskassa kehitettävä 340 MWe:n Nuward (World Nuclear News 2023d). Suomessa Fortum ja Outokumpu tutkivat terästuotannon hiilidioksidipäästöjen vähentämistä pienydinvoimalla





(Outokumpu 2023), ja Fortum selvittää SMR:iä myös Helsingin Energian Helenin (Helen 2022) ja reaktorivalmistaja Rolls Roycen (Fortum 2023) kanssa. Helsinki, Kuopio ja Tornio ovat julkisuudessa nimenneet alueeltaan mahdollisia sijoituspaikkoja lämmöntuotantoon tai yhteistuotantoon tarkoitetuille ydinvoimaloille.

Merkittävä osa kotitalouksien ja teollisuuden energiankulutuksesta on lämpöä. Perinteiseen tekniikkaan perustuvat SMR:t tuottavat lämpöä noin 300 celsiusasteen lämpötilassa. SMR:iä voidaan hyödyntää sähkön ja lämmön yhteistuotannossa sekä asutuskeskittymien kaukolämpöverkkoon kytkettyinä että teollisuuden lämmönlähteenä, joskin matala lämpötila rajoittaa teollisia käyttökohteita. Korkean lämpötilan kaasujäähdytteisillä reaktoreilla, jollaisia Kiinassa on hiljattain otettu käyttöön (World Nuclear News 2022), päästään 600–900 asteen lämpötilaan. LUT-yliopisto ja yhdysvaltalainen teknologiakehittäjä Ultra Safe Nuclear Corporation selvittävät kaasujäähdytteisen 30 MW:n tutkimusreaktorin sijoittamista Lappeenrantaan (LUT 2022b). Laitos kytkettäisiin myös kaukolämpöverkkoon, ja sillä voisi pilotoida

myös vedyntuotantoa korkean lämpötilan elektrolyyseillä. Suomessa kehitetään myös LDR-50 reaktoria, joka tuottaisi pelkästään kaukolämpöä jakeluverkkoon sopivassa, noin 100 asteen lämpötilassa. LDR-50 reaktoria kaupallistaa kesällä 2023 perustettu yhtiö Steady Energy (VTT 2023b). SMR-reaktoreiden rakennuskustannukset on tällä hetkellä arvioitu melko korkeiksi.

Ydinenergiaa koskeva säännöstö on laadittu suuria ydinvoimalaitoshankkeita ajatellen, eikä se vielä huomioi pienydinvoiman erityispiirteitä, kuten sarjavalmisteisuutta tai kokoluokan ja turvallisuusominaisuuksien vaikutusta suojatäisyyksiin. Pienydinvoiman hyödyntäminen kaukolämpöverkoissa kuitenkin edellyttää laitojen sijoittamista lähelle asutusta. Ydinenergiain kokonaisuudistus ja STUKin ydinturvallisuussäännösten uudistus (STUK 2022) on alkanut. Lainsäädäntöä ja valvontaa ajantasaisesti. Reaktorien lähisijoittaminen on jo mahdollista, jos sen turvallisuus pystytään osoittamaan (STUK 2024). Ydinenergialla on Suomessa vankka kannatus, ja myös poliittinen ilmapiiri on ydinenergiamyönteinen (Valtioneuvosto 2023).

### 6.1.3 Tuulivoima

Tuulivoimakapasiteetin kasvu Suomessa on ollut nopeaa vuonna 2022, mutta se hidastui vuonna 2023. Suomen tuulivoimayhdistyksen mukaan vuonna 2022 asennettiin 437 uutta tuulivoimalaa, mikä johti 2 430 MW:n nimellistehon kasvuun (Tuulivoimayhdistys 2023a), kun taas vuoden 2023 ensimmäiset kuusi kuukautta vastaavat luvut olivat 75 uutta voimalaa ja 439 MW:a nimellisteho (Tuulivoimayhdistys 2023b). Vuonna 2022 tuulivoimaan investoitiin kansallisella tasolla 2,9 miljardia euroa, mikä lisäsi Suomen tuulivoimakapasiteettia 75 prosenttia (Tuulivoimayhdistys 2023a). Tuulivoiman kokonaiskapasiteetti kasvoi Suomessa 5,7 GW:iin vuoden 2022 loppuun mennessä.

Suomen tuulivoimakehitys oli vuonna 2022 voimakasta myös kansainvälisessä mittakaavassa. Suomen maailmanlaajuinen osuus uusista maatuulivoimalaitoksista oli neljä prosenttia, mikä oli saman verran kuin Ruotsilla, kun taas Saksan ja Intian osuudet olivat kolme prosenttia, ja Espanjan, Ranskan ja Puolan osuudet vain kaksi prosenttia maailmanlaajuisesta osuudesta (GWEC 2023). Suurimmat uusien maatuulivoimalaitosten asennukset tekivät Kiina, joka asensi 47 prosenttia ja oli näin merkittävin globaali asentaja, ja Yhdysvallat, joka asensi 13 prosenttia asennuskapasiteetista (GWEC 2023). Voidaan todeta, että Suomi teki vuonna 2022 maailmanlaajuisen ennätyksen maatuulivoima-asennuksissa. Tuulivoiman osuus koko

Suomen sähköntuotannosta vuonna 2022 oli 16,7 prosenttia. Vuoden 2023 ensimmäisellä neljänneksellä se pysyi ennallaan (Tilastokeskus 2023b), sillä uusien laitosten rakentaminen vuonna 2023 on ajoitettu keväälle ja kesälle talvikuukausien sijasta.

Myös teknologian kehitys tuulivoimassa on ollut ilmeistä. Tuulen nopeus kasvaa eksponentiaalisesti korkeuden kasvaessa, ja tuuliturbiinin tuotanto on verrannollinen tuulen nopeuden kuutioon. Tämä on johtanut yhä korkeampien tuulivoimaloiden rakentamiseen. Tuuliturbiinien korkeus on muuttunut viimeisten 15 vuoden aikana 100 metristä 200 metriin. Korkeammat tornit mahdollistavat myös roottorin halkaisijan ja roottorin pyyhkäisyypinta-alan kasvattamisen, mikä lisää tuotantoa entisestään, sillä tuulivoimalan nimellisteho on suoraan verrannollinen roottorin pyyhkäisyypinta-alaan. Pyyhkäisyypinta-alan 28 prosentin kasvu edellyttää keskimäärin noin 13 prosentin kasvua turbiinin roottorin halkaisijassa.

Suomen Tuulivoimayhdistyksen tilastojen mukaan turbiinien keskimääräinen teho on kasvanut 4,33 MW:sta (vuosi 2019) 5,56 MW:iin vuonna 2022 (Tuulivoimayhdistys 2023a). Suurempien turbiinien energiantuotto on parempi, koska niillä saavutetaan suurempi tuulennopeus korkeammalla. Näin ollen tuotantokustannukset voivat olla alhaisemmat. Suuremmat roottorit ja korkeammat tuulivoimalat vaativat kuitenkin





enemmän tilaa sekä pidempiä etäisyyksiä asuinalueista, jotka on huomioitava lupaprosessissa. Tuulivoimaloiden koko vaikuttaa myös teknologian sosiaaliseen hyväksymiseen.

Tuulivoiman osuuden kasvu luo haasteita sähkönsiirrolle ja sähkömarkkinoille, sillä tuotannon ja kulutuksen on oltava koko ajan tasapainossa. Tuulivoiman tuotantoa voidaan vain vähentää, mutta ei lisätä, koska tuuliolosuhteet määrittelevät käytettävissä olevan enimmäistehon. Tuulivoiman osuuden kasvaessa sähkön hinta on yhä riippuvaisempi tuuliolosuhteista. Tämä ei kuitenkaan suoraan vaikuta yksistään sähkönhintaan, vaan esimerkiksi talven 2022–2023 erittäin korkeat sähköhinnat johtuivat pääosin sähkön tuonnin äkillisestä keskeytymisestä Venäjältä (kts. lisää sähkön hinnoittelusta osiosta 4).

Suomi on verrattain suuri maa, jossa tuuliolosuhteet vaihtelevat suuresti eri alueilla. Suurin osa tuulivoimalaitoksista on toistaiseksi sijoitettu maan länsiosaan, mikä aiheuttaa kahdenlaisia haasteita sähköjärjestelmälle. Ensinnäkin, koska sähköverkon kapasiteetti on aina rajallinen, monilla alueilla maan länsiosissa uusien tuulivoimalaitosten liittäminen siirtoverkkoon ja 400 kV:n sähköasemiin on tilapäisesti estetty (Fingrid-Verkkokiikari). Toiseksi, koska suurin osa tuulivoimapuistoista sijaitsee samoilla maantieteellisillä alueilla, on tuotetun sähkön saatavuus aina sama. Tällöin tuotantohuiput ja -katkot tapahtuvat aina samanaikaisesti, sillä tuuliolosuhteet ovat samat yhdellä alueella. Olisi hyödyllistä jakaa tuulivoimatuotanto laajemmalle maantieteelliselle alueelle, jotta tuulivoimatuotannon nopeat muutokset voitaisiin tasata koko Suomen alueella sekä helpottaa siirtokapasiteetin riittävyttä. Tähän mennessä maan itä- tai eteläosaan (valtatie 5:n itäpuolelle) on rakennettu vain hyvin vähän tuulipuistoja sotilastutkien aiheuttamien rajoitusten vuoksi. Hallituksen pyynnöstä on selvitetty tutkaongelmaa, jonka tuloksena maaliskuussa 2023 julkaistiin Kenraaliluutnantti Arto Rädyn selvitys, jossa luetellaan useita mahdollisia toimia tuulivoimainvestointien parantamiseksi myös Itä-Suomessa (Räty 2023).

Sähköjärjestelmän tasapainottamisen näkökulmasta tuulivoimatuotannon vaihtelu ei vaadi samanlaista nopeaa varavoimaa kuin esimerkiksi

suuret lämpövoimalaitokset, sillä tuulivoiman tuotanto voidaan ennustaa hyvällä tarkkuudella 24 tuntia etukäteen. Sähköverkon lyhyen aikavälin vakauteen on kuitenkin kiinnitettävä enemmän huomiota. Pohjoismaissa sähköjärjestelmä toimii 50 Hz:n vaihtovirralla ja -jännitteellä. Tarkka 50 Hz:n taajuus on jatkuvasti säilytettävä, jotta järjestelmä toimisi luotettavasti. Tuulivoimalat eivät luo tällaista vakaata taajuutta, vaan ne synkronoivat itsensä olemassa olevaan verkotaajuuteen. Tämän takia tilanne, jossa suurin osa sähköntuotannosta perustuu tuulivoimaloihin, voi aiheuttaa epävakautta koko sähköjärjestelmässä. Näin ollen erityistä huomiota on kiinnitettävä sähköjärjestelmän dynaamiseen ohjaukseen ja vakauteen, kun tuulivoiman osuus kasvaa, kuten Fingridin (2022) raportti osoittaa. Perinteisesti sähköverkon taajuuden säätö on toteutettu nopeasti säädettävillä vesi- ja lämpövoimalaitoksilla. Nopeaan taajuuden säätöön tarvitaan uusia teknisiä ratkaisuja, joista yksi esimerkki on suuri akkuvarasto, joka voi lisätä tai vähentää sähköverkkoon syötettävää tehoa sekunnissa tai nopeammin. Esimerkki tällaisesta akkuvarastosta on Neoen litiumioniakkujen varasto Lappeenrannassa, minkä tarkoituksena on lieventää verkon taajuuden vaihtelua. Käyttöönottohetkellä se oli Pohjoismaiden suurin akkuvarasto 30 MW:n teholla ja 30 MWh:n energiakapasiteetilla (Neoen 2020).

Vaikka tuulivoimalaitosten rakentaminen on hidastunut vuonna 2023, on suuri määrä uusia tuulipuistoja jo valmisteilla. Suomen Tuulivoimayhdistys raportoi toukokuussa 2023 (Tuulivoimayhdistys, 2023c), että yhteensä 418 tuulivoimahanketta, joiden teho on 121 GW, on käynnissä eri kehitysvaiheissa. Näistä 35 hanketta (3,4 GW) oli rakenteilla, ja loput olivat vielä suunnittelu- tai lupavaiheessa. Lähes puolet uudesta kapasiteetista on merellä sijaitsevia tuulivoimalaitoksia. Tuulivoimahankkeiden valtava määrä osoittaa, että Suomella on suuret mahdollisuudet tuottaa energiaa fossiilisen energian korvaamiseksi.

#### 6.1.4 Aurinkoenergia

A full terawattpeak of solar electricity globally Aurinkosähkön ensimmäinen terawattipiikin raja ylittyi globaalisti vuonna 2022 ja seuraavan odotetaan ylittyvän seuraavan kolmen vuoden aikana. Aurinkokapasiteetin kehitys vaikuttaa

olennaisesti aurinkoenergian hintaan, sillä asennetun kapasiteetin kaksinkertaistuminen laskee aurinkojärjestelmien hintaa 20 prosenttia, kun hintaa tarkastellaan sarjatuotannon oppimiskäyrän avulla.

Myös aurinkopaneelien teknologinen kehitys on ottanut merkittäviä askelia, sillä paneelien hyötysuhteet ovat kasvaneet nopeasti. Kun vuonna 2015 keskiverto aurinkopaneeli tuotti 250 Wp, oli se vuonna 2022 jo 360 Wp paneelipinta-alan pysyessä samana. Aurinkopaneelien teknologisia kehitysaskelia voi seurata esimerkiksi Clean Energy Review (n.d.) -nettisivuilta. Kehitystä tapahtuu myös aurinkosähköinverttereissä, joissa otetaan käyttöön uutta piikarbidipohjaista (SiC) tehoelektronikkaa. Kasvaneen tehotiheyden ansiosta päästään jo 0,25 kg/kW paino-tehosuhteeseen esimerkiksi 400 kW aurinkoinvertterissä (PV Magazine 2023), joka on noin 100 kertaa pienempi kuin 30 vuotta sitten tuotetussa aurinkoinvertterissä.

Suomessa vuodesta 2019 lähtien verkkoon kytketyn aurinkosähkön kapasiteetti on kasvanut noin sadalla megawattilla vuosittain. Vuonna 2022 aurinkosähkön kapasiteetin kasvu yli kaksinkertaistui johtuen poikkeuksellisesta sähköhinnan noususta. Energiaviraston (2023d) mukaan aurinkoenergian tuotanto Suomessa oli vuonna 2022 yhteensä noin 635 megawattia. Kasvua vuoteen 2021 verrattuna oli yli 240 megawattia. Aurinkovoiman osuus Suomen sähköntuotannosta lähenee prosentin luokkaa, ja määrä kasvaa jatkuvasti. Fingridin arvion mukaan Suomessa voi vuoteen 2030 mennessä

olla seitsemän gigawatin tehon verran aurinkosähköä.

Suomessa on kuitenkin vielä suhteellisen vähän aurinkosähkön tuotantoa verrattuna Euroopan johtaviin maihin (Fingrid 2023b). Esimerkiksi Hollannissa oli vuoden 2022 lopussa aurinkosähkökapasiteettia noin yhdeksänkertainen määrä asukasta kohden (IEA-PVPS 2023). Vaikka Suomessa ei ole vielä paljon aurinkosähkön tuotantokapasiteettia, on Euroopan merkittävä aurinkosähkötuotanto tänä vuonna heijastunut toisinaan myös Suomeen edullisina, jopa negatiivisina, iltapäivätunteina sähkömarkkinoilla. Suomessa nähtiin kesälä 2023 (16.7.2023) sähköhinnan alin ennätys, jolloin tukkumarkkinahinta painui alle -60 EUR/MWh (-6 snt/kWh). Hollannissa on nähty jopa -400 EUR/MWh sähköhintoja aurinkosähköpiikkien aikaan (PZEM 2023).

Suomeen on suunnitteilla monia yksittäisiä useiden satojen megawattien aurinkovoimaloita, ns. aurinkopuistoja, mikä on poikkeuksellista aiempiin vuosiin verrattuna. Käytännössä suunnitteilla olevat teolliset voimalat asetuvat lähelle kantaverkkoa kustannussyiden vuoksi. Voimalat tarvitsevat maapinta-alaa, sillä maa-asenteinen voimala on kustannustehokkainta asentaa. Maanvuokraus voi tuoda kunnille ja maanomistajille merkittäviä vuokratuloja. Teollisen mittakaavan aurinkohankkeet ovat aiheuttaneet paljon keskustelua lähialueen asukkaiden keskuudessa, ja vertailua rakennuksiin integroitujen voimaloiden ja maa-asenteisten voimaloiden välillä on tehty.



Pelkästään sähkön tuotantokäyttöön tarkoitettujen teollisten voimain kilpailevat puhtaasti sähkön markkinahintaa vastaan, kun taas rakennuksiin integroidut järjestelmät kilpailevat kannattavuudessa sähkön kokonaishintaa vastaan. Vuonna 2023 korkojen nousu, inflaatio ja sähkön hinnan lasku ovat laskeneet yksityisten ihmisten innostusta asentaa aurinkosähköä omiin kiinteistöihinsä.

Aurinkosähköasennusten turvallisuus ja vaatimustasojen täytyminen ovat nousseet esille järjestelmien määrän kasvaessa. Nopeasti lisääntynyt kysyntä on johtanut siihen, ettei ammattitaitoisia asentajia ole riittävästi. Tukesin (2023) tekemän selvityksen mukaan merkittävässä osassa aurinkosähköasennuksia löydettiin puutteita tai selkeitä virheitä. Toinen huomioitava asia on myös järjestelmien paloturvallisuus, johon pelastuslaitosten kumppanuusverkosto on laatinut paloturvallisuusohjeen (Pelastuslaitokset 2023). Kolmas huomioitava asia on vakuutusyhtiöiden mahdolliset omat ohjeistukset aurinkovoimaloihin liittyen, jotka on syytä ottaa huomioon asennuksissa.

### 6.1.5 Lämpöpumput

Lämpöpumppujen rooli on tunnistettu merkittäväksi fossiilisten energialähteiden käytön vähentämisessä ja lämmöntuotantoon liittyvien päästövähennysten saavuttamisessa tulevaisuudessa. IEA:n vuonna 2022 tekemän arvon mukaan lämpöpumppujen käytöllä voitaisiin vähentää syntyviä hiilidioksidipäästöjä 500 miljoonalla tonnilla vuonna 2030 (IEA 2022d). Lämpöpumpputeknologia on kehittynyt ja lämpöpumppujen tehokkuus on noussut lähivuosina sekä kiinteistö- että teollisuuskokoluokan lämpöpumpuissa. Lämpöpumppujen etuna on niiden kyky hyödyntää erilaisia lämmönlähteitä, kuten maalämpöä, kerätä lämpöä ilmasta sekä hyödyntää erilaisia hukkalämpövirtoja, joiden hyödyntäminen suoraan lämpöenergiana olisi muilla teknologioilla teknisesti hankalaa ja taloudellisesti kannattamatonta niiden matalan lämpötilatason vuoksi. Lisäksi lämpöpumppujen käyttömahdollisuudet jäädytykseen sekä sähkönhinnan suuret vaihtelut tarjoavat yhä monipuolisempia mahdollisuuksia lämpöpumppujen hyödyntämiseen sähkön kysyntäjoustossa. Lämpöpumppujen käytöllä voidaan parantaa myös eri maiden energiaomavaraisuutta, kun tuotuja fossiilisia

polttoaineita tarvitaan lämmitysjärjestelmissä vähemmän.

Vuonna 2021 noin kymmenen prosenttia kiinteistöjen lämmitysenergiasta tuotettiin globaalisti lämpöpumppujen avulla, ja niiden määrä kasvaa voimakkaasti korvaten yhä kiihtyvään tahtiin muita lämmitysmuotoja ja energianlähteitä (IEA 2022d). Lämpöpumppujen rooli Pohjoismaissa on huomattavasti suurempi verrattuna globaaliin tasoon. Esimerkiksi Norjassa 60 prosenttia kiinteistöistä on varustettu lämpöpumpuilla ja vastaava luku Suomessa ja Ruotsissa on yli 40 prosenttia kiinteistöistä. Pelkästään Suomessa myytiin vuonna 2022 noin 196 000 uutta lämpöpumppua, joista suurin osa on ilmalämpöpumppuja, ilma-vesilämpöpumppuja sekä maalämpöpumppuja (SULPU 2023). EU:n alueella myytävien lämpöpumppujen myynti kasvoi 35 prosenttia vuonna 2021, ja markkinoiden voimakkaan kasvun odotetaan kiihtyvän lämpöpumppujen yleistyessä voimakkaasti esimerkiksi Puolassa, Alankomaissa, Italiassa ja Itävallassa (IEA 2022d).

Kiinteistökokoluokan lämpöpumppujen kasvun lisäksi suurissa teollisen kokoluokan laitoksissa on tunnistettu lämpöpumppujen käytön mahdollisuudet. Teollisen kokoluokan lämpöpumppuja voidaan käyttää esimerkiksi kaukolämmön ja teollisuuden tarvitseman lämmön tuotannossa. Vuonna 2016 tehdyn arvon mukaan lämpöpumpuilla voitaisiin kattaa EU:n teollisuuden lämmöntuotannosta noin 75 TWh taloudellisesti kannattavasti, kun vastaavaksi tekniseksi potentiaaliksi arvioidaan noin 480 TWh (Wolf ja Blesl 2016). Lämpöpumpputeknologia on kehittynyt jatkuvasti, ja tällä hetkellä lämpöpumppujen potentiaali lienee tätä arviota suurempi. Modernit kaupalliset korkean lämpötilan lämpöpumput pystyvät tuottamaan noin 120–150 °C lämpöä, mikä mahdollistaa myös teollisuuden tarvitseman lämmityshöyryn tuottamisen lämpöpumpuilla (Wolf ja Blesl 2016). Suomessa ja Ruotsissa on jo paljon esimerkkejä suurien lämpöpumppujen käytöstä kaukolämmöntuotannossa. Näissä lämpöä on kerätty esimerkiksi jätevedenpuhdistamolta tulevasta vedestä tai datakeskuksien hukkalämmöstä ja lämpöpumpulla korotettu lämpö on syötetty kaukolämpöverkkoon. Esimerkkinä on Helsingissä toimiva Katri Valan lämpöpumppulaitos, jolla voidaan tehdä 126 MW

lämmitysenergiaa ja 80 MW jäädytysenergiaa Helsingin alueen kaukolämpöverkkoon.

Lämpöpumpputekniikan kehitys- ja tutkimus keskittyy lämpöpumppujen tehon ja niiden komponenttien kehittämiseen sekä yhä korkeampien lämpötilannousujen ja -tasojen saavuttamiseen. Lisäksi lämpöpumpuissa käytetyissä kylmäaineissa ollaan siirtymässä yhä enemmän kohti luonnollisten kylmäaineiden (hiilidioksidi, ammoniakki, hiilivedyt) käyttämistä. Synteettisten kylmäaineiden käyttöön on tulossa merkittäviä kiristyksiä lähitulevaisuudessa (mm. EU:n F-kaasuasetus ja PFAS-aineita koskeva lakiehdotus). Tanskan Esbjergiin rakennettava, hiilidioksidilla toimiva ja lämmitysteholtaan 50 MW:n lämpöpumppulaitos on hyvä esimerkki modernista suuren kokoluokan lämpöpumppulaitoksesta, jossa hyödynnetään tehokasta kompressoriteknologiaa ja luonnollista kylmäainetta (MAN Energy Solutions n.d.).

liimat, joita valmistetaan nykyisin fossiilisesta öljystä tai kaasusta.

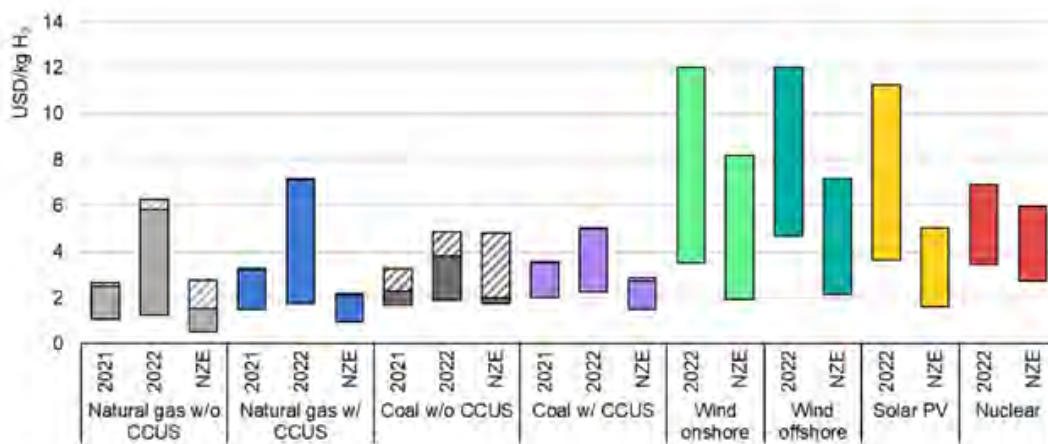
Monet vedyn käyttäjistä, joihin kuuluvat esimerkiksi biopolttoaineiden, lannoitteiden ja vetyperoksidin tuottajat, suunnittelevat siirtymistä harmaasta (maakaasupohjaisesta) vedystä vihreään vetyyn. Maakaasuun tai biokaasuun sekoitettuna vety voi myös korvata maakaasua teollisessa lämmöntuotannossa ja polttokennoihin tai kaasuturbiineihin perustavassa sähköntuotannossa. Myös kaasuturbiinit ja polttomoottorit, jotka perustuvat puhtaan tai lähes puhtaan vedyn polttamiseen, ovat tutkimus- ja kokeiluvaiheessa. Vetypelkistykseen perustuvaan fossiilivapaaseen teräksen tuotantoon tarvitaan suuria määriä vetyä. Esimerkiksi Raahan terästehdas tarvitsisi noin 1 GW:n elektrolyysikapasiteetin, jos se siirtyisi käyttämään elektrolyysillä tuotettua vetyä hiilivapaan teräksen tuotannossa.

## 6.2 Muut energiateknologiat, energiansäästö ja energiayhteisöt

### 6.2.1 Vetyratkaisut

Vähäpäästöisen vedyn roolin odotetaan kasvavan merkittävästi tulevaisuuden energiajärjestelmässä. Vety ei ole energialähde, vaan se on energiankantaja. Arvioiden mukaan sen suora käyttö on vain pieni osa kokonaiskulutuksesta. Muita vedyn käyttökohteita ovat erilaiset power-to-x-tuotteet, kuten kemikaalit, muovit ja

Vähäpäästöistä vetyä voidaan tuottaa vähäpäästöisestä sähköstä (vihreä vety), biomassasta kaasuttamalla tai fossiilisesta kivihiilestä/kaasusta yhdistettynä hiilidioksidin talteenottoon ja varastointiin (CCS) (sininen vety). Maailmanlaajuisesti vähäpäästöiselle vedyntuotannolle on vahva poliittinen kannatus, mutta sen tuotannon kasvu ei ole lähtenyt liikkeelle 1,5 asteen skenaarioiden edellyttämällä tavalla. Vihreä vety voi nykyisin maksaa 2–4 kertaa enemmän kuin fossiilinen vety, ks. esim. kuva 12. (IEA 2023c)



Kuva 12:\* Vedyn tuotannon tasoitettut kustannukset teknologioittain vuosina 2021, 2022 ja vuonna 2030 Net Zero Emissions by 2050 (NZE) -skenaariossa (IEA:n globaali vetykatsaus 2023c).



IRENA:n 1,5 asteen skenaariossa maailmanlaajuinen vähäpäästöisen vedyn vuosittainen tuotantotavoite on 125 Mt vuonna 2030 ja 523 Mt vuonna 2050 (IRENA 2023b). Euroopan komissio arvioi, että vuoteen 2030 mennessä Eurooppa tarvitsee 500–550 TWh uutta uusiutuvaa sähkökapasiteettia, jotta RePowerEU-ohjelman tavoite 10 Mt:n vihreän vedyn tuotannosta voidaan saavuttaa EU:ssa. Lisäksi tarvitaan 10 Mt:a uusiutuvan vedyn tuontia (EC 2022).

Suomessa vetyä on toistaiseksi tuotettu pääasiassa maakaasusta höyryreformoinnin avulla. Maakaasun saatavuuden heikkeneminen ja hinnan nousu ovat lisänneet tarvetta siirtyä vedyn tuotantoon vesielektrolyysillä. Elektrolyysi kuluttaa paljon sähköä (n. 50 MWh/tH<sub>2</sub>), ja puhdas vedyntuotanto edellyttää kohtuuhintaista, hiilidioksidipäästötöntä sähköä.

Nopeasti lisääntyvän tuulivoimatuotannon ja uuden ydinvoimalan ansiosta mahdollisuus tuottaa puhdasta vetyä on parantunut Suomessa. Fingrid on arvioinut, että Suomen tuulivoimatuotanto nousee 60 TWh:iin vuonna 2030, ja realistinen tuotantopotentiaali on moninkertainen. Suomella on mahdollisuus nousta

merkittäväksi energiantuottajaksi EU-alueella. Uusiutuvan energian lisääminen on Suomessa paljon yksinkertaisempaa kuin Keski-Euroopassa, jossa paljon suurempi osa maa-alasta on valjastettu tuuli- ja aurinkovoiman tuotantoon ja jossa sähköntuotanto perustuu edelleen pitkälti fossiiliseen hiileen ja kaasuun.

Jos Suomi tuottaisi 10 prosenttia EU:n vuodelle 2030 asettamasta uusiutuvan vedyn tuotantotavoitteesta – eli miljoona tonnia vetyä – se vaatisi noin 50 TWh sähköä ja noin 8 GW asennettua elektrolyysikapasiteettia riippuen käyttötunneista ja järjestelmän tehokkuudesta. Suomen toistaiseksi suurin vihreä vedyn tuotantolaitos rakennetaan Harjavaltaan. Sen elektrolyysikapasiteetti tulee olemaan 20 MW, ja sen on tarkoitus olla toiminnassa vuonna 2024. Kahdeksan GW:n elektrolyysikapasiteetti edellyttäisi 400 vastaavaa investointia vuosikymmenen loppuun mennessä, joten vetyteknologioita on skaalattava pikaisesti.

Vedyntuotannon lisäksi on tarpeen kehittää vedyn varastointi- ja jakeluinfrastruktuuria. Gasgrid on esittänyt suunnitelmia Suomen vetyinfrastruktuurin kehittämiseksi ja sen liittämisiksi eurooppalaiseen vetyinfrastruktuu-

riin. Ensimmäinen keskikokoinen vetyputki on suunnitella Kemiran tehtaalta Joutsenosta Ovakon terästehtaalle Imatralla (n. 23 km), jossa vedyn on kaavailtu korvaavan maakaasua teräksen lämpökäsittelyssä.

Vedyn varastointi on haastavaa, ja vedyn tulla käyttö perustuu vedyn johdannaisiin, kuten metaaniin ja metanoliin, joita on helpompi varastoida ja kuljettaa. Osa vedyn energiasisällöstä kuitenkin häviää metaaniksi tai metanoliiksi muuttaessa. Metaani ja metanoli ovat nyky muodossaan suoraan tai lähes suoraan sovellettavissa moniin polttomoottoreihin, ja metanoli näyttää tarjoavan eniten mahdollisuuksia meriliikenteen hiilidioksidipäästöjen vähentämiseksi. Vetyä voidaan käyttää Fischer-Tropsch-synteesin avulla myös muiden polttoainelajien, kuten lentopolttoaineen, bensiinin ja dieselin, valmistukseen.

Vedyn lisäksi polttoainesynteesiin tarvitaan hiililähde, joka voi olla esimerkiksi biomassan käytön savukaasuista erotettua hiilidioksidia, biomassasta kaasuttamalla saatua synteesikaasua tai suoraan ilmakehästä talteen otettua hiilidioksidia. Hiilen kiertämisestä ja sen hallinnasta kerrotaan lisää seuraavassa aluvuossa.

### 6.2.2 Hiilidioksidipäästöjen hallinta

Hiilidioksidipäästöjen hallinnalla tarkoitetaan ihmisen toiminnasta aiheutuvien ilmastovaiikutusten lieventämistä eri tavoin. Osa hiilidioksidipäästöjen rajoittamisen, talteenoton, varastoinnin ja hyödyntämisen menetelmistä perustuu luonnollisiin prosesseihin ja osa teknologisiin ratkaisuihin.

Hiilidioksidin hallintatoimet voidaan jakaa karkeasti kolmeen pääpolkuun: 1) hiilidioksidin talteenotto päästöjä tuottavista laitoksista ja pysyvä varastointi maan alle (CCS, carbon capture and storage), 2) hiilidioksidin talteenotto ja sen käyttö fossiilisen hiilen korvaamiseen (CCU, carbon capture and utilisation) ja 3) hiilidioksidin poistotekniikat (CDR, carbon dioxide removal), joissa tavoitteena on poistaa ilmakehästä jo päästetty hiilidioksidi ja varastoida se pysyvästi (EC 2024). Eri poluilla hyödynnetään osittain samoja teknologioita ja infrastruktuureja, mutta ilmastovaiikutukset voivat olla erilaisia riippuen hiilen lähteestä (fossiilinen, biogeeninen, ilmakehä) ja käyttötapauksista (lyhyt, pitkä, pysyvä hiilen poisto hiilenkierrosta).

Net-Zero Industry Act -aloitteessa Euroopan komissio on ehdottanut, että vuodessa voidaan



varastoida geologisesti vähintään 50 miljoonaa tonnia hiilidioksidia vuoteen 2030 mennessä. Mallinnustulokset osoittavat, että vuoteen 2040 mennessä olisi otettava talteen noin 280 miljoonaa tonnia ja vuoteen 2050 mennessä noin 450 miljoonaa tonnia vuodessa. (EC 2024; EU Industrial Carbon Management Strategy 2024). Skaalaukselle on nopea tarve: vuoden 2050 tavoite on noin kymmenkertainen verrattuna Suomen nykyisiin päästöihin, jotka ovat noin 40 MtCO<sub>2</sub>/a. Tällä hetkellä kehitteillä, rakenteilla tai toiminnassa olevien CCS-hankkeiden maailmanlaajuinen hiilidioksidin talteenottokapasiteetti on 361 Mt/a (Global CCS Institute 2023). Maailmanlaajuinen hiilidioksidin talteenottokapasiteetti lähestyy jo merkittävää mittakaavaa, mutta suurin osa hankkeista on Euroopan ulkopuolella ja liittyy öljyn talteenottoon, jossa ilmastohyödyt voivat olla kyseenalaisia.

Tärkeimmät CDR-tekniikat (teknologiset hiilinielut) ovat bioenergia, johon liittyy hiilidioksidin talteenotto ja varastointi (BECCS, bioenergy with carbon capture and storage), suora hiilidioksidin talteenotto ilmasta (DACCS, direct air capture) sekä metsänistutus ja hiilen sitominen hiilidioksidipitoisiin aineisiin, puutuotteisiin, maaperään, biohiiliin ja muihin pitkäikäisiin materiaaleihin.

Jotta Suomi voisi saavuttaa omat ilmastotavoitteensa, tarvitaan kansallisten ja pohjoismaisten tutkimusten mukaan noin 4–14 Mt/a BECCS-kapasiteettia vuodesta 2035 vuoteen 2050. (Kujanpää ym. 2023). Suomen biopohjaiset päästöt suurista teollisuuslähteistä ovat tällä hetkellä noin 24 Mt/a, josta lähes 80 prosenttia tulee sellu- ja paperitehtailta. Lähimmät pysyvään varastointiin soveltuvat alueet ovat Norjan vesien läheisyydessä. Niiden hyödyntäminen edellyttäisi riittävän suuria määriä kuljetus- ja talteenottokustannusten pienentämiseksi. Suomessa kiinnostus näyttää tällä hetkellä kohdistuvan geologisen varastoinnin sijaan biohiileen ja erilaisten tuotteiden valmistukseen.

Viime vuosina Suomessa on kuitenkin käynnistetty useita hiilidioksidin hallinta- ja hyödyntämispilotteja sekä kannattavuustutkimuksia. Elinkeinoelämän keskusliiton Data Dashboardissa (2023) luetellaan investointisuunnitelmia muun muassa biohiilen tuotantoon Joensuu-

hun, Kotkaan, Utajärvelle ja Keravalle, vihreän metanolin tuotantolaitoksiin Kokkolaan, Rauhalle ja Lappeenrantaan sekä ainakin yhdeksään synteettisen metaanin tuotantolaitokseen eri puolille Suomea.

Hiilen talteenotto on edellä mainituissa hankkeissa tarkoitettu toteutettavaksi energia- ja sähkölaitosten, sementintuotannon ja jätteenpolttolaitosten yhteydessä. Suurin osa ilmoitetuista hankkeista on maltillisen kokoisia, eikä niiden toteutumisesta ole takeita. Lisäksi esimerkiksi Fortum pilotoi Carbon2X -hankkeessa jätteenpolton savukaasujen hyödyntämistä muovin tuotannossa. Hollolassa toimiva CarbonAide puolestaan pilotoi betonin valmistusmenetelmää, jossa hiilidioksidi sidotaan tuotteeseen.

### 6.2.3 Energian varastointi

Sähköenergiaa voidaan varastoida mekaanisena, kemiallisena, sähkömagneettisena tai lämpöenergiana. Sähkövarastoilla on useita käyttökohteita, joita ovat muun muassa kulutuselektronikka, sähkökulkuneuvot, teollisuuden varavoima sekä sähköverkkojen stabilointi ja uusiutuvan energian varastointi. Varastointitarve voi olla lyhytaikaista, kuten sähköverkon stabilointi sekunneista tunteihin, tai pitkäaikaista, kuten aurinkoenergian vuorokausivarastointi päivästä yöhön tai kausivarastointi kesästä talveen.

Maailmassa on arviolta lähes 200 GW:a sähköverkkoon kytkettyä sähkövarastotehoa, josta valtaosa, noin 90 prosenttia, on pumppuvesivoimaloita. Pumppuvesivoimaloiden kapasiteetti riittää vuorokausi-, viikko- tai kuukausitason varastointitarpeeseen. Niiden yleistymistä hidastavat sopivien sijoituspaikkojen puute sekä ympäristökysymykset. Suomessa Pyhäsalmen kaivokseen suunniteltiin teholtaan 75 MW:n maanalaista pumppuvesivoimalaa, mutta hanke raukesi vuonna 2023 kasvaneiden investointi- ja rahoituskustannusten seurauksena.

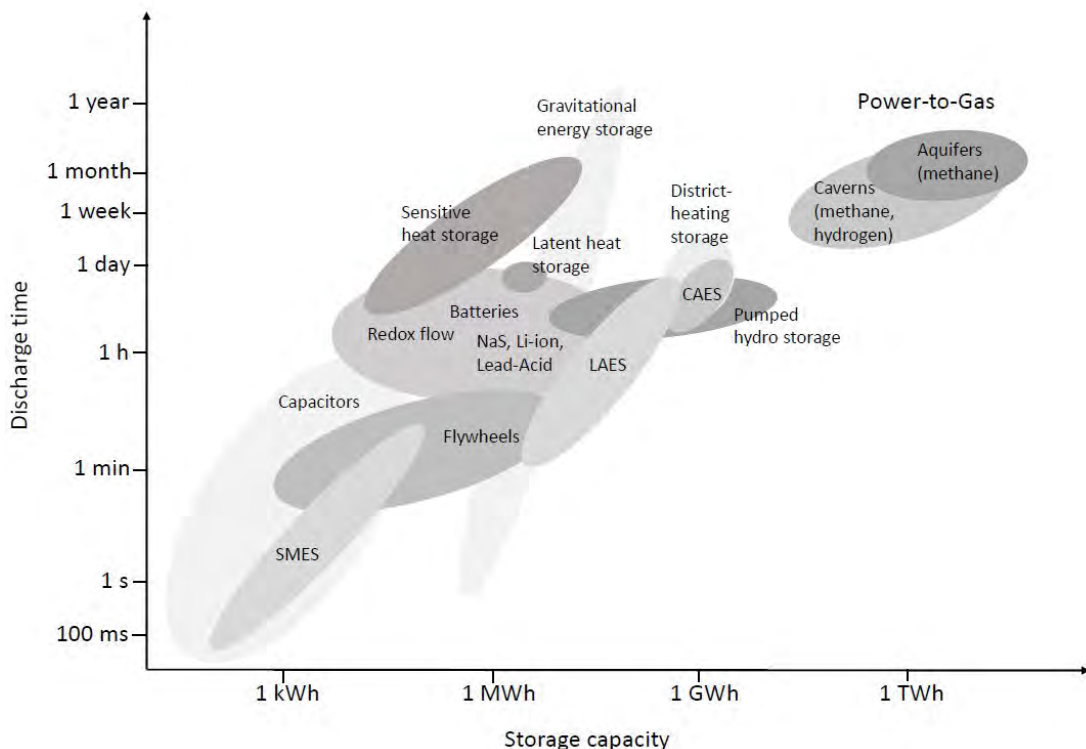
Litium-ioniakut, joiden markkinaosuus kiinteistä sähkövarastoista on noin viisi prosenttia, ovat nopeimmin kasvava sähkön varastointitekniologia. Muiden varastointitekniologioiden, kuten paineilmaparastojen, painovoimaan perustuvien mekaanisten varastojen, ilman nesteytyksen ja kryogeniikkaan perustuvien energiavarastojen

sekä vanadiini-virtausakkujen, rooli on toistaiseksi marginaalinen. Akkujen kehitystä ajavat etenkin liikenteen sähköistyminen ja autoteollisuuden tarve ajovoima-akuille. Litium-akkujen vuosituotannon on arvioitu kasvavan 200 GWh:sta 2 000–4 000 GWh:iin vuoteen 2030 mennessä, mikä vastaisi 25–50 miljoonan sähköauton tarpeita. Verkkoon kytkettyjen sähkövarastojen määrän on arvioitu jäävän kymmeneen prosenttiin sähköautojen akkumarkkinoista. Akkumarkkinoiden kasvua rajoittavat lähinnä raaka-aineiden riittävyys ja riittämättömät investoinnit raaka-ainetuotantoon. Etenkin kiinalaisyrietykset ovat investoimassa suorituskyvyltään hieman heikompaan mutta raaka-ainepohjaltaan laajempaan natriumioniakkuteknologiaan litiumioniakkujen rinnalla. Kun teknologia saadaan skaalattua massatuotantoon, voidaan natriumioniakkujen odottaa yleistyvän myös energiavarastomarkkinoilla.

Litium-akkujen käyttö sähköverkkoympäristössä mitoitetaan nykyään 0,5–4,0 tunnin kapasiteetin mukaan, jolloin akusto voi toimia sähköverkon

säätösähkö- ja reservimarkkinoilla, leikata käyttökohteen kulutushuippuja sekä toimia lyhytaikaisena energiavarastona ja varavoimana. Suomen suurin akkusähkövarasto, teholtaan 90 MW, on asennettu Olkiluodon ydinvoimalan yhteyteen tukemaan sähköverkkoa voimalayksiköiden ylös- ja alasajotilanteissa. Litium-akkuja ja superkondensaattoreita käytetään vesivoiman rinnalla säätö- ja reservisähkömarkkinoilla tasaamaan nopeita tehonvaihteluita, mikä pienentää vesivoimaloiden huollon tarvetta.

Maailmalla aurinkosähkön varastointiin suunnitellut litiumakut mitoitetaan tyypillisesti neljän tunnin kapasiteetin mukaan, jolloin ne riittävät energian varastointiin keskipäivältä illan kulutushuippua kattamaan. Sähkön kausivarastointiin soveltuvat lähinnä vety ja siitä valmistetut synteettiset polttoaineet, mutta tämänkin teknologia on vielä pilotointitasolla ja varastoinnin hyötysuhteet suhteellisen matalat. Eri varastointitekniologioiden yleiskatsaus varastointikapasiteetin ja purkamisajan suhteen esitetään kuvassa 13.



Kuva 13. Energian varastointi kapasiteetin ja varastointiajan suhteen. Lyhenteet kuvassa ovat seuraavat: superjohtavan magneetin energiavarasto (SMES, superconducting magnetic energy storage), nestemäisen ilman energiavarasto (LAES, liquid air energy storage) ja paineistetun ilman energiavarasto (CAES, compressed air energy storage).





Energiavarastojen taloudellisuus riippuu hankintahinnan lisäksi oleellisesti lataus- ja purkukertojen määrästä, jolloin lyhytaikaiset käyttökohteet tulevat ensimmäisinä kannattaviksi. Kausivarastot, joilla vuotuisia latauskertoja on vain muutamia, eivät ole taloudellisesti kannattavia nykyisellä energiamarkkinalla. Lämmön kausivarastointiin kalliiluoliin ollaan nyt investoimassa monilla paikkakunnilla, ja sen taloudelliseen kannattavuuteen vaikuttavat merkittävästi sähkön hinnan vaihtelut.

Jos sähköautoissa käytettäisiin kaksisuuntaisia latureita, joilla auton akustoa voidaan tarvittaessa purkaa takaisin sähköverkkoon, tarjoaisi teknologia merkittävän kapasiteettireservin sähköverkolle. Tämän mahdollisuuden käyttöönotto edellyttäisi kuitenkin uutta teknologiaa sekä autoissa että latauspisteissä, riittäviä kannusteita sähköautojen käyttäjille sekä akkujen parempaa kestävyyttä, jotta vältettäisiin akkujen käyttöiän lyheneminen lisäkäytön seurauksena.

#### **6.2.4 Energiansäästö ja energiatehokkuus**

EEnergiansäästöllä tarkoitetaan toimenpiteitä, joilla vähennetään energiaa kuluttavien palvelujen käyttöä. Monesti tämä voidaan tehdä ilman, että energiankäyttäjän kokema energiapalvelun taso heikkenee. Käytännön esimerkkejä tästä

ovat älykkäästi ohjattu huonevalaistus, huoneilämpötilan säätely tai huoneilman hiilidioksidipitoisuuteen perustuva ilmanvaihdon ohjaus. Energiatehokkuustoimien avulla puolestaan pyritään vähentämään energiapalveluihin tarvittavaa energiamäärää. Terminä energiansäästö tai energiatehokkuus eivät kumpikaan kuitenkaan ota kantaa tuotettujen energiapalvelujen kokonaismäärään. Kokonaisenergiankulutus voi kasvaa, vaikka energiaa säästetään ja energiatehokkuus paranee.

Energiajärjestelmän sähköistyminen ja digitalisaatio edistävät sekä energiansäästöä että energiatehokkuutta. Sähköistymisen ansiosta energiatehokkuus paranee jatkossa erityisesti liikenteessä, lämmityksessä ja valaistuksessa. Näissä sovelluksissa se perustuu nykyisten teknologioiden korvaamiseen energiatehokkaammilla. Esimerkkejä tällaisista ovat sähköajoneuvot, lämpöpumput ja LED-valaistukset. Teollisuussovelluksissa voidaan lisätä taajuusmuuttajan avulla säädettävien pumppujen, puhaltimien ja kompressorien käyttöä, mikä parantaa sovelusten energiatehokkuutta. Energiansäästön ja energiatehokkuuden rinnalle on tullut myös kulusjoustopon mahdollistaminen. Erityisesti tuuleen ja aurinkoon perustuvassa sähköenergiajärjestelmässä energian saatavuus ja kustannus riippuvat voimakkaasti vallitsevista sääolosuhteista.

Suomessa energiansäästöä ja energiatehokkuutta säädellään EU:n energiatehokkuusdirektiivillä, jonka Suomi on toimeenpannut omaan lainsäädäntöönsä energiatehokkuuslailla. Keskeisessä roolissa energiatehokkuuden ja energian säästön edistämiseksi ovat teollisuuden ja yhteisöjen tekemät energiatehokkuussopimukset, joiden piiriin kuuluu noin 60 prosenttia koko Suomen energiankulutuksesta. Sopimuksissa yritykset sitoutuvat mittaamaan, raportoimaan ja kehittämään energiansäästöä ja energiatehokkuutta esimerkiksi omien talous- sekä ympäristötavoitteidensa mukaisesti. Suomen tasolla energiansäästöä ja energiatehokkuutta koordinoi Motiva.

Euroopan unioni asettaa yhteiset energiatehokkuustavoitteet jäsenvaltioilleen. Viimeisin tavoite on esitetty energiatehokkuusdirektiivissä EU/2023/1791 (EC 2023). Uudistettu direktiivi yli kaksinkertaistaa vuotuisen energiansäästövelvoitteen. Näiden tavoitteiden perusteella Suomi valmistelee omaa lainsäädäntöään. Suomi viimeistelee toimensa kansallisiin energia- ja ilmastosuunnitelmiin, jotka on määrä toimittaa Euroopan komissiolle kesäkuuhun 2024 mennessä. EU:n energiatehokkuusdirektiivi on kuitenkin saanut kritiikkiä jopa suoraan Suomen työ- ja elinkeinoministeriöstä. Suomen kipukohtat ovat aikaisempien saavutusten huomiotta jättäminen,

pohjoinen sijainti, lopullisen energiankulutuksen korjaaminen sekä energiatehokkuuden edistämisen lainmukaisten vaihtoehtojen puuttuminen.

Suomi on pitkään työskennellyt energiatehokkuuden edistämiseksi, tehnyt suuria vähennyksiä energian käytössä ja ollut siinä esimerkillinen. Suomalaiset saavutukset ovat usein ylittäneet monet muiden maiden toimet. EU ei ota tätä huomioon ja antaa määräyksiä, jotka edellyttävät samaa energiatehokkuuden parannusta lähtökohdasta huolimatta.

Tyypillinen esimerkki on, että suomalaisissa rakennuksissa on jo pitkään käytetty kolmea lasia ikkunoissa, mistä on vaikea parantaa, kun taas monet Euroopan maat alkavat nyt panostaa kaksoislasitukseen. Suhteellisen energiankulutuksen vähentäminen kotitalouksissa on siten kalliimpaa Suomessa. Erityisesti suuret energiatehokkuuden parannukset suomalaisissa rakennuksissa nähdään ongelmallisina. Painostus vanhojen rakennusten uudelleenkäyttöön tai säilyttämiseen ei auta vähentämään rakennusten kokonaisenergiankulutusta. Erityisen ongelmallinen on hallinto- ja kunnallisrakennusten tilanne. Jos tavoitteena on rakentaa rakennuksia, jotka kestävät 100 vuotta, uudelleenrakentaminen joka 20:s vuosi uusien energiatehokkuussääntöjen vuoksi on ongelmallista.



Energiankulutuksen vähentäminen näyttää energiatehokkuuden näkökulmasta hyvältä. EU on vähentänyt loppukäyttäjien energiankulutusta useiden vuosien ajan. Pitkällä aikavälillä määräys vähentää energiankulutusta tarkoittaa taloudellisen toiminnan vähenemistä EU:ssa ja tuonin edistämistä.

Vaikka bensiinautojen muuttaminen sähköautoiksi ja eristysten parantaminen vähentävät lopullista energiankulutusta, vetytaloudessa ei näin tapahdu. Suomessa olisi mahdollista valmistaa suuri määrä sähköisiä polttoaineita niin, että vedyntuotantoon käytetään edullista, fossiilivapaata sähköä ja talteen otettua biogeenistä hiilidioksidia. Näitä voitaisiin viedä muihin EU-maihin. Tämä toiminta voisi lisätä 4000–9 000 miljoonaa euroa kotimaan kauppaan vuoteen 2050 mennessä. Vaikka vetytalouteen liittyvää toimintaa tuetaan EU:n varoin, lisää se Suomen lopullista energiankulutusta, mikä puolestaan tekee Suomelle ongelmalliseksi saavuttaa EU:ssa asetettu energiasäästötavoitteen velvoite.

Teollisuus epäröi investoida energiatehokkuuteen, koska tyypillisesti halutaan saavuttaa 2–3 vuoden takaisinmaksuaika, jotta korvaavat investoinnit tulevat kannattaviksi. Tällä hetkellä kuitenkin useimpien suurten mittaluokan energiatehokkuusinvestointien takaisinmaksuajat vaihtelevat viidestä yhdeksään vuoteen. Tämä

tarkoittaa sitä, että Suomessa teollisuuden energiatehokkuutta voitaisiin jouduttaa antamalla tukea noin 30 prosentille teollisia investointeja, mutta tämänhetkisen teollisuuspolitiikan mukaan tämä ei ole mahdollista. Tällä hetkellä tukea myönnetään suurten loppukäyttäjien energiatehokkuusinvestointeihin, kuten automarkettien energiatehokkuuden parantamiseen katolle asennettujen aurinkopaneelien avulla.

### 6.2.5 Energiayhteisöt

Energiayhteisöt ovat aktiivisten kansalaisten, pienten yritysten, yhdistysten tai esimerkiksi asunto-osakeyhtiöiden muodostamia ryhmiä. Energiayhteisöjä muodostetaan usein paikka-kohtaisesti, jolloin samalla alueella tai samassa kiinteistöissä asuvat asukkaat investoivat omaan hajautettuun energiantuotantoon, energiatehokkuuteen, varastointiin, kulutusjoustoön tai muunlaisiin älykkäisiin energiaratkaisuihin. Tällaisia ovat esimerkiksi omien aurinkopaneelien asentaminen, lämmön tuottaminen erilaisilla lämpöpumpuilla tai energiatehokkuutta parantavat energiaremontit.

Energiayhteisöt ovat nousseet yhdeksi keskeisimmäksi puhtaan energian edistäjäksi EU:ssa, joka tukee jäsenmaissaan energiayhteisöjen muodostamista muun muassa EU:n Clean Energy

KUVA: UNSPLAHS | ANNA JIMÉNEZ CALAF



for all -paketilla (EC 2019a) ja European Green Deal -ohjelmalla (EC 2019b). EU on määritellyt ohjelmissaan kahdenlaisia energiayhteisöjä. Ensimmäinen on kansalaisten muodostamat energiayhteisöt, joilla tarkoitetaan ryhmää tai organisaatiota, jonka sen jäsenet tai osakkeenomistajat voivat perustaa ja käynnistää sen piirissä uusiutuvan energian hankkeen. Toinen on uusiutuvan energian yhteisöt, joissa kaikkien jäsenten on sijaittava maantieteellisesti lähekkäin ja sijaittava uusiutuvan energian laitosten läheisyydessä (EC 2019a). Energiayhteisöjen ja kansalaisten määrä vaihtelee Euroopassa, mutta esimerkiksi Schwanitz ym. (2023) arvioivat, että Euroopassa toimii tällä hetkellä noin 10 500 kansalaisvetoista energia-aloitetta, joissa on mukana yli 2 miljoonaa kansalaista ja joiden piirissä on 7,2–9,9 GW asennettua uusiutuvaa energiakapasiteettia.

Energiayhteisöjen, energiakansalaisten, energian tuottajakuluttajien eli prosuumereiden ja energian joustoa tarjoavien, niin sanottujen flexuumereiden odotetaan edistävän kotitalouksien ja yksittäisten ihmisten aktiivisempaa roolia energiajärjestelmässä. Energiayhteisöjen odotetaan tuottavan monia hyötyjä: ne voivat esimerkiksi lisätä energiaan liittyvän päätöksenteon avoimuutta ja energiademokratiaa eli sallia kansalaisten aktiivisemmän roolin energiapäätöksenteossa. Energiayhteisöjen toivotaan myös lisäävän voittojen ja tulojen tasaisempaa jakautumista yhteiskunnassa, lisäävän uusiutuvan energian yhteiskunnallista hyväksyttävyyttä sekä voimaannuttavan yhteisön jäseniä luomalla uusia työpaikkoja ja siten lisäävän kestävyttä (Bommel ja Höffken 2021). Tämän lisäksi omaa sähköä tuottaneet kotitaloudet ja yhteisöt kesti-

vät energiakriisiä paremmin, sillä heidän ei tarvinnut maksaa sähkön korkeita hintoja, vaan ne jopa hyötyivät niistä myydessään itse tuotettua sähköä verkkoon.

Vuonna 2021 sähkönsiirron asetusta muutettiin Suomessa siten, että kotitaloudet voivat jakaa energiaa yhteisön jäsenten ja kansalaisten kesken. Vuoden 2021 alusta lähtien asukkaat ovat voineet jakaa tuottamaansa energiaa samoissa ja läheisissä kiinteistöissä asuvien naapureiden kesken ilman siirtomaksuja ja veroja nettolas- kutuksen avulla (TEM 2020). Lisäksi uudessa kansallisessa ilmasto- ja energiastrategiassa (TEM 2022, s. 35) toivotaan lisää tutkimusta uusien energiayhteisömallien mahdollisuuksista ja edistetään toimenpiteitä, joilla kannustetaan hajautettua energiantuotantoa, mikrotootantoa ja energiatehokkuutta.

Suurin osa Suomen energiayhteisöistä on jo olemassa olevia yhteisöjä, esimerkiksi asunto-osakeyhtiöitä, jotka tuottavat ainakin osittain oman energiansa. Noin neljännes Suomen rakennuskannasta on asunto-osakeyhtiöitä (yhteensä noin 90 000), joten energiayhteisöille on Suomessa valtava potentiaali (Lukkarinen ym. 2020, 2023). Kaupungeissa energiayhteisöt saattavat kuitenkin toimia haasteellisessa ympäristössä, sillä vaikka kaupunkien ympäristötavoitteet tukevat energiayhteisöjen muodostamista, kaupunkien päätöksenteko- ja suunnittelurakenteet, materiaalivaatimukset ja muu kaupungin rakentaminen kiinteistön ympärillä voi luoda haasteita ja jännitteitä energiayhteisöjen muodostamiseen (Apajalahti ja Matschoss 2021; Apajalahti ym. 2023).



# 7. LÄHTEET

- Abbasi MH, Taki M, Rajabi A, Li L, Zhang J (2019) Coordinated operation of electric vehicle charging and wind power generation as a virtual power plant: A multi-stage risk constrained approach. *Appl Energy* 239:1294–1307. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.238>
- Abrardi L (2019) Behavioral barriers and the energy efficiency gap: a survey of the literature. *J Ind Bus Econ* 46:25–43 (2019). <https://doi.org/10.1007/s40812-018-0107-z>
- ACER (2021) ACER's Preliminary Assessment of Europe's high energy prices and the current wholesale electricity market design. November 2021. <https://acer.europa.eu/sites/default/files/2022-05/ACER%27s%20Preliminary%20Assessment%20of%20Europe%27s%20high%20energy%20prices%20and%20the%20current%20wholesale%20electricity%20market%20design.pdf>
- Apajalahti E-L, Matschoss K (2021) Yhteisöenergiaa kaupunkiin: Merihaan merilämpövoimalahanke. Helsinki: Smart Energy Transition publication. Aalto University Publication series CROSSOVER 2/2021
- Apajalahti E-L, Ruggiero S, Lukkarinen J, Laakso S (2023) All for one and one for all? Exploring tensions in urban energy communities. In: Sokotowski MM, Visvizi A. *Routledge Handbook of Energy Communities and Smart Cities*. Routledge. ISBN 9781032247878
- Arvesen A, Hertwich EG (2012) Assessing the life cycle environmental impacts of wind power: A review of present knowledge and research needs. *Renew Sustain Energy Rev* 16:5994–6006. <https://doi.org/10.1016/j.RSER.2012.06.023>
- Asdrubali F, Baldinelli G, D'Alessandro F, Scrucca F (2015) Life cycle assessment of electricity production from renewable energies: Review and results harmonization. *Renew Sustain Energy Rev* 42:1113–1122. <https://doi.org/10.1016/j.RSER.2014.10.082>
- Ashour Novirdoust A, Bichler M, Bojung C, Buhl HU, Fridgen G, Gretscho V, Hanny L, Knörr J, Maldonado F, Neuhoﬀ K, Neumann C, Ott M, Richstein JC, Rinck M, Schöpf M, Schott P, Sitzmann A, Wagner J, Wagner J, Weibelzahl M (2021) Electricity Spot Market Design 2030–2050. <https://doi.org/10.24406/FIT-N-621457>
- Aurinkoenergiayhdistys (2023) Uutiset. <https://sary.fi/ajankohtaista/uutiset> (29 September 2023, date last accessed).
- Azzuni A, Breyer C (2020) Global Energy Security Index and its application on national level. *Energies* 13:2502. <https://doi.org/10.3390/en13102502>
- Bertsch J, Brown T, Hagspiel S, Just L (2017) The relevance of grid expansion under zonal markets. *Energy J* 38:129152. <https://doi.org/10.5547/01956574.38.5.jber>
- Biogas plants in a map (2024) <https://www.google.com/maps/d/u/0/viewer?mid=1ZHpWSB6Av2QQIZSGySCriDCW7piuXnBM&ll=63.56529399131587%2C27.660860650938588&z=6> (7.4.2024)
- van Bommel N, Höffken JI (2021) Energy justice within, between and beyond European community energy initiatives: A review. *Energy Res Soc Sci* 79:102157. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.102157>
- Bruckner T, Bashmakov IA, Mulugetta Y, Chum H, de la Vega Navarro A, Edmonds J, Faaij A, Functammasan B, Garg A, Hertwich E, Honnery D, Infield D, Kainuma M, Khennas S, Kim S, Nimir HB, Riahi K, Strachan N, Wisner R, Zhang X (2014) Energy Systems. In: *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Edenhofer O, Pichs-Madruga R, Sokona Y, Farahani E, Kadner S, Seyboth K, Adler A, Baum I, Brunner S, Eickemeier P, Kriemann B, Savolainen J, Schlömer S, von Stechow C, Zwickel T, Minx JC (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA
- Buttler A, Spliethoff H (2018) Current status of water electrolysis for energy storage, grid balancing and sector coupling via power-to-gas and power-to-liquids: A review. *Renew Sustain Energy Rev* 82(part3):2440–2454. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.003>
- Clean Energy Review (n.d.) Most efficient solar panels 2024. <https://www.cleanenergyreviews.info/blog/most-efficient-solar-panels>
- Confederation of Finnish Industries (2023) The Data Dashboard. <https://ek.fi/en/>
- Corona L, Mochon A, Saez Y (2022) Electricity market integration and impact of renewable energy sources in the Central Western Europe region: Evolution since the implementation of the Flow-Based Market Coupling mechanism. *Energy Reports* 8:1768–1788. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.12.077>
- Cramton P (2017) Electricity market design. *Ox Rev Econ Policy* 33(4):589–612. <https://doi.org/10.1093/oxrep/grx041>
- Dai K, Bergot A, Liang C, Xiang W-N, Huang Z (2015) Environmental issues associated with wind energy – A review. *Ren Energy* 75:911–921. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.10.074>
- Dhar A, Naeth MA, Jennings PD, Gamal El-Din M (2020) Perspectives on environmental impacts and a land reclamation strategy for solar and wind energy systems. *Sci Total Environ* 718:134602. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134602>
- Dohm R, Drake D (2019) Wind energy effects on birds. In: Moorman CE, Grodsky SM, Rupp SP (eds) *Renewable energy and wildlife conservation*. John Hopkins University Press, p 95–121
- EC (2005) Directive 2005/89/EC of the European Parliament and of the Council of 18 January 2006 concerning measures to safeguard security of electricity supply and infrastructure investment. <http://data.europa.eu/eli/dir/2005/89/oj>
- EC (2019a) European Commission, Directorate-General for Energy, Clean energy for all Europeans, Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2833/9937>
- EC (2019b) European Commission, Communication from the Commission. The European Green Deal. COM(2019) 640 final. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM:2019:640:FIN>

EC (2020) European Commission, Launching the Just Transition Mechanism - for a green transition based on solidarity and fairness. [https://ec.europa.eu/info/news/launching-just-transition-mechanism-green-transition-based-solidarity-and-fairness-2020-jan-15\\_pl](https://ec.europa.eu/info/news/launching-just-transition-mechanism-green-transition-based-solidarity-and-fairness-2020-jan-15_pl)

EC (2021) European Commission, Communication from the Commission to the European Parliament, The European Council, The Council, The European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Tackling rising energy prices: A toolbox for action and support. COM(2021) 660 final. Technical Report, Brussels, Belgium.

EC (2022) European Commission, Communication from the commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European economic and social committee and the Committee of the Regions, REPowerEU Plan. [COM/2022/230 final](COM/2022/230).

EC (2023) Directive (EU) 2023/1791 of the European Parliament and of the Council of 13 September 2023 on energy efficiency and amending Regulation (EU) 2023/955 (recast). [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=OJ%3AJOL\\_2023\\_231\\_R\\_0001](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=OJ%3AJOL_2023_231_R_0001)

EC (2024) European Commission, EU Industrial Carbon Management Strategy. Questions and Answers on the EU Industrial Carbon Management Strategy. [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/qanda\\_24\\_586](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/qanda_24_586)

Ecoinvent (2019) Ecoinvent 3.6 life cycle inventory database. <https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-database/data-releases/ecoinvent-3-6/>

EDF (2024) Nuclear new built projects. <https://www.edfenergy.com/energy/nuclear-new-build-projects>

Finnish Energy (2023) Report on the employment effects of energy sector. Gaia Consulting. (only in Finnish) <https://energia.fi/julkaisut/selvitys-energiateollisuuden-tyollisyysvaikutuksista/> and report: [https://energia.fi/files/5827/Energiateollisuuden\\_tyollisyys\\_-\\_Loppuraportti\\_12.3.2021.pdf](https://energia.fi/files/5827/Energiateollisuuden_tyollisyys_-_Loppuraportti_12.3.2021.pdf)

Energy Taxation (n.d.) Valtiovarainministeriö. Retrieved June 13, 2023, from <https://vm.fi/energiaverotus>

Energy Authority (2023a) National Report on the state electricity and gas markets in Finland to the Agency for the Cooperation of Energy Regulators and to the European Commission. 2757/040800/2023 12.7.2023. <https://energiavirasto.fi/documents/11120570/13026619/National+Report+on+electricity+and+gas+markets+in+2022+in+Finland+20230712.pdf/f2ad1a51-a453-0979-8fbd-2e1d4e00672d/National+Report+on+electricity+and+gas+markets+in+2022+in+Finland+20230712.pdf?t=16892>

Energy Authority (2023b) Pörssihintaisten sähkösopimusten osuus nousi lähes 14 prosenttiin vuonna 2022. 30.6.2023 (only in Finnish). <https://energiavirasto.fi/-/porssihintaisten-sahkosopimusten-osuus-nousi-lahes-14-prosenttiin-vuonna-2022>

Energy Authority (2023c) Risk Preparedness Plan of Finland. <https://energiavirasto.fi/documents/11120570/12722768/Risk+Preparedness+Plan+of+Finland+public.pdf/e4c9880b-e8cb-f5aa-dfb0-597b0ad2ea33/Risk+Preparedness+Plan+of+Finland+public.pdf?t=1675325213136>

Energy Authority (2023d) Production of solar micro generation grew rapidly in 2022. News 15.6.2023. <https://energiavirasto.fi/-/aurinkosahkon-pientuotanto-kasvoi-voimakkaasti-vuonna-2022>

Energy Market Act (2013) Sähkömarkkinalaki 9.8.2013/588 (only in Finnish) <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2013/20130588>

European Union (2007) Founding agreements. [https://european-union.europa.eu/principles-countries-history/principles-and-values/founding-agreements\\_en](https://european-union.europa.eu/principles-countries-history/principles-and-values/founding-agreements_en)  
[https://european-union.europa.eu/principles-countries-history/principles-and-values/founding-agreements\\_fi](https://european-union.europa.eu/principles-countries-history/principles-and-values/founding-agreements_fi)

Eurostat (2022) Translate Energy consumption in households. [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy\\_consumption\\_in\\_households](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy_consumption_in_households)

Fan X, Liu B, Liu J, Ding J, Han X, Deng Y, et al. (2020) Battery Technologies for Grid-Level Large-Scale Electrical Energy Storage. Trans Tianjin Univ 26:92-103. <https://doi.org/10.1007/s12209-019-00231-w>

Felling T, Weber C (2018) Consistent and robust delimitation of price zones under uncertainty with an application to Central Western Europe. Energy Economics 75:583-601. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2018.09.012>

Fingrid (2022) Frequency quality analysis 2022. <https://www.fingrid.fi/en/grid/power-transmission/maintenance-of-power-balance/>

Fingrid (2023a) Questions and answers about electricity shortages. <https://www.fingrid.fi/en/grid/information-regarding-electricity-shortages/questions-and-answers-about-electricity-shortages/>

Fingrid (2023b) Offshore wind power and solar power plants gain momentum. <https://www.fingridlehti.fi/en/offshore-wind-power-and-solar-power-plants-gain-momentum/>

Fingrid (n.d.-a) *Johdanto sähkömarkkinoihin*. Retrieved January 18, 2023, from <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/markkinoiden-yhtenaisyyt/johdanto-sahkomarkkinoihin/#paivansisaiset-markkinat>

Fingrid (n.d.-b) Reserves and balancing power. [https://www.fingrid.fi/en/electricity-market/reserves\\_and\\_balancing/](https://www.fingrid.fi/en/electricity-market/reserves_and_balancing/) [accessed 9.4.2024]

Fingrid-Verkkokiikari. <https://www.fingrid.fi/en/grid/grid-connection-agreement-phases/grid-scope/>

Finnish Wind Power Association (2020) Capacity factors of wind turbines installed in Finland 2011-2018. <https://tuulivoimayhdistys.fi/en/ajankohtaista/publications/capacity-factors-2019>

Finnish Wind Power Association (2021) Dismantling and recycling wind power plants [in Finnish]. <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietopankki/tuulivoimaloiden-purku-ja-kierratys>

Finnish Environment Institute (2023) Ympäristön tila nettiraportti. <https://www.ymparisto.fi/fi/ympariston-tila/kiertotalous/luonnonvarojen-kaytto>

Finnish Government (2023) A strong and committed Finland: Programme of Prime Minister Petteri Orpo's Government 20 June 2023. Publications of Finnish Government 2023:60. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-383-763-8>

Fortum (2022) Fortum käynnistää selvityksen uuden ydinvoiman tulevaisuuden edellytyksistä. <https://www.fortum.fi/media/2022/10/fortum-kaynnistaa-selvityksen-uuden-ydinvoiman-tulevaisuuden-edellytyksista>

- Fortum (2023) Fortum and Rolls-Royce SMR to explore joint opportunities for SMRs in Finland and Sweden. <https://www.fortum.com/media/2023/03/fortum-and-rolls-royce-smr-explore-joint-opportunities-smrs-finland-and-sweden>
- Gallop P, Gray E, Nikolovska E, Mustață A, Petcu R (2021) The Political Economy of Energy Transition in Southeast Europe – Barriers and Obstacles. Friedrich Ebert Stiftung and CEE Bankwatch Network.
- Gasparatos A, Doll CNH, Esteban M, Ahmed A, Olang TA (2017) Renewable energy and biodiversity: Implications for transitioning to a Green Economy. *Renewable Sustainable Energy Rev* 70:161–184. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.08.030>
- Giddings B, Hopwood B, O'Brien G (2002) Environment, economy and society: fitting them together into sustainable development. *Sustainable Development* 10:187–196
- Global CCS Institute (2023) Global Status of CCS Report 2023. <https://status23.globalccsinstitute.com/> [accessed 9.4.2024]
- Grodsky SM, Fritts SR and Hernandez RR (2019) Renewable energy ecology, the next frontier in wildlife science. In: Moorman CE, Grodsky SM, Rupp SP (eds) *Renewable energy and wildlife conservation*. John Hopkins University Press, p 247–260
- Grossman PZ (2015) Energy shocks, crises and the policy process: A review of theory and application. *Energy Policy* 77, 56–69. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.11.031>.
- GSDR (2023) Times of crisis, times of change: Science for accelerating transformations to sustainable development. Global Sustainable Development Report written by independent group of scientists appointed by the Secretary-General of the United Nations. <https://sdgs.un.org/gsdrgsd2023/ accessed 2.10.2023>
- Guzmán H, Salomone F, Batuecas E, Tommasi T, Russo N, Bensaid S, Hernández S (2021) How to make sustainable CO<sub>2</sub> conversion to Methanol: Thermocatalytic versus electrocatalytic technology. *J Chem Eng* 417:127973. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.127973>
- GWEC (2023) Global wind power report. [https://gwec.net/wp-content/uploads/2023/04/GWEC-2023\\_interactive.pdf](https://gwec.net/wp-content/uploads/2023/04/GWEC-2023_interactive.pdf)
- Hach D, Chyong CK, Spinler S (2016) Capacity market design options: A dynamic capacity investment model and a GB case study. *Eur J Oper Res* 249(2):691–705. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.08.034>
- Hanski I (2015) Habitat fragmentation and species richness. *J Biogeogr* 42:989–994. <https://doi.org/10.1111/jbi.12478>
- Hein CD, Hale AM (2019) Wind energy effects on bats. In: Moorman CE, Grodsky SM and Rupp SP (eds) *Renewable energy and wildlife conservation*. John Hopkins University Press, p 122–145
- Heiskanen E, Apajalahti E-L, Matschoss K, Lovio R (2018) Incumbent energy companies navigating energy transitions: strategic action or bricolage? *Environmental Innovation and Societal Transitions* 28, 57–69.
- Helen (2022) Helen and Fortum are looking into potential SMR cooperation. Media release 22.11.2022. <https://www.helen.fi/en/news/2022/helen-and-fortum-are-looking-into-potential-smr-cooperation>
- Heinänen S, Żydeler R, Kleinschmidt B, Dorsch M, Burger C, Morkūnas J, Quillfeldt P, Nehls G (2020) Satellite telemetry and digital aerial surveys show strong displacement of red-throated divers (*Gavia stellata*) from offshore wind farms. *Mar Environ Res* 160. <https://doi.org/10.1016/j.marenv-res.2020.104989>
- Hernandez RR, Easter SB, Murphy-Mariscal ML, Maestre FT, Tavassoli M, Allen EB, Barrows CW, Belnap J, Ochoa-Hueso R, Ravi R, Allen MF (2014) Environmental impacts of utility-scale solar energy. *Renewable Sustainable Energy Rev* 29:766–779. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.041>
- Hertwich EG, Gibon T, Bouman EA, Arvesen A, Suh S, Heath GA, Bergesen JD, Ramirez A, Vega MI, Shi L (2015) Integrated life-cycle assessment of electricity-supply scenarios confirms global environmental benefit of low-carbon technologies. *PNAS* 112:6277–6282. <https://doi.org/10.1073/PNAS.1312753111/-/DCSUPPLEMENTAL>
- Hodge S, Jain H, Brancucci C, Seo G, Korpås M, Kiviluoma J, Holttinen H, Smith J, Orths A, Estanqueiro A, Söder L, Flynn D, Vrana T, Kenyon R, Kroposki B (2020) Addressing technical challenges in 100% variable inverter-based renewable energy power systems. *WIREs Energy and Environment* 9(5). <https://doi.org/10.1002/wene.376>
- Honkapuro S, Jaanto J, Annala S (2023) A Systematic Review of European Electricity Market Design Options. *Energies* 16(9). <https://doi.org/10.3390/en16093704>
- Hyvärinen E, Juslén A, Kemppainen E, Uddström A, Liukko U-M (eds) (2019) *Suomen lajien uhanalaisuus – Punainen kirja 2019*. Ympäristöministeriö & Suomen ympäristökeskus. Helsinki. 704 pp.
- IEA (2016) *Re-powering Markets—Market design and regulation during the transition to low carbon power systems*.
- IEA (2021) *Net Zero by 2050 A Roadmap for the Global Energy Sector*. [https://iea.blob.core.windows.net/assets/deebef5d-0c34-4539-9d0c-10b13d840027/NetZeroBy2050ARoadmapfortheGlobalEnergySector\\_CORR.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/deebef5d-0c34-4539-9d0c-10b13d840027/NetZeroBy2050ARoadmapfortheGlobalEnergySector_CORR.pdf)
- IEA (2022a) For the first time in decades, the number of people without access to electricity is set to increase in 2022. IEA, Paris. <https://www.iea.org/commentaries/for-the-first-time-in-decades-the-number-of-people-without-access-to-electricity-is-set-to-increase-in-2022>
- IEA (2022b) *World Energy Employment*. Updated in August 2022. <https://www.iea.org/reports/world-energy-employment/overview>
- IEA (2022c) *Snapshot of Global PV Markets 2022*. <https://iea-pvps.org/snapshot-reports/snapshot-2022/>
- IEA (2022d) *The Future of Heat Pumps - World Energy Outlook Special Report, 2022*. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/4713780d-c0ae-4686-8c9b-29e782452695/TheFutureofHeatPumps.pdf>
- IEA (2023a) *Emergency response and energy security - Ensuring the uninterrupted availability of energy sources at an affordable price*. <https://www.iea.org/about/emergency-response-and-energy-security>, [accessed 9.4.2024]
- IEA (2023b) *Energy Technology Perspectives 2023*. <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2023> [accessed 4.1.2024]
- IEA (2023c) *Global Hydrogen Review 2023*. <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2023>, [accessed 10.4.2024].
- IEA (2023d) *World Energy Outlook*. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/86ede39e-4436-42d7-ba2a-edf61467e070/WorldEnergyOutlook2023.pdf>

- IEA (2023e) Net Zero Roadmap: A Global Pathway to Keep the 1.5 °C Goal in Reach. [https://iea.blob.core.windows.net/assets/9a698da4-4002-4e53-8ef3-631d8971bf84/NetZeroRoadmap\\_AGlobalPathwaytoKeepthe1.5CGoalinReach-2023Update.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/9a698da4-4002-4e53-8ef3-631d8971bf84/NetZeroRoadmap_AGlobalPathwaytoKeepthe1.5CGoalinReach-2023Update.pdf)
- IEA (2023f) Finland 2023 – Energy Policy Review. <https://www.iea.org/reports/finland-2023>
- Ioannidis R, Koutsoyiannis D (2020) A review of land use, visibility and public perception of renewable energy in the context of landscape impact. *Applied Energy* 276:115367. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115367>
- IPCC (2022) Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Shukla PR, Skea J, Slade R, Al Khourdajie A, van Diemen R, McCollum D, Pathak M, Some S, Vyas P, Fradera R, Belkacemi M, Hasija A, Lisboa G, Luz S, Malley J (eds.)] Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi: 10.1017/9781009157926
- IRENA (2020) Innovation landscape brief: Community-ownership models, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Jul/IRENA\\_Community\\_ownership\\_2020.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Jul/IRENA_Community_ownership_2020.pdf)
- IRENA (2022) Renewable energy and jobs – Annual review 2022. <https://www.irena.org/publications/2022/Sep/Renewable-Energy-and-Jobs-Annual-Review-2022>
- IRENA (2023a) Renewable capacity statistics 2023. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. <https://www.irena.org/Publications/2023/Mar/Renewable-capacity-statistics-2023>
- IRENA (2023b) World Energy Transitions Outlook 2023: 1.5°C Pathway. June 2023. <https://www.irena.org/Publications/2023/Jun/World-Energy-Transitions-Outlook-2023>
- Isaacs SA, Staples MD, Allroggen F, Mallapragada DS, Falter CP, Barrett SRH (2021) Environmental and Economic Performance of Hybrid Power-to-Liquid and Biomass-to-Liquid Fuel Production in the United States. *Environ Sci Technol* 55:8247–8257. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c07674>
- Jimenez Iturriza J, Polo L, Beermann M, Lettmayer G, Carrus G, Tiberio L, Biresselioglu ME, Demir MH, Solak B, Dimitrova E et al. (2019) Collective Energy Practices in Europe. ECHOES Project Deliverable 5.4.
- Johansson M, Gentile N, Neij L (2021) Energy efficiency behaviour in the built environment—an assessment of current evaluation practices in the Nordic countries. *Energy Efficiency* 14:27. <https://doi.org/10.1007/s12053-021-09938-z>
- Keles D, Bublitz A, Zimmermann F, Genoese M, Fichtner W (2016) Analysis of design options for the electricity market: The German case. *Applied Energy* 183:884–901. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.08.189>
- Koltsaklis NE, Dagoumas AS (2018) Incorporating unit commitment aspects to the European electricity markets algorithm: An optimization model for the joint clearing of energy and reserve markets. *Applied Energy* 231:235–258. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.09.098>
- Kosanic A, Petzold J, Martín-López B, Razanajatovo M (2022) An inclusive future: disabled populations in the context of climate and environmental change. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 55, 101159. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2022.101159>
- Kujanpää L, Reznichenko A, Saastamoinen H, [...], Koponen K (2023). Carbon dioxide use and removal.: Prospects and policies. Publication of the government's analysis, assessment and research activities. [https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/164795/VNTEAS\\_2023\\_19.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/164795/VNTEAS_2023_19.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Lloyd JD, Cameron LA, Taber DA, LeBeau CW, McNew LB, Winder VL (2022) Prairie grouse and wind energy: The state of the science and implications for risk assessment. *Wildl Soc Bull* 46:e1305. <https://doi.org/10.1002/wsb.1305>
- Łopucki R, Klich D, Gielarek S (2017) Do terrestrial animals avoid the areas close to turbines in the functioning wind farms in agricultural landscapes? *Environ Monit Assess* 189:343. <https://doi.org/10.1007/s10661-017-6018-z>
- Lukkarinen J, Marttila T, Saarikoski H, Auvinen K, Faehnle M, Hyysalo S, Kangas HL, Lähteenoja S, Peltonen P, Salo M (2020) Taloyhtiöistä tulevaisuuden energiatuottajia – Muutospolut vuoteen 2035 ja murrosareena tiedon yhteistuotannon menetelmänä. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 39/2020
- Lukkarinen J, Salo M, Faehnle M, Saarikoski H, Hyysalo S, Auvinen K, Lähteenoja S, Marttila T (2023) Citizen energy lost in sustainability transitions: Knowledge co-production in a complex governance context. *Energy Res Soc Sci* 96. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2022.102932>
- Lundin E (2022) Geographic price granularity and investments in wind power: Evidence from a Swedish electricity market splitting reform. *Energy Economics* 113:106208. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2022.106208>
- LUT (2022a) Towards Carbon Neutral Finland. LUT University Energy Outlook 5/2022. (only in Finnish) <https://www.lut.fi/sites/default/files/media/documents/LUT-yliopiston-Energiaselonteko-2022.pdf>
- LUT (2022b) LUT is planning the first advanced research microreactor in Finland. Media release. <https://www.lut.fi/en/news/lut-planning-first-advanced-research-microreactor-finland>
- the Ministry of Transport and Communications (2021) Roadmap to fossil-free transport Government resolution on reducing domestic transport's greenhouse gas emissions. Publications of the Ministry of Transport and Communications 2021: 19 Available at [accessed 9.4.2024] [https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/163260/LVM\\_2021\\_19.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/163260/LVM_2021_19.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- MAN Energy Solutions (n.d.) Esbjerg Heat pump, webpage. <https://www.man-es.com/discover/esbjerg-heat-pump>
- Marques AT, Batalha H, Rodrigues S, Costa H, Pereire MJR, Fonseca C, Mascarenhas M, Bernardino J (2014) Understanding bird collisions at wind facilities: And updated review on the causes and possible mitigation strategies. *Biol Conserv* 179:40–52
- Meeus L (2020) The Evolution of Electricity Markets in Europe. Edward Elgar Publishing. <https://doi.org/10.4337/9781789905472>
- Mekonnen MM, Gerbens-Leenes PW, Hoekstra AY (2015) The consumptive water footprint of electricity and heat: a global assessment. *Environmental Science Water Research & Technology* 1, 285–297. DOI: 10.1039/c5ew00026b
- Mäkipää R, Abramoff R, Adamczyk B, Baldy V, Biryol C, Bosela M, Casals P, Curriel Yuste J, Dondini M, Filipek S, Garcia-Pausas J, Gros R, Gömöryová E, Hashimoto S, Hasegawa M, Immonen P, Laiho R, Li H, Li Q, Luysaert S, Menival C, Mori T, Naudts K, Santonja M, Smolander A, Toriyama J, Tupek B,



- Ubeda X, Verkerk PJ, Lehtonen A (2023) How does management affect soil C sequestration and greenhouse gas fluxes in boreal and temperate forests? – A review. *Forest Ecology and Management*, 529, 120637. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120637>.
- Ministry of Economic Affairs and Employment of Finland (2022) Carbon neutral Finland 2035 – national climate and energy strategy. Publications of the Ministry of Economic Affairs and Employment of Finland 2022:55. <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-327-843-1>
- Ministry of Environment (2016) Linnustovaikutusten arviointi tuulivoimarakentamisessa. Suomen ympäristö 6/2016. [https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/75407/SY\\_6\\_2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/75407/SY_6_2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y) [accessed 27.9.2023]
- Ministry of Environment (2023) Aurinkovoimaloiden kaavoitusta ja lupamenettelyä koskevan oppaan valmistelu. Hankenumero: YM014:00/2023. <https://valtioneuvosto.fi/hanke?tunnus=YM014:00/2023>
- Ministry of Economic Affairs and Employment of Finland (2023a) Valtioneuvoston periaatepäätös TEM/2023/14. (only in Finnish) <https://valtioneuvosto.fi/paatokset/paatos?decisionId=0900908f8080db83>
- Ministry of Economic Affairs and Employment of Finland (2023b) Energiayhteisöt ja erilliset linjat: Energiayhteisöryhmän loppuraportti. (only in Finnish) <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/164884>
- The National Emergency Supply Agency (2021) Kenelle sähköä, kuka jää ilman? 17.11.2021 uutinen. (only in Finnish) <https://www.varmuudenvuoksi.fi/artikkeli/kenelle-sahkoa-kuka-jaa-ilman> and report: <https://www.huoltovarmuuskeskus.fi/files/666549f601a3c73289002e38f78bd04c8dd3bab0/sahkon-kayttoaikkojen-priorisointi-selvitys-270821.pdf>
- The National Emergency Supply Agency (2023) Energy 2030. <https://www.huoltovarmuuskeskus.fi/en/organisation/the-national-emergency-supply-agency/programmes>
- Nazir MS, Mahdi AJ, Bilal M, Sohail HM, Ali N, Iqbal HMN (2019) Environmental impact and pollution-related challenges of renewable wind energy paradigm – A review. *Sci Total Environ* 683:436–444. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.274>
- NER (2023) The Nordic Energy Dilemma. 10 Mar 2023. Nordic Energy Research. Website reference 29.11.2023: <https://www.nordicenergy.org/publications/the-nordic-energy-trilemma-security-of-supply-prices-and-just-transition/>
- Neoen (2020) Neoen builds in Finland the Nordics' largest battery storage unit. Media release 9.6.2020. <https://neoen.com/app/uploads/2020/06/20200609-neoen-media-release-ypr.pdf>
- Neumayer E (2003) Weak versus strong sustainability: exploring the limits of two opposing paradigms. Edward Elgar Publishing Limited. UK: Cornwall.
- NGDP (2023) Nordic Grid Development Perspective 2023. [https://www.fingrid.fi/contentassets/6457e50d0dee45a38d6f709d9cd4c87/svk\\_ngpd2023\\_a4\\_korr4.pdf](https://www.fingrid.fi/contentassets/6457e50d0dee45a38d6f709d9cd4c87/svk_ngpd2023_a4_korr4.pdf), Accessed 9.4.2024.
- NREL (2021) Life Cycle Greenhouse Gas Emissions from Electricity Generation: Update. <https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/80580.pdf>
- OECD (2021) Towards a more resource-efficient and circular economy. The role of the G20. <https://www.oecd.org/environment/waste/OECD-G20-Towards-a-more-Resource-Efficient-and-Circular-Economy.pdf> [accessed 4.1.2023]
- Ogilvie M, Rootes C (2015) The Impact of Local Campaigns against Wind Energy Developments. *Environmental Politics* 24(6). 10.1080/09644016.2015.1063301
- Outokumpu (2023) Outokumpu and Fortum partner to accelerate industrial decarbonization in stainless steel production. Media release. <https://www.outokumpu.com/en/news/2023/outokumpu-and-fortum-partner-to-accelerate-industrial-decarbonization-in-stainless-steel-production-3244643>
- Ovaskainen H (2017) CO<sub>2</sub>-eq emissions and energy efficiency in forest biomass supply chains – impact of terminals. *Metsätönnön tulostietokanta* 4b/2017. [https://metsatoho.fi/wp-content/uploads/Tulostietokanta\\_2017\\_04b\\_CO2-eq\\_emissions\\_and\\_energy\\_efficiency\\_in\\_forest-biomass.pdf](https://metsatoho.fi/wp-content/uploads/Tulostietokanta_2017_04b_CO2-eq_emissions_and_energy_efficiency_in_forest-biomass.pdf)
- Pajula T, Vatanen S, Behm K, et al. (2021) Carbon Handprint Guide V. 2.0. Applicable for Environmental Handprint. [https://publications.vtt.fi/julkaisut/muut/2021/Carbon\\_handprint\\_guide\\_2021.pdf](https://publications.vtt.fi/julkaisut/muut/2021/Carbon_handprint_guide_2021.pdf) [23 September 2023, date last accessed]
- Pelastuslaitokset (2023) Aurinkosähköjärjestelmien paloturvallisuusohje. Available at [https://pelastuslaitokset.fi/sites/default/files/2023-01/Aurinkos%C3%A4hk%C3%B6j%C3%A4rjestelmien\\_paloturvallisuusohje\\_S\\_18012023.pdf](https://pelastuslaitokset.fi/sites/default/files/2023-01/Aurinkos%C3%A4hk%C3%B6j%C3%A4rjestelmien_paloturvallisuusohje_S_18012023.pdf)
- PV Magazine (2023). <https://www.pv-magazine.com/2023/01/13/brek-unveils-400-kw-silicon-carbide-string-inverter/>
- PZEM (2023) Difference in production costs between gas and coal-fired power plants is increasing. Markkraportti. 31 May 2023. <https://www.pzem.nl/en/nieuws-en-marktinformatie/difference-in-production-costs-between-gas-and-coal-fired-power-plants-is-increasing/>
- Pörtner HO, Scholes RJ, Agard J, Archer E, Arneth A, Bai X, Barnes D, Burrows M, Chan L, Cheung WL, Diamond S, Donatti C, Duarte C, Eisenhauer N, Foden W, Gasalla MA, Handa C, Hickler T, Hoegh-Guldberg O, Ichii K, Jacob U, Insarov G, Kiessling W, Leadley P, Leemans R, Levin L, Lim M, Maharaj S, Managi S, Marquet PA, McElwee P, Midgley G, Oberdorff T, Obura D, Osman E, Pandit R, Pascual U, Pires APF, Popp A, Reyes-García V, Sankaran M, Setälä J, Shin YJ, Sintayehu DW, Smith P, Steiner N, Strassburg B, Sukumar R, Trisos C, Val AL, Wu J, Aldrian E, Parmesan C, Pichs-Madruga R, Roberts DC, Rogers AD, Díaz S, Fischer M, Hashimoto S, Lavorel S, Wu N, Ngo HT (2021) IPBES-IPCC co-sponsored workshop report on biodiversity and climate change; IPBES and IPCC. DOI:10.5281/zenodo.4782538.
- Razon LF, Valera-Medina A (2021) A Comparative Environmental Life Cycle Assessment of the Combustion of Ammonia/Methane Fuels in a Tangential Swirl Burner. *Front Chem Eng* 3. <https://doi.org/10.3389/fceng.2021.631397>
- Rios-Festner D, Blanco G, Olsina F (2020) Long-term assessment of power capacity incentives by modeling generation investment dynamics under irreversibility and uncertainty. *Energy Policy* 137:111185. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.111185>
- Rockström J, Gupta J, Qin D et al. (2023) Safe and just Earth system boundaries. *Nature* 619:102–111. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06083-8>
- Rotger-Grifol S, Jacobsen RH, Nguyen D, Sørensen G (2016) Demand response potential of ventilation systems in residential buildings. *Energy Build* 121:1–10. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.03.061>
- Rothovius T, Nikkinen J, Sihvonen J, Klemola A (2013) Johdannaisten hyödyntäminen energiayhtiön liiketoiminnassa. Loppuraportti. Vaasan yliopiston

julkaisuja selvityksiä ja raportteja 193. Vaasan yliopisto – University of Vaasa.

[https://osuva.uwasa.fi/bitstream/handle/10024/7921/isbn\\_978-952-476-509-1.pdf](https://osuva.uwasa.fi/bitstream/handle/10024/7921/isbn_978-952-476-509-1.pdf)

Royapoor M, Pazhoohesh M, Davison PJ, Patsios C, Walker S (2020) Building as a virtual power plant, magnitude and persistence of deferrable loads and human comfort implications. *Energy Build* 213:109794. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109794>

Räty A (2023) Itäisen Suomen tuulivoimarakentamisen tehostaminen. *Selvitys* 14.3.2023.

[https://valtioneuvosto.fi/documents/1410877/153287519/Tuulivoimaselvitys\\_final\\_AR\\_150323.pdf/ed8981bb-e8dd-fc65-eeb1-4d999256002c/Tuulivoimaselvitys\\_final\\_AR\\_150323.pdf?t=1678882585236](https://valtioneuvosto.fi/documents/1410877/153287519/Tuulivoimaselvitys_final_AR_150323.pdf/ed8981bb-e8dd-fc65-eeb1-4d999256002c/Tuulivoimaselvitys_final_AR_150323.pdf?t=1678882585236)

Salovaara K, Makkonen M, Gore O, Honkapuro S (2016) Electricity Markets Framework in Neo-Carbon Energy 2050 Scenarios. NEO-CARBON Energy WP1 working paper 3/2016, Lappeenranta University of Technology (LUT), Lappeenranta, Finland.

Sánchez-Navarro S, Gálvez-Ruiz D, Rydell J, Ibáñez C (2023) High Bat Fatality Rates Estimated at Wind Farms in Southern Spain. *Acta Chiropterologica*, 25(1). <https://doi.org/10.3161/15081109ACC2023.25.1.007>

Sayed ET, Wilberforce T, Elsaid K, Rabaia MKH, Abdelkareem MA, Chae K-J, Olabi AG (2021) A critical review on environmental impacts of renewable energy systems and mitigation strategies: Wind, hydro, biomass and geothermal. *Sci Total Environ* 766:144505. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144505>

Schwanitz VJ, Wierling A, Arghandeh Paudler H [...] (2023) Statistical evidence for the contribution of citizen-led initiatives and projects to the energy transition in Europe. *Sci Rep* 13, 1342. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-28504-4>

Sillman J, Hynynen K, Dyukov I, Ahonen T, Jalas M (2023a) Emission reduction targets and electrification of the Finnish energy system with low-carbon Power-to-X technologies: Potentials, barriers, and innovations – A Delphi survey. *Technol Forecasting Soc Change* 193:122587. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2023.122587>

Sillman J, Lakanen L, Annala S, Grönman K, Luoranen M, Soukka R (2023b) Evaluation of greenhouse gas emission reduction potential of a demand-response solution: a carbon handprint case study of a virtual power plant. *Clean Energy* 7(4):755–766. <https://doi.org/10.1093/ce/zkad022>

Silva-Rodriguez L, Sanjab A, Fumagalli E, Virag A, Gibescu M (2022) Short term wholesale electricity market designs: A review of identified challenges and promising solutions. *Renew Sustain Energy Rev* 160:112228. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112228>

Skarin A, Alam M (2017) Reindeer habitat use in relation to two small wind farms, during preconstruction, construction, and operation. *Ecology and Evolution* 7:3870–3882.

Sivill L, Bröckl M, Semkin N, Ruismäki A, Piipola H, Laukkanen O, Lehtinen H, Takamäki S, Vasara P, Patronen J (2022) Hydrogen economy - Opportunities and limitations. *Publications of the Government's analysis, assessment and research activities 2022:41* [https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/164081/VNTEAS\\_2022\\_41.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/164081/VNTEAS_2022_41.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Sovacool BK (2013) The avian benefits of wind energy: a 2009 update. *Renewable Energy* 49:19–24. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.01.074>

Spath PL, Mann MK, Kerr DR (1999) Life Cycle Assessment of Coal-fired Power Production Including contributions on process definition and data acquisition from: Life Cycle Assessment. NREL/TP-570-25119

Sphera (2021) Gabi 10.5.0.78 Software system and database for the life cycle engineering. <https://sphera.com/life-cycle-assessment-lca-software/>

SULPU (2023) Almost 200,000 heat pumps were sold last year. An increase of 50%. Media release. <https://www.sulpu.fi/almost-200000-heat-pumps-were-sold-last-year-an-increase-of-50/>

Statistic Finland (2023a) Economy-Wide Material Flow Accounts. <https://www.stat.fi/en/statistics/kanma>

Statistic Finland (2023b) Supplies and total consumption of electricity 1992M01–2023M09. [https://pxdata.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/StatFin/Fin\\_ehk/statfin\\_ehk\\_pxt\\_12su.px, reference date 19.9.2023](https://pxdata.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/StatFin/Fin_ehk/statfin_ehk_pxt_12su.px, reference date 19.9.2023)

STUK (2024) Radiation and Nuclear Safety Authority Regulation on the Emergency Arrangements of a Nuclear Power Plant, STUK Y/2/2024. <https://www.stuklex.fi/en/maarays/stuk-y-2-2024>

Soimakallio S, Pihlainen S (2023) Metsänielujen kehityssuunnat vuosina 2021–2025 ja suhde EU-velvoitteisiin sekä ohjauksien nielujen vahvistamiseksi. Suomen ympäristökeskuksen (Syke) raportteja 9/2023.

Tawalbeh M, Al-Othman A, Kafiah F, Abdelsalam E, Almomani F, Alkasrawi M (2021) Environmental impacts of solar photovoltaic systems: A critical review of recent progress and future outlook. *Sci The Total Environ* 759:143528. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143528>

Tikkanen H (ed.) 2022. Hyvät käytännöt maakotkalle aiheutuvien vaikutusten arviointiin – esimerkkiraportti Nimettömänkankaan tuulivoimahankkeesta. Metsähallituksen luonnonsuojelujulkaisuja. Sarja A 241. [In Finnish]

Trading Economics (2023) <https://tradingeconomics.com>. Viitattu 1.7.2023

Tsoutsos T, Frantzeskaki N, Gekas V (2005) Environmental impacts from the solar energy technologies. *Energy Policy* 33:289–296. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(03\)00241-6](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(03)00241-6)

Finnish Safety and Chemicals Agency (2023).

<https://tukes.fi/-/aurinkosahkojarjestelmien-asennuksissa-tehdaan-paljon-virheita#3a9dab85>

Finnish Wind Energy Association (2019) Power purchase agreements - Pitkäaikaiset sähkönostosopimukset. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 20.6.2023]. Saatavilla: [https://www.tuulivoimayhdistys.fi/media/sty\\_ppa\\_materiaalipaketti\\_final\\_20180211.pdf](https://www.tuulivoimayhdistys.fi/media/sty_ppa_materiaalipaketti_final_20180211.pdf)

Finnish Wind Power Association (2023a) Tuulivoimavuosi 2022: Tuulivoimakapasiteetti kasvoi 75 % ja toi Suomeen yli 2.9 miljardin investoinnit. Suomen Tuulivoimayhdistys. <https://tuulivoimayhdistys.fi/ajankohtaista/tiedotteet/tuulivoimakapasiteetti-kasvoi-75-ja-toi-suomeen-yli-29-miljardin-investoinnit, reference date 20.9.2023>

Finnish Wind Power Association (2023b) Tuulivoimatilastot 6/2023, Suomen Tuulivoimayhdistys, available at <https://tuulivoimayhdistys.fi/ajankohtaista/tilastot-2/tuulivoiman-rakentamisen-tahti-jatkuu-tasaisena-2>, reference date 19.9.2023

- Finnish Wind Power Association (2023c) Tuulivoimahankkeet Suomessa 05/2023. Suomen Tuulivoimayhdistys, available at [https://tuulivoimayhdistys.fi/media/tuulivoimahankkeet-06\\_2023.pdf](https://tuulivoimayhdistys.fi/media/tuulivoimahankkeet-06_2023.pdf)
- UNECE (2021) Life Cycle Assessment of Electricity Generation Options. Report, United Nations Economic Commission for Europe, United Nations, Geneva, 107 p.
- UN (2021) Theme report on energy transition towards the achievement of SDG 7 and net-zero emissions. [https://www.un.org/sites/un2.un.org/files/2021-twg\\_2-062321.pdf](https://www.un.org/sites/un2.un.org/files/2021-twg_2-062321.pdf)
- Van der Giesen C, Meinrenken CJ, Kleijn R, Sprecher B, Lackner KS, Kramer GJ (2017) Generation with humidity swing direct air capture of CO<sub>2</sub> versus mea-based postcombustion capture. *Environ Sci Technol* 51:1024–1034. [https://doi.org/10.1021/ACS.EST.6B05028/SUPPL\\_FILE/ES6B05028\\_SI\\_001.PDF](https://doi.org/10.1021/ACS.EST.6B05028/SUPPL_FILE/ES6B05028_SI_001.PDF)
- Vedullapalli DT, Hadidi R, Schroeder B (2019) Combined HVAC and Battery Scheduling for Demand Response in a Building. *IEEE Trans Ind Appl* 55(6):7008–7014. <https://doi.org/10.1109/TIA.2019.2938481>
- VnA 767/2021. Valtioneuvoston asetus sähköntoimitusten selvityksestä ja mittauksesta. 12.8.2021/767.
- VTT (2023a) Overcoming bottlenecks in green energy transition. VTT White paper. <https://www.vttresearch.com/en/overcoming-bottlenecks-green-energy-transition>
- VTT (2023b) Steady Energy raises 2 million euros to decarbonise residential heating with small modular nuclear reactors. Media release. <https://www.vttresearch.com/en/news-and-ideas/steady-energy-raises-2-million-euros-decarbonise-residential-heating-small-modular>
- Väre (2023) Sähkömarkkinakatsaus - sähkön hinta talvella 2023? Blogi. <https://vare.fi/talven-2023-sahkomarkkinakatsaus/>
- Wahlund M, Palm J (2022) The role of energy democracy and energy citizenship for participatory energy transitions: A comprehensive review. *Energy Res Soc Sci* 87:102482
- Walker G, Devine-Wright P (2008) Community Renewable Energy: What Should It Mean? *Energy Policy* 36(2):497–500.
- Walston LJ Jr., Rollins KE, Lagory KE, Smith KP, Meyers SA (2016) A preliminary assessment of avian mortality at utility-scale solar energy facilities in the United States. *Renew Energy* 92:405–414. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.02.041>
- Walston LJ, Hartmann HM, Fox L, Macknick J, McCall J, Janski J, Jenkins L (2023) If you build it, will they come? Insect community responses to habitat establishment at solar energy facilities in Minnesota, USA. *Environmental Research Letters* 19(1):014053. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad0f72>
- Wang S, Wang S (2015) Impacts of wind energy on environment: A review. *Renew sustain energy rev* 49:437–443. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.137>
- WEC (2022) World Energy Council, World Energy Trilemma Index, 2022. <https://www.worldenergy.org/transition-toolkit/world-energy-trilemma-index-11.5.2023>
- Whitaker M, Heath GA, O'Donoghue P, Vorum M (2012) Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Coal-Fired Electricity Generation. *J Ind Ecol* 16:S53–S72. <https://doi.org/10.1111/J.1530-9290.2012.00465.X>
- Wilson D, Hulka S, Bennun L (2022) A review of raptor carcass persistence trials and the practical implications for fatality estimation at wind farms. *PeerJ* 10:e14163. <https://doi.org/10.7717/peerj.14163>
- Wittmayer JM, de Geus T, Pel B, Avelino F, Hielscher S, Hoppe T, Mühlemeier S, Stasik A, Oxenaar S, Rogge KS, Visser V, Marín-González E, Ooms M, Buitelaar S, Foulds C, Petrick K, Klarwein S, Krupnik S, de Vries G, Wagner A, Härtwig A (2020) Beyond instrumentalism: Broadening the understanding of social innovation in socio-technical energy systems *Energy Res Soc Sci* 70:101689.
- Wolak FA (2021) Wholesale electricity market design. In *Handbook on Electricity Markets* (pp. 73–110). Edward Elgar Publishing. <https://www.elgaronline.com/display/edcoll/9781788979948/9781788979948.00010.xml>
- Wolf S, Blesl M (2016) Model-based quantification of the contribution of industrial heat pumps to the European climate change mitigation strategy. In *ECEEE Industrial Summer Study Proceedings* 477–487
- WEF (2024) World Economic Forum, The Global Risk Report 2024. 19<sup>th</sup> Edition. Insight report. [https://www3.weforum.org/docs/WEF\\_The\\_Global\\_Risks\\_Report\\_2024.pdf](https://www3.weforum.org/docs/WEF_The_Global_Risks_Report_2024.pdf)
- World Nuclear News (2022) China's demonstration HTR-PM reaches full power. <https://world-nuclear-news.org/Articles/China-s-demonstration-HTR-PM-reaches-full-power>
- World Nuclear News (2023a) Westinghouse, Bechtel and PEJ push ahead on Poland AP1000. <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Westinghouse,-Bechtel-and-PEJ-push-ahead-on-Poland>
- World Nuclear News (2023b) BWRX-300 selected for Estonia's first nuclear power plant. <https://world-nuclear-news.org/Articles/BWRX-300-selected-for-Estonia-s-first-nuclear-powe>
- World Nuclear News (2023c) US regulator completes first SMR design certification rulemaking. <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/US-regulator-completes-first-SMR-design-certificat>
- World Nuclear News (2023d) EDF creates new Nuward SMR subsidiary. <https://world-nuclear-news.org/Articles/EDF-creates-new-NUWARD-SMR-subsiary>
- Zhang X, Bauer C, Mutel CL, Volkart K (2017) Life Cycle Assessment of Power-to-Gas: Approaches, system variations and their environmental implications. *Appl Energy* 190:326–338. <https://www.sciencedirect.com.ezproxy.cc.lut.fi/science/article/pii/S0306261916318682>



**LUT**  
University

**LAPPEENRANNAN KAMPUS**  
Yliopistonkatu 34  
53850 Lappeenranta

**LAHDEN KAMPUS**  
Mukkulankatu 19  
15210 Lahti

**LISÄTIETOJA:**  
[lut.fi/energiaselonteko](https://lut.fi/energiaselonteko)