

LUT-yliopiston

ENERGIA- SELONTEKO

2026 | Energiajärjestelmien turvaaminen – energia, luonto ja yhteiskunta

LUT-yliopiston

ENERGIASELONTEKO 2026

**Energiajärjestelmien turvaaminen –
energia, luonto ja yhteiskunta**

Toimittajat: Eeva-Lotta Apajalahti ja Hanna Paulomäki

Toimitussihteeri: Janita Rahikainen

Kirjoittajat:

Jero Ahola	Jukka Lassila
Falah Alobaid	Miika Marttila
Salla Annala	Altti Meriläinen
Eeva-Lotta Apajalahti	Johanna Naukkarinen
Christian Breyer	Husain Patel
Alicja Dankowska	Jarmo Partanen
Leo Gardemeister	Hanna Paulomäki
Aki Grönman	Elena Poli
Juha Haakana	Svetlana Proskurina
Jouni Havukainen	Olli Pyrhönen
Minna Havukainen	Tapio Ranta
Samuli Honkapuro	Ayesha Sadiqa
Katja Hynynen	Jani Sillman
Juhani Hyvärinen	Heikki Suikkanen
Behnam Ivatloo	Roosa Talala
Hannu Karjunen	Teemu Turunen-Saaresti
Pertti Kauranen	Tero Tynjälä
Antti Kosonen	Antti Uusitalo
Katja Kuparinen	Ville Uusitalo
Petteri Laaksonen	Esa Vakkilainen
Joni Lappi	

LUT-yliopisto | Raportit ja selvitykset

ISSN-L 2243-3384, ISSN 2243-3384

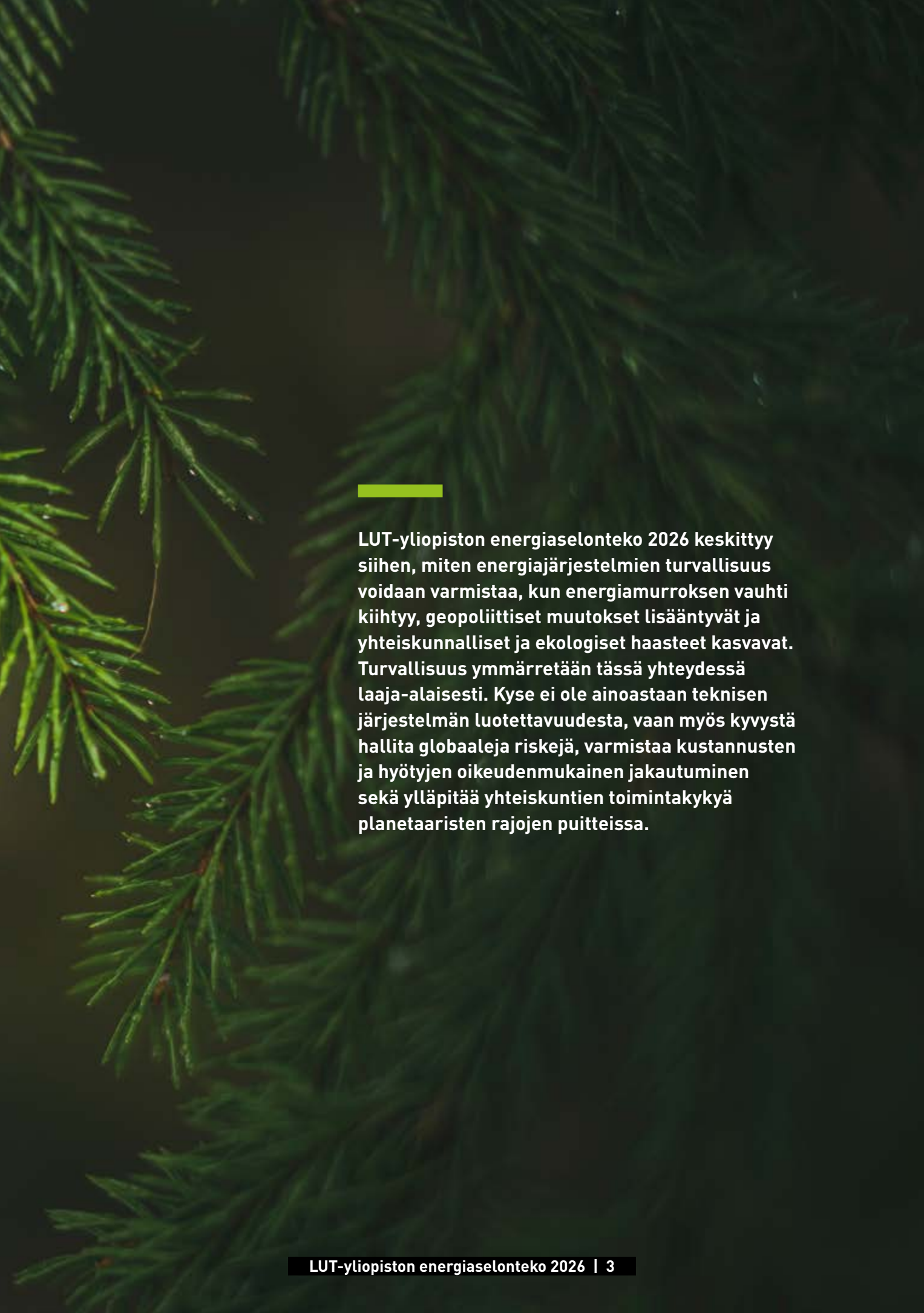
Järjestysnumero sarjassa: 148

Painettu julkaisu ISBN: 978-952-412-454-6

Sähköinen julkaisu ISBN: 978-952-412-455-3

Taitto: Anna Aalto

Kuvat: Teemu Leinonen



LUT-yliopiston energiaselonteko 2026 keskittyy siihen, miten energiajärjestelmien turvallisuus voidaan varmistaa, kun energiamurroksen vauhti kiihtyy, geopoliittiset muutokset lisääntyvät ja yhteiskunnalliset ja ekologiset haasteet kasvavat. Turvallisuus ymmärretään tässä yhteydessä laaja-alaisesti. Kyse ei ole ainoastaan teknisen järjestelmän luotettavuudesta, vaan myös kyvystä hallita globaaleja riskejä, varmistaa kustannusten ja hyötyjen oikeudenmukainen jakautuminen sekä ylläpitää yhteiskuntien toimintakykyä planetaaristen rajojen puitteissa.

SISÄLLYSLUETTELO

ESIPUHE	6
YHTEENVETO	7
 1. JOHDANTO: ENERGIAJÄRJESTELMIEN MUUTOKSET.....	 11
1.1 LUT-yliopiston energiaselonteko 2026	11
1.2 Suomen energiajärjestelmien kehitys	12
1.3 Globaali energiamurros	14
1.4 Energiariippuvuuksien ja geopolitiikan muutos	15
1.5 Kasvava kysyntä ja järjestelmätason haasteet	16
 2. MUUTTUVA GEOPOLITIIKKA JA KRIITTISTEN MINERAALIEN TURVAAMINEN	 18
2.1 Muutokset energian geopolitiikassa.....	18
2.2 Kriittisten mineraalien turvaaminen: vihreän kolonialismin välttäminen	20
2.3 Kiertotalous vähentää resurssi riippuvuuksia.....	22
 3. RESILIENTTI ENERGIAJÄRJESTELMÄ – YHTEISKUNNAN KOKONAISTURVALLISUUDEN PERUSTA	 24
3.1 Muutostekijät ja mahdollistajat	24
3.1.1 Hajautettu tuotanto ja sääriippuvuus	24
3.1.2 Energia-alan sektori-integraatio	25
3.1.3 Joustava kuorma ja teknologiakehitys	26
3.1.4 Kehitystä tukeva sääntely	27
3.2 Resilientin energiajärjestelmän tavoitteet ja vaatimukset.....	27
 4. IHMISET JA MARKKINAT	 28
4.1 Toimivat markkinat turvaavat energian saatavuuden	28
4.1.1 Sähkön markkinapaikat.....	28
4.1.2 Markkinoita kehitetään jatkuvasti	30
4.1.3 Kysyntäjouston ja energiansäästön ohjaaminen kulutushuippujen aikana	31
4.2 Energiakansalaisuus ja energiayhteisöt.....	33
4.2.1 Aktiiviset energiakansalaiset	33
4.2.2 Energiayhteisöt	34
4.3 Yhteiskunnallinen resilienssi ja energiahaavoittuvuus	35
4.3.1 Yhteiskunnallinen resilienssi	35
4.3.2 Energiahaavoittuvuus	36

5. ENERGIAJÄRJESTELMIEN KESTÄVYYS	38
5.1 Toimiminen planetaarisissa rajoissa	38
5.2 Sosiaalinen kestävyys ja oikeudenmukaisuus energiamurroksessa	41
5.3 Ilmaston, maankäytön, luonnon ja vesivarojen suojelu	43
5.3.1 Ilmasto	44
5.3.2 Maankäytön muutokset ja vaikutukset luonnon monimuotoisuuteen.....	44
5.3.3 Vesi.....	45
5.4 Bioenergian ja biomassan rooli	50
5.5 Hiilen viisas hallinta.....	52
 6. OSAAMINEN JA KOULUTUS.....	55
6.1 Kestävä energiamurros vaatii uutta osaamista.....	55
6.2. Energialukutaito, digitaalinen oppiminen ja uusi kestävä liiketoiminta	56
6.3. Kestävyyden ja monimuotoisuuden edistäminen korkeakouluissa Suomessa	58
6.4. Monialainen osaaminen, asiantuntijatiimit ja nykykoulutuksen haasteet.....	58
 7. ENERGIA TEKNOLOGIAT	60
7.1 Energialähteet.....	60
7.1.1 Bioenergia.....	60
7.1.2 Ydinenergia	62
7.1.3 Tuulivoima.....	64
7.1.4 Aurinkovoima	65
7.1.5 Lämpöpumput (ja geoterminen energia)	67
7.2 Energiajärjestelmien ratkaisut.....	69
7.2.1 Vetyratkaisut	69
7.2.2 Hiilen hallinta.....	70
7.2.3 Energiavarastot.....	71
7.2.4 Energiansäästö ja energiatehokkuus.....	74
 LÄHTEET.....	76

ESIPUHE

Suomen energiamurros on edennyt jo pitkälle. Kehitystä ovat vauhdittaneet maan energijärjestelmän systemaattinen uudistaminen sekä investoinnit fossiilittomiin energialähteisiin. Suomi onkin siirtynyt lähes fossiilittomaan sähköjärjestelmään, joka luo perustan kestävyys siirtymälle, fossiilittomalle teollisuudelle ja kansainväliselle kilpailukyvyille. Uusi energijärjestelmä avaa mahdollisuuksia, mutta tuo mukanaan myös uudenlaisia haasteita ja haavoittuvuuksia.

Energiamurroksen ja sähköistymisen edetessä eri järjestelmien väliset kytkökset ja riippuvuudet lisääntyvät. Vaihtelevan sähköntuotannon kasvu asettaa haasteita sähkön hinnanmuodostukselle ja sähköverkon kapasiteetille. Samalla energiasektorin sosiaaliset ja luontovaikutukset lisääntyvät maankäytön muutosten myötä. Energiamurros on ennen kaikkea yhteiskunnallinen muutos, jossa uudet toimintatavat, kuten aktiivinen energiakansalaisuus ja yritysten investoinnit puhtaaseen energiaan yleistyvät.

Elämme jälleen geopolittisen energiakriisin keskellä. Iranin sota häiritsee vakavasti maailmanlaajuisia kaasu- ja öljykauppaa. Sodan aiheuttamat inhimilliset menetykset sekä elinkustannusten nousu lisäävät haavoittuvuutta ja energiaköyhyyttä. Olemme astuneet monikriisiseen aikaan, jossa ilmastokriisi on suurin haaste, maailman poliittinen järjestys muuttuu nopeasti ja luontokato etenee niin Suomessa kuin globaalisti.

Energiajärjestelmien turvaaminen on yhteiskunnan toimivuuden kannalta elintärkeää muuttuvassa ja osin epävakaa toimintaympäristössä. LUT-yliopiston kolmannessa energiaselonteossa keskitymme siihen, miten energijärjestelmä voidaan turvata nyt ja tulevaisuudessa siten, että sen resilienssi säilyy ja vahvistuu, ihmiset ja yhteisöt hyötyvät muutoksesta ja heidän toimintamahdollisuutensa laajenevat. Jotta kehitys säilyisi kestävä, luontovaikutukset on minimoitava ja planetaarisissa rajoissa pysyttävä.

Energiajärjestelmien monimutkaistuessa tarve ymmärrettävälle ja tutkitulle tiedolle kasvaa. Toteuttaakseen yliopistojen kolmatta tehtävää, yhteiskunnallista vaikuttamista, LUT-yliopiston energia-asiantuntijat tuottavat energiaselonteossa ajantasaista ja asiantuntevaa tietoa energijärjestelmien kehitysnäkymistä, haasteista ja mahdollisuuksista.

Julkaisu on suunnattu niin asiantuntijoille, poliittisille päätöksentekijöille kuin tavallisille kansalaisillekin. Energiajärjestelmän kokonaisuuden hahmottaminen on erityisen tärkeää energiapolitiikan suuntaamisessa, sillä se mahdollistaa tasapainoisen kehittämisen yksittäisten ratkaisujen sijaan.



Olli Pyrhönen, dekaani
Eeva-Lotta Apajalahti, apulaisprofessori
LUT-yliopiston energijärjestelmien tiedekunta

YHTEENVETO

Kirjoittaja: Hanna Paulomäki

LUT-yliopiston energiaselonteko "Energiajärjestelmien turvaaminen – energia, luonto ja yhteiskunta" kokoaa yhteen tieteesen pohjautuvia näkemyksiä energiajärjestelmistä ja niiden merkityksestä. Selonteon tavoitteena on tukea tietoon perustuvaa päätöksentekoa niin politiikassa, teollisuudessa kuin laajemminkin yhteiskunnassa. Tämä LUT-yliopiston kolmas energiaselonteko jatkaa aiempien, hiilineutraaliutta (2022) sekä turvallista, kestävä ja kohtuuhintaista energiaa (2024) käsitelneiden selontekojen linjaa ja tarkastelee Suomen kehitystä osana laajempaa eurooppalaista ja globaalia kokonaisuutta.

Tässä selonteossa tarkastelemme sitä, miten energiajärjestelmiä voidaan turvata tilanteessa, jossa energiamurros kiihtyy, ja sitä, miten toimintaympäristöä muovaavat sekä geopolittiset muutokset että kasvavat yhteiskunnalliset ja ekologiset haasteet. Energiaturvallisuus on ymmärrettävä laajasti. Teknisen luotettavuuden lisäksi siihen kuuluvat muutosjoustavuus eli resilienssi, sosiaalinen oikeudenmukaisuus sekä kyky toimia planetaarisissa rajoissa.

Suomessa energiamurros on jo pitkällä. Fossiiliton sähköntuotanto tukee kestävä talouskasvua ja tarjoaa mahdollisuuksia uusien toimialojen ja innovaatioiden syntymiseen sekä edistää ilmastotavoitteiden saavuttamista. Samalla siirtymässä on turvattava kohtuuhintaisen energian luotettava saatavuus kaikille myös suuren kysynnän aikana, kuten kylminä talvjaksoina.

Energiajärjestelmiä koskevat päätökset eivät rajoitu vain teknisiin ratkaisuihin. Ne kytkeytyvät tiiviisti yhteiskunnallisiin, ympäristöä koskeviin ja poliittisiin tekijöihin, jotka sekä muovaavat energiajärjestelmiä että muotoutuvat niiden mukana. Tämä kokonaisuus ohjaa Suomea kohti fossiilitonta taloutta.

Selonteko kokoaa yhteen keskeiset näkökulmat energiamurrokseen ja tulevaisuuden energiajärjestelmiin tarkastelemalla niihin liittyviä, toisiinsa kytkeytyviä haasteita ja mahdollisuuksia. Tässä yhteenvedossa kootaan selonteon keskeiset viestit: geopolitiikka ja kriittiset mineraalit, energiajärjestelmän resilienssi, markkinat ja yhteiskunnallinen osallistuminen, ekologinen ja sosiaalinen kestävyys sekä murroksen edellyttämä osaaminen.

Nämä näkökulmat osoittavat, miten Suomi voi vahvistaa energiaturvallisuuttaan ja sovitaa yhteen taloudelliset, ympäristöä koskevat ja yhteiskunnalliset tavoitteet nopeasti muuttuvassa toimintaympäristössä.

Energiaselonteko 2026 pääviestit

Energiajärjestelmien muutokset

1. Suomen energiajärjestelmää ovat muovanneet pitkän aikavälin historialliset, teolliset ja poliittiset valinnat, jotka edelleen ohjaavat päätöksentekoa.
2. Fossiilittomaan energiajärjestelmään siirtymistä ovat vauhdittaneet teollisuustuotannon rakenteelliset muutokset sekä tuotannon tukeutuminen vesivoimaan, ydinvoimaan, biomassaan ja viime vuosina myös tuulivoimaan.
3. Energiamurroksen seuraava vaihe painottuu yhä enemmän uusiutuvaan energiaan, liikenteen ja teollisuuden sähköistymiseen sekä kysynnän, joustavuuden ja järjestelmäintegraation vahvistamiseen.

Suomen nykyinen energiajärjestelmä on pitkän historiallisen kehityksen tulos, jossa teollistuminen, kotimaiset luonnonvarat ja keskeiset poliittiset päätökset ovat muovanneet järjestelmän nykyiseen muotoonsa. Varhaiset



investoinnit vesivoimaan ja sähköverkkoihin mahdollistivat sen, että koko maa voitiin sähköistää kattavasti. Myöhemmät kehitysvaiheet, kuten ydinvoiman, biomassan sekä sähkön ja lämmön yhteistuotannon käyttöönotto, loivat vahvan ja suurelta osin fossiilittoman sähköntuotannon perustan. Tätä kehityspolkua ovat edelleen vahvistaneet tuulivoiman nopea kasvu 2020 luvun alkupuolella sekä viimeaikaiset investoinnit aurinkoenergiaan. Nämä valinnat vaikuttavat yhä siihen, miten energiajärjestelmää käytetään, ohjataan ja kehitetään, ja ne vaikuttavat merkittävästi tuleviin energiapäätöksiin ja fossiilittomaan energiajärjestelmään siirtymiseen.

Tulevaisuutta tarkasteltaessa huomio kohdistuu yhä enemmän energian kysyntään, järjestelmän joustavuuteen ja integraatioon. Energiajärjestelmän dynamiikkaa muokkaavat sähköistyminen eri sektoreilla, uudet suuret sähkönkäyttäjät sekä uusiutuvan sähköntuotannon lisääntyvä vaihtelu. Näihin muutoksiin vastaaminen edellyttää aiempaa kokonaisvaltaisempaa energiajärjestelmien kehittämistä, jossa teknologiset, ympäristölliset ja yhteiskunnalliset näkökulmat sovitetaan yhteen.

Geopolitiikka ja kriittiset mineraalit

1. Energiamurros muuttaa maailmanlaajuisia valtarakenteita.
2. Kriittiset mineraalit ja toimitusketjut synnyttävät uusia riippuvuussuhteita ja strategisia riskejä.
3. Kiertotalousratkaisut ja luonnonvarojen vastuullinen käyttö tukevat pitkän aikavälin kestävyyttä ja turvallisuutta.

Energia, ennen kaikkea fossiilisten polttoainoiden keskitetty saatavuus, on pitkään ollut keskeinen osa geopolittisia valtasuhteita. Tällä hetkellä tämä näkyy erityisesti Lähi-idässä, jossa konflikti on paljastanut fossiili-riippuvuuden riskit, nostanut energianhinnat korkeiksi ja kiihdyttänyt siirtymää kohti uusiutuvaa energiaa, ydinvoimaa ja sähköistymistä. Samalla kun globaalit energiajärjestelmät siirtyvät fossiilittomiin ratkaisuihin, myös valtarakenteet muotoutuvat uudelleen, kun eri alueilla käytössä on toisistaan poikkeavia strategioita ja painotuksia. Suomi osana Euroopan unionia on vahvistanut toimia, joilla se edistää energiaturvallisuutta ja kilpailukykyä.

Kriittiset mineraalit, kuten litium, koboltti, nikkeli ja harvinaiset maametallit, ovat välttämättömiä energiamurroksessa. Näiden osalta globaali kilpailu kasvaa ja syntyy uudenlaisia riippuvuuksia. Toimitusketjut ovat vahvasti keskittyneet erityisesti kriittisten mineraalien jalostukseen ja valmistukseen, mikä luo

uudenlaisia haavoittuvuuksia ja haasteita toimitusketjujen läpinäkyvyyteen ja kestävyys-
teen. Kaivostoiminnan laajentuminen herät-
tää ympäristöön liittyviä ja sosiaalisia huolia.
Tämän vuoksi tarvitaan vastuullista hallintoa,
sääntelyyn perustuvaa ohjausta ja avointa
sidosryhmävuorovaikutusta, jotta tehtävät
ratkaisut ovat kestäviä ja oikeudenmukaisia.

Mineraalivarojensa ansiosta Suomella on
mahdollisuus vahvistaa omavaraisuuttaan ja
toimitusvarmuuttaan, mutta niiden hyödyntä-
misessä on huomioitava ympäristönsuojelu ja
maankäyttö. Riippuvuutta primääriraaka-ai-
neista voidaan vähentää tehokkaalla mate-
riaalien käytöllä, kierrätyksellä ja laajalla
resurssitehokkuudella, ja samalla voidaan
tukea pitkän aikavälin kestävyttä.

Muutosjoustavat eli resilientit energiajärjestelmät

1. Muutosjoustavalla energiajärjestelmällä on merkittävä vaikutus yhteiskunnan turvallisuu-
teen ja toimivuuteen.
2. Energiamurros tuo merkittäviä hyötyjä
mutta myös uusia haavoittuvuuksia.
3. Energiajärjestelmän resilienssi edellyt-
tää koordinoitua joustavuutta, kotimaista
osaamista ja näitä tukevaa sääntelyä.

Sähkö on modernin yhteiskunnan perusta,
joka mahdollistaa kriittiset palvelut ja toimin-
not, kuten terveydenhuollon, liikenteen, vies-
tinnän, teollisuuden ja yleisen turvallisuus-
den. Yhteiskunnan sähköistyessä korostuu
entisestään energiajärjestelmän kyky toimia
luotettavasti kaikissa olosuhteissa. Arjen
sujuvuus ja kriisitilanteiden hallinta edellyt-
tävät siis resilienttiä energiajärjestelmää.

Energiajärjestelmän toimintaa muuttavat
tuuli- ja aurinkovoiman nopea kasvu, sekto-
rikytkennät (vety, Power to X), lämmityksen ja
liikenteen sähköistyminen sekä datakeskus-
ten määrän kasvu. Nämä kehityskulut vähen-
tävät päästöjä ja parantavat omavaraisuutta,
mutta samalla ne lisäävät sääriippuvuutta,
epävarmuutta sekä uusia operatiivisia ja
kyberturvallisuuteen liittyviä riskejä.

Resilientin energiajärjestelmän varmistami-
nen muuttuvassa toimintaympäristössä edel-
lyttää yhteensovittamista. Keskeisiä tekijöitä
tässä ovat kysynnän joustavuus, resurssien
hajauttaminen, automaation kehittäminen
sekä kyky muodostaa tarvittaessa alueelli-
sia, itsenäisesti toimivia energiasaarekkeitä.
Kotimaisen energiatarjonnan ja osaamisen
vahvistaminen vähentää ulkoisia riskejä.
Sääntelyn tulee mahdollistaa nämä muu-
tokset tukemalla pitkän aikavälin verkko- ja
kapasiteettikehitystä sekä uusia toimintamal-
leja. Samalla järjestelmän luotettavuus tulee
turvata.

Ihmiset ja markkinat

1. Markkinat ja hintasignaalit tukevat ener-
giajärjestelmän tehokasta toimintaa ja
kehittämistä.
2. Sähköistyminen muuttaa kysynnän ja tar-
jonnan rakenteita.
3. Energiayhteisöt tarjoavat ihmisille aktiivi-
sempia tapoja osallistua energiamurrok-
seen.

Energiamarkkinat ohjaavat investointeja ja
järjestelmän toimintaa hintasignaalien avulla.
Tukkumarkkinoiden hinnoittelu varmistaa,
että kustannustehokkaimmat energiamuodot
ovat käytössä ja että markkinat antavat sig-
naaleja uusille investoinneille. Dynaamiset
hinnoittelumekanismi auttavat sovittamaan
yhteen tarjontaa ja kysyntää sekä hillitse-
mään hinnanvaihteluihin perustuvaa energia-
käyttäytymistä.

Sähköistyminen lisää sähkön kysyntää ja
muuttaa kulutustottumuksia. Uudet kuormi-
tustyytit, kuten sähköajoneuvot ja datakeskuk-
set, kasvattavat sähköverkon kuormitusta ja
asettavat uusia vaatimuksia infrastruktuurille
ja joustolle. Pienasiakkaille on otettu käyttöön
tehopohjainen verkkotariffi, joilla sähköverkon
kustannuksia jaetaan tasaisemmin.

Samalla energiasiirtymästä tulee entistä
osallistavampi. Kansalaiset, yhteisöt ja ener-
gian tuottajakuluttajat (prosumerit) voivat
aktiivisemmin vaikuttaa energian tuotantoon

ja kulutukseen. Tämä lisää järjestelmän joustavuutta, mutta järjestelmässä pitää kuitenkin huomioida oikeudenmukaisuus, osallisuus ja saavutettavuus sekä ihmisten osaaminen ja valmiudet osallistua energiayhteisöihin. Demokraattisemmat ja hajautetummat energijärjestelmät vähentävät energijärjestelmän haavoittuvuutta ja vahvistavat yhteiskunnallista kriisi- ja muutoskestävyyttä.

Kestävyys ja planetaariset rajat

1. Energiamurroksen tulisi tukea muutosta, jossa ihmisen toiminta pysyy planeettarisissa rajoissa ja sosiaalinen oikeudenmukaisuus vahvistuu.
2. Ilmastoa ja luonnon monimuotoisuutta tulee tarkastella kokonaisuutena ja pyrkiä ohjaamaan niitä kokonaisvaltaisilla ratkaisuilla, jotka koskevat myös maankäytön suunnittelua.
3. Hiilenhallinnalla voidaan tukea kestävää energiamurrosta.

Energiamurros tarjoaa mahdollisuuden kestävyys siirtymään, joka ulottuu energijärjestelmää laajemmalle. Murros voi tukea ihmisen toiminnan sopeuttamista planeetariisiin rajoihin, kun siirrytään vähäpäästöisiin energijärjestelmiin. Planetaariset rajat, kuten ilmaston vakaus, luonnon monimuotoisuus, maankäyttö ja vesivarat, määrittävät ihmiskunnalle turvallisen toiminta-alueen. Ilmastomuutoksen ratkaisut eivät saa vaarantaa muita näistä rajoista.

Energiainfrastruktuurin ja siihen liittyvän teollisen toiminnan laajentaminen edellyttää huolellista suunnittelua, jotta eri tavoitteiden välisiä ristiriitoja voidaan tunnistaa ja hallita ja siten vähentää mahdollisia ympäristöhaittoja. Lisäksi osallistava ja oikeudenmukainen päätöksenteko varmistaa sosiaalista hyväksyttävyyttä ja ehkäisee energiamurrosta hidastavaa yhteiskunnallista vastustusta.

Hiilenhallinnalla voidaan tukea kestävyyttä. Tämä tarkoittaa fossiilisen hiilen käytöstä luopumista ja biomassan kestävää hyödyntämistä. Hiilidioksidin talteenotto, hyödyntäminen ja varastointi sekä Power to X teknologiat tukevat vähäpäästöisten järjestelmien kehittämistä ja hiilen entistä tehokkaampaa käyttöä.

Koulutus ja osaaminen

1. Energiamurros edellyttää monimuotoisemman ja kestävyteen suuntautuneen työvoiman määrän kasvua.
2. Koulutusjärjestelmiä tulee kehittää siten, että opiskelijat saavat valmiudet vastata monimutkaisiin yhteiskunnallisiin, ympäristöä koskeviin ja teknologisiin kysymyksiin.
3. Tulevaisuuden ammattilaiset tarvitsevat kykyä hallita ja edistää järjestelmätason muutoksia.

Energiamurros muuttaa työmarkkinoita ja lisää laaja-alaisemmalle osaamisen tarvetta. Vahvan teknisen perusosaamisen ohella tarvitaan ammattilaisia, joilla on ymmärrystä energijärjestelmien ympäristöä koskevista ja yhteiskunnallisista ulottuvuuksista.

Vastatakseen näihin uusiin tarpeisiin koulutusjärjestelmiä on kehitettävä päivittämällä opetussuunnitelmia, vahvistamalla yhteistyötä korkeakoulujen ja elinkeinoelämän välillä sekä integroimalla kestävyysnäkökulma kaikille eri tieteenaloille. Jotta eri väestöryhmät voivat osallistua energiamurrokseen, heille on taattava pääsy koulutukseen ja täydennyskoulutukseen.

Tulevaisuuden ammattilaisilta edellytetään kykyä työskennellä yli tieteenalarajojen ja hallita monimutkaisia kokonaisuuksia. Teknisen osaamisen lisäksi korostuvat systeminen ajattelu, viestintätaidot ja sidosryhmäyhteistyö, joita tarvitaan energiamurroksen ohjaamisessa ja ratkaisujen kehittämisessä.

1. JOHDANTO: ENERGIAJÄRJESTELMIEN MUUTOKSET

Kirjoittajat: Hanna Paulomäki, Eeva-Lotta Apajalahti, Juhani Hyvärinen, Ayesha Sadiqa ja Esa Vakkilainen

1.1 LUT-yliopiston energiaselonteko 2026

Suomessa energiamurros on jo pitkällä. Fossiilivapaa sähköntuotanto luo vahvan perustan puhtaaseen ja uusiutuvaan energiaan nojaavalle taloudelle. Se mahdollistaa uusien toimialojen kasvun, investointeja ja arvонуontia sekä tukee laajempaa siirtymää kohti hiilineutraalia yhteiskuntaa. Myönteisestä kehityksestä huolimatta murros nostaa esiin myös uusia kysymyksiä, esimerkiksi: Miten varmistetaan puhtaan ja kohtuuhintaisen energian saatavuus kaikille myös pitkinä talvikausina? Mitä kehityspolkuja valitaan tulevaisuuden energiaselontekojen rakennettaessa? Miten siirtymää ohjataan: kuka määrittää suunnan, millaisia ohjaus- ja sääntelykeinoja käytetään ja mikä on eri toimijoiden, kuten viranomaisten, yritysten tai kansalaisten, tehtävä? Energiamurroksen haasteet eivät ole pelkästään teknisiä, vaan ne ovat luonteeltaan yhteiskunnallisia ja koskevat ympäristöä. Vaikutukset ulottuvat energia-alaa laajemmalle, ja päätökset muovaavat sekä yhteiskunnan rakenteita että ihmisten arkea.

LUT-yliopiston energiaselonteot kokoavat yhteen tieteesen perustuvia näkemyksiä energiaselontekojen rakennettaessa, ja niillä pyritään tukemaan yhteiskunnallista päätöksentekoa. Tavoitteena on osallistua energiamurrosta koskevaan yhteiskunnalliseen keskusteluun, lisätä ymmärrystä sekä tukea päätöksentekoa sekä yksityisiä toimijoita ja asiantuntijoita

työssään. Selonteissa kootaan yhteen myös LUT-yliopiston laaja-alaista energiatutkimusta ja esitellään yliopiston tutkijoiden osaamista.

Vuoden 2026 energiaselonteko, *Energiaselontekojen turvaaminen – energia, luonto ja yhteiskunta*, jatkaa aiempien selontekojen linjaa, joissa tarkasteltiin hiilineutraaliutta (2022) sekä turvallista, kestävä ja kohtuuhintaista energiaa (2024). Tässä selonteossa tarkastelemme, miten energiaselontekojen voidaan turvata energiamurroksen kiihtymisen, geopolitiittisten muutosten sekä kasvavien ympäristö- ja yhteiskunnallisten huolien aikana. Turvallisuus ymmärretään laajasti: se ei tarkoita ainoastaan teknistä luotettavuutta, vaan myös muutosjoustavuutta suhteessa globaaleihin riskeihin, kustannusten ja hyötyjen oikeudenmukaista jakautumista sekä kykyä toimia planetaarisissa rajoissa.

Selonteossa tarkastellaan teemoja useista eri näkökulmista. Se tuo esiin geopolitiittiset kysymykset ja kiertotalousratkaisut, energiaselontekojen resilienssin, markkinadynamiikan ja kansalaisten osallistumisen sekä syventyy kestävyystarkastelussa energiaselontekojen, luonnonjärjestelmien ja yhteiskunnallisen kestävyden väliseen vuorovaikutukseen. Lisäksi selonteko esittää päivitetyn kokonaiskuvan keskeisistä energiateknologioista ja ratkaisuista, jotka mahdollistavat käynnissä olevan murroksen.

1.2 Suomen energiajärjestelmien kehitys

Suomen nykyinen energiajärjestelmä on pitkän aikavälin rakenteellisen kehityksen tulos. Sitä ovat muovanneet teollistuminen, energiapoliittiset valinnat ja muuttuva luonnonvarojen käyttö. Tässä osassa kuvataan lyhyesti keskeiset kehitysvaiheet, jotka ovat muovanneet siirtymää kohti fossiilitonta energiajärjestelmää. Historiallisen kehityspolun tarkastelu auttaa ymmärtämään, miten nykyinen, energialähteiltään monipuolinen tuotanto, infrastruktuuri ja instituutiot ovat kehittyneet ja miksi tietyt kehityspolut ovat korostuneet. Vuosikymmeniä sitten tehdyt päätökset vaikuttavat yhä järjestelmän toimintaan ja siihen, millaisia vaihtoehtoja nykyisin on käytettävissä.

Itä-Suomea voidaan pitää Suomen sähköistymisen kehtona. Sähköntuotanto ja laajamittainen sähkönsiirto käynnistyivät Suomessa 1920-luvun lopulla Imatran vesivoimalaitoksen sekä ensimmäisen Etelä-Suomen poikki Turkuun saakka vedetyn 110 kV:n siirtoyhteyden rakentamisen myötä. Imatran voimalaitoksen enimmäisteho oli tuolloin 120 MW, ja täydellä kapasiteetilla toimien se olisi ylittänyt silloisen kansallisen sähkönkulutuksen. Imatran voimalaitoksen merkitys on ilmeinen, sillä se toimitti yli 90 prosenttia Helsingin sähköstä neljän vuosikymmenen ajan. Vertailun vuoksi Suomen keskimääräinen vuosittainen sähkötehon tarve 2020-luvulla on vakiintunut noin 10 000 MW:iin, joka on noin 80-kertainen verrattuna vuosisadan takaiseen tasoon.

Alueluovutukset Neuvostoliitolle 1940-luvun alussa veivät Suomelta noin kaksi kolmasosaa silloisesta vesivoimakapasiteetista. Sodan jälkeisinä vuosikymmeninä 1950–1970-luvuilla sähkönkulutus kasvoi tasaisesti erityisesti metsäteollisuuden ja metallinjalostusteollisuuden vetämänä sekä kotitalouksien sähkölaitteiden yleistytessä. Valtion omistama Imatran Voima ja suuret teollisuusyritykset rakensivat valtakunnalliset 220 kV:n ja myöhemmin 400 kV:n siirtoyhteydet, jolloin vesivoimalla tuotettua sähköä voitiin siirtää pohjoisilta alueilta myös Etelä-Suomeen.

Ydinvoimalaitosten rakentaminen käynnistyi 1970-luvun puolivälissä, ja neljä yksikköä, kaksi Loviisassa ja kaksi TVO:n Olkiluodossa, aloittivat toimintansa vuosina 1978–1981. Tuolloin energiapoliittisia päätöksiä ohjasivat taloudelliset tekijät, mutta myös geopolittiset paineet ja tasapainoilu idän ja lännen välillä, sillä ydinvoimateknologiaa tuotiin sekä idästä (Neuvostoliitosta: tekniikka mukautettiin länsimaisiin turvallisuusstandardeihin) että lännestä (Ruotsista). Ensimmäinen Suomen ja Ruotsin välinen merikaapeliyhteys valmistui vuonna 1989. Rajat ylittäviä siirtoyhteyksiä rakennettiin sekä itään että länteen pääosin mahdollistamaan sähkön tuonti kulutushuipujen aikana.

Suomeen rakennettiin suuria hiilivoimalaitoksia neljän ydinvoimalan rinnalle tukemaan lämmön sekä sähkön ja lämmön yhteistuotantoa. Kaukolämpöverkko laajeni nopeasti 1960-luvulta 1980-luvulle suomalaisissa kaupungeissa ja taajamissa, mikä oli merkittävä järjestelmätason muutos verrattuna aiempaan, pienimuotoisempaan erillislämmitykseen. Kunnalliset yhteistuotantolaitokset, joista monet olivat kunnan ja paikallisten suurten teollisuuslaitosten yhteisomistuksessa, käyttivät aluksi polttoaineinaan biomassaa, hiiltä ja turvetta ja myöhemmin maakaasua. Vaikka maakaasuputkiyhteys Neuvostoliitosta rakennettiin jo 1970-luvulla öljykriisin jälkeen lisäämään vaihtoehtoja, suuret maakaasuun perustuvat yhteistuotantolaitokset rakennettiin pääosin vasta 1990-luvulla. Sellu- ja paperiteollisuuden kasvu sekä kaukolämmön nopea laajeneminen lisäsivät biomassan käyttöä, sillä selluntuotannon sivuvirtoja poltettiin teollisissa yhteistuotantolaitoksissa tehtaiden energiatarpeisiin ja paikalliseksi kaukolämmöksi.

Ydinvoiman käyttöön otolla 1980-luvun alussa oli merkittävä, joskin tahaton, vaikutus Suomen kasvihuonekaasupäästöihin. Sähköntuotannon hiilidioksidin ominaispäästöt vähenivät lähes neljäsosaan: vuoden 1975 huipusta 450 gCO₂/kWh(e) alle 120 gCO₂/kWh(e):iin vuonna 1982. 1980-luvun puoliväliin mennessä ydinvoiman osuus oli noin 37 prosenttia

sähkön kokonaiskulutuksesta, mikä teki siitä suurimman fossiilittoman sähkönlähteen.

Liittyessään Euroopan unioniin vuonna 1995 Suomi sääti sähkömarkkinalain, joka uudisti sähkötoimialaa erottamalla sähköverkkoliiketoiminnan tuotannosta ja sähkömyynnistä. Näin sähkömyynti avattiin kilpailulle. Vuonna 1997 Fingrid perustettiin valtakunnalliseksi kantaverkkoyhtiöksi, ja Suomi liittyi yhteiseen pohjoismaiseen Nord Pool -sähkömarkkinaan. Vuodesta 1998 lähtien sähköön loppukäyttäjät ovat voineet valita sähkömyyjänsä, kun taas kaukolämpö on säilynyt paikallisena monopolina.

Vuosina 1980–2007 sähkönkulutus kasvoi Suomessa tasaisesti noin 2 TWh:n vuosivauhtia ja vuonna 2007 saavutti huippunsa eli 90 TWh. Sähköntuotannon hiilidioksidipäästöt nousivat 300 gCO₂/kWh(e):iin vuoteen 2003 mennessä, mutta laskivat nopeasti 100 gCO₂/kWh(e):iin vuoteen 2015 mennessä. Laskua vauhdittivat biomassan käytön lisääntyminen kunnallisissa yhteistuotantolaitoksissa sekä suhteellisen suuri sähköntuontimäärä. Vaikka sähköön kokonaiskulutus on pysynyt vakaana 80–87 TWh:ssa vuodesta 2007 lähtien, on kulutuksen rakenteessa tapahtunut merkittäviä muutoksia. Teollisuuden sähkönkulutus, erityisesti metsäteollisuudessa, laski 12 TWh vuosien 2007 ja 2025 välillä, kun taas teollisuuden ulkopuolinen kysyntä kasvoi 6 TWh. Kausivaihtelu on edelleen suurta. Kesän ja talven kulutuksen ero on 10–15 TWh vuodessa. (Fingrid, 2024a; Tilastokeskus, 2024.)

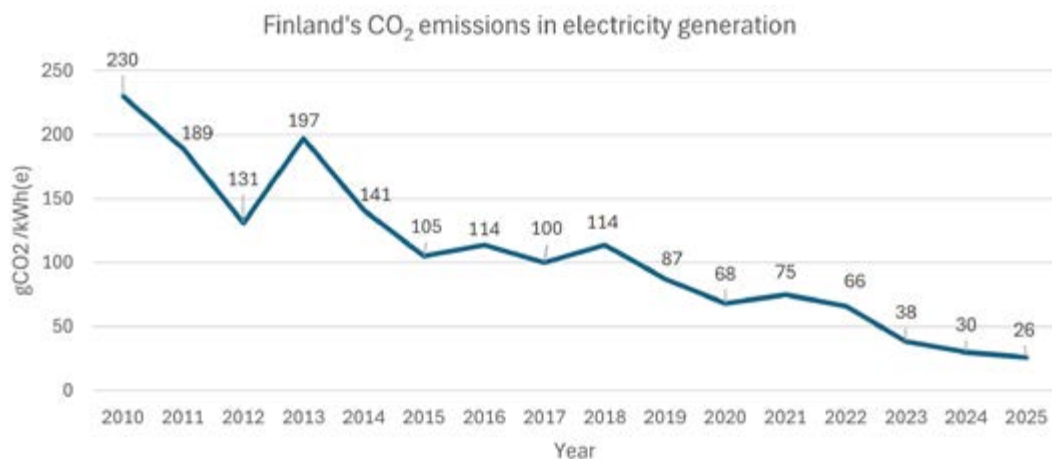
Tuulivoima lähti Suomessa voimakkaaseen kasvuun syöttötariffin käyttöönoton jälkeen vuonna 2010, jolloin asennettu tuulivoimakapasiteetti oli vain 196 MW. Vuoteen 2018 mennessä, jolloin syöttötariffi suljettiin uusilta hankkeilta, kapasiteetti oli kasvanut lähes viisinkertaiseksi vain seitsemässä vuodessa ja oli tuolloin 2 000 MW. Vuoteen 2025 mennessä tuulivoimasta oli tullut Suomen toiseksi suurin sähköntuotantomuoto. Se tuotti 22 TWh sähköä 9 433 MW:n asennetulla kapasiteetilla ja kattoi 26 prosenttia Suomen sähkönkulutuksesta. Myös aurinkovoiman

tuotanto on laajentunut nopeasti. Vuonna 2025 Suomessa valmistui seitsemän uutta teollisen mittakaavan aurinkovoimalaa, jotka lisäsivät kapasiteettia 227 MW. Vuoden 2025 loppuun mennessä teollisen mittakaavan aurinkovoimaa oli asennettu noin 352 MW ja Suomen asennettu kokonaiskapasiteetti oli 1 512 MW (Fingrid, n.d.). Nopea kasvu osoittaa, että aurinkovoimaa voidaan nykyisin toteuttaa teollisessa mittakaavassa myös pohjoisissa olosuhteissa.

Olkiluoto 3:n käyttöönotto vuonna 2023 nosti ydinenergian osuuden sähköntuotannosta 37 prosenttiin kansallisesta kokonaistuotannosta ja vähensi hiilidioksidipäästöjä lähes puoleen vuodesta 2022 vuoteen 2023 (ks. kuva 1.1). Vuonna 2025 sähköön kokonaistuotanto Suomessa oli 80 TWh, josta uusiutuvan energian osuus oli 55 prosenttia, ja tuotetusta sähköstä 98 prosenttia oli fossiilitonta. (Tilastokeskus, 2024.) Sähköntuotannossa ydinvoima tuotti 32 TWh, ja toiseksi suurimmat lähteet olivat tuulivoima 22 TWh, vesivoima 13 TWh ja bioenergia 78 TWh (Tilastokeskus, 2024).

Kaukolämmön tuotannossa on 2020-luvulla siirrytty nopeasti pois fossiilisista polttoaineista. Turpeen käyttö on vähentynyt neljäsosaan, ja Helsingin Salmisaaren viimeinen merkittävä hiililaitos suljettiin huhtikuussa 2025 ennakoiden Suomen hiilikieltoa vuoteen 2029 mennessä. Nykyaikainen kaukolämpö tukeutuu yhä enemmän biomassaan, kunnallisiin ja teollisiin jätteisiin, hukkalämmön talteenottoon, suurteholämpöpumppuihin sekä sähköön. Sähkökattilat ja lämpövarastot tuottivat vuonna 2025 yhteensä 2,6 TWh kaukolämmön 35 TWh:n kokonaismäärästä.

Suomi on saavuttanut merkittävän tavoitteen fossiilivapaalla kehityspolullaan. Sähköntuotanto on nyt lähes täysin fossiilitonta, ja hiilidioksidipäästöt ovat vähentyneet voimakkaasti viime vuosikymmenen aikana (ks. kuva 1.1). Tämä saavutus perustuu ydin-, tuuli- ja vesivoimainvestointeihin sekä vahvaan poliittiseen tahtoon ja politiikkatoimiin, jotka ovat tukeneet fossiilisten polttoaineiden käytön alasajoa.



Kuva 1.1. Suomen hiilidioksidipäästöt tuotettua kilowattituntia kohden vuosina 2010–2025 (Energiateollisuus, 2025)

Suomen fossiiliton sähköjärjestelmä heijastelee vuosikymmenten mittaista rakenteellista kehitystä, johon ovat vaikuttaneet varhaiset investoinnit ydinvoimaan, teollisuuden rakennemuutos sekä kotimaisten fossiilisten polttoaineiden puute. Ydinvoima on edelleen fossiilitoman sähköntuotannon kulmakivi, kun taas lähivuosien sähköistyminen perustuu ensisijaisesti aurinko- ja tuulivoimaan, joiden odotetaan jatkavan voimakasta kasvuaan.

Tällä hetkellä nopeasti lisääntyvä uusiutuva energia, laajeneva sähköistyminen sekä uudet suuret sähkönkäyttäjät, kuten datakeskukset ja vedyn tuotanto, muovaavat energiajärjestelmää kasvattamalla sähkönkysyntää. Tämä lisää järjestelmän integraation ja optimoinnin tarvetta. Sään mukaan vaihtelevan sähköntuotannon osuuden kasvu sekä alhaisen sähkönhinnan jaksot edellyttävät entistä suurempaa joustavuutta, joka on mahdollista kysyntäjouston, energian varastoinnin ja mukautuvan kapasiteetin avulla. Näitä tekijöitä tulee vahvistaa, jotta energiajärjestelmän luotettavuus voidaan säilyttää, fossiilitonta energiasiirtymää voidaan jatkaa ja hyödyntää Suomen kehittyvän energiajärjestelmän täyttä potentiaalia.

1.3 Globaali energiamurros

Energiajärjestelmät kehittyvät jatkuvasti. Tällä hetkellä keskiössä ovat sähköön perustuvat päästövähennystoimet lämmityksessä

ja liikenteessä (ns. järjestelmäintegraatio), fossiilitoman sähköntuotannon lisääminen sekä uudet investoinnit sähköä käyttävään teollisuuteen ja niihin liittyviin energiaratkaisuihin. Nämä kehityssuunnat liittyvät globaaliin energiamurrokseen, joka etenee kiihtyvällä vauhdilla. Murrokseen vaikuttavat geopolittiset muutokset, teknologinen kehitys sekä taloudellisten ja yhteiskunnallisten painopisteiden muuttuminen.

Meneillään oleva globaali energiamurros on hajautunutta ja etenee alueellisesti eri tahtiin. Vaikka kehitys jatkuu, puhtaan energian painotukset vaihtelevat alueittain ja teknologioiden käyttöönotto ja skaalaaminen etenevät epätasaisesti. Suuret talousalueet tekevät uusia strategisia valintoja, eikä ilmastomuutoksen hillintä ole enää samanlainen yhtenäinen globaali prioriteetti kuin aiemmin. Yhdistynyt kuningaskunta ja Euroopan unioni ovat kumpikin asettaneet uudet Pariisin sopimuksen mukaiset päästövähennystavoitteet vuodelle 2035, ja niiden saavuttaminen edellyttää merkittäviä lisätoimia. Kiinan asettama uusi tavoite on edistyksellinen, sillä se edellyttää ensimmäistä kertaa maan päästöjen kääntymistä laskuun. Sen sijaan Yhdysvaltojen kansallisesti määritelty panos (NDC), joka julkaistiin Bidenin hallinnon viimeisinä päivinä, on käytännössä rauennut Yhdysvaltojen irtautuessa Pariisin ilmasopimuksesta. (Cheung, 2026; IEA, 2026a.)

Vuonna 2024 yli 90 prosenttia uudesta sähköntuotantokapasiteetista perustui uusiutuviin energialähteisiin globaalisti, ja kehitys jatkui samansuuntaisena myös vuonna 2025 (IRENA, 2025a). Sähkön tasoitettu tuotantokustannus (LCOE), joka kuvaa sähkön keskimääräistä tuotantokustannusta voimalaitoksen elinkaaren aikana, on uusiutuvilla vaihtelevilla energialähteillä pienempi kuin perinteisillä tuotantoteknologioilla (IRENA, 2025b). Tästä huolimatta fossiilisiin polttoaineisiin perustuva sähköntuotanto kasvaa edelleen. Vaihtelevan sähköntuotannon hallinta ja tuotannon notkahdusten tasapainottaminen vaativatkin taloudellisesti kestävien ratkaisujen jatkuvaa kehittämistä.

Uusiutuvan sähköntuotannon kapasiteetti kasvaa jatkuvasti nopeammin verrattuna Kansainvälisen energijärjestön (IEA) ennusteisiin (Lopez ym., 2025), ja lisäksi energiaennusteissa käytetyt taloutta koskevat oletukset ovat liian varovaisia, kun huomioidaan markkinatodellisuus (Vatankhah Ghadim ym., 2025). Tämä koskee erityisesti aurinkosähköä, joka on jo usean vuoden ajan ollut nopeimmin kasvava sähköntuotantomuoto. Kansainvälisen uusiutuvan energian energijärjestön (IRENA) mukaan aurinkoenergian osuus on ollut kaksi kolmasosaa kaikesta globaalisti lisäystä sähköntuotantokapasiteetista kaikissa teknologioissa (IRENA, 2026), ja se on jatkuvasti ylittänyt kaikki ennusteet.

Euroopan unionissa energiamurros ei ole enää vain ilmastopoliittinen hanke, vaan siitä on tullut strateginen välttämättömyys huoltovarmuuden, taloudellisen kilpailukyvyn, omavaraisuuden ja muutosjoustavuuden näkökulmasta. EU on ottanut käyttöön useita politiikkatoimia fossiilisten polttoaineiden käytön vähentämiseksi ja asettanut tavoitteeksi uusiutuvien energialähteiden osuudeksi energian loppukulutuksesta 42,5 prosenttia vuoteen 2030 mennessä. Tällä hetkellä fossiilisten polttoaineiden tuonti kattaa 58 prosenttia EU:n primäärienergian kulutuksesta, joten EU:ssa reagoidaan herkästi markkinoiden heilahteluihin ja geopolitiisiin jännitteisiin. EU:n merkittävimmät fossiilisen energian tuojamaat ovat Norja (15 prosenttia öljystä ja 51 prosenttia maa-

kaasusta) sekä Yhdysvallat (58 prosenttia nesteytetystä maakaasusta, LNG), kun taas Venäjän osuudet ovat vähentyneet tasaisesti ja pienenevät edelleen 19. pakotepaketin myötä. (IEA, 2025a.)

Globaalit kestävyys- ja päästöjen vähentämiseen tähtäävät toimet ovat lisänneet energiateknologioiden käyttöönottoa ja parantaneet energiatehokkuutta. Tähän mennessä 77 prosenttia maailman maista on asettanut joko laissa tai on poliittisesti sitoutunut nollapäästötavoitteisiin. Barth ym. (2026) tarkastelevat kahdeksan keskeisen päästöjä vähentävän teknologian (maatuuli, merituuli, aurinkosähkö, akut, ydinvoima, vety, kestävät polttoaineet ja sähköajoneuvot) käyttöönoton ja Euroopan sekä Yhdysvaltojen vuodelle 2030 asettamien tavoitteiden välistä todellisuuskulua. Tulokset osoittavat, että molemmat alueet ovat jäämässä jälkeen päästövähennystavoitteistaan. Samalla kun painopisteet muuttuvat, geopolitiittinen toimintaympäristö on käynyt aiempaa arvaamattommaksi ja tämä voi hidastaa energiamurroksen etenemistä merkittävästi. Puolustusmenojen kasvu ja tuontitulleihin liittyvä epävarmuus voivat vähentää kansallisia resursseja päästöjen vähentämiseksi. Lisäksi tullit voivat heikentää globaalien toimitusketjujen tehokkuutta, mikä saattaa edelleen hidastaa siirtymää puhtaampiin energiaratkaisuihin.

1.4 Energiariippuvuuksien ja geopolitiikan muutos

Energia on pitkään ollut geopolitiittisen vaikuttamisen keskiössä, sillä fossiiliset energiamurrokset ovat keskittyneet rajalliseen määrään maita. Tämä muovaa edelleen globaaleja riippuvuussuhteita sekä valtioiden poliittista vaikutusvaltaa. Selkeä muistutus tästä tapahtui helmikuun 2026 lopussa, kun Israelin ja Yhdysvaltojen joukot hyökkäsivät Iraniin. Iskut lisäsivät epävarmuutta Lähi-idässä erityisesti Hormuzinsalmessa, jonka kautta kulkee noin viidennes maailman öljystä. Hyökkäykset johtivat merikuljetusten tilapäiseen keskeytymiseen ja käynnistivät merkittävän fossiilisten polttoaineiden toimitushäiriön. Tämä nosti jälleen esiin öljy- ja kaasuriippuvuuksiin liittyvät riskit, kun energian hinta nousi

nopeasti. Tilanteen seurauksena monien maiden odotetaan vauhdittavan toimia, joilla energiantuontiriippuvuutta voidaan vähentää. Tämä lisää entisestään uusiutuvan energian, ydinvoiman ja sähköistymisen strategista merkitystä.

Siirtymä fossiilisiin polttoaineisiin perustuvista energiajärjestelmistä on käynnissä, mikä voi muuttaa geopolittista toimintaympäristöä nopeasti. Vaikka uusiutuvaan energiaan perustuvat järjestelmät murentavat vanhoja geopolittisia asetelmia, syntyy vanhojen tilalle uusia riippuvuuksia.

Suurten maiden energiastrategioiden väliset erot ovat kasvaneet, eikä siirtymä uusiutuviin energiajärjestelmiin ole enää yhtä yhtenäinen kuin vielä muutama vuosi sitten. Yhdysvallat ja Venäjä nojaavat edelleen fossiiliseen energiaan ylläpitääkseen geopolittista vaikutusvaltaansa, vaikka uusiutuvan sähkön tuotanto kasvaa nopeasti, erityisesti Yhdysvalloissa. Kiina puolestaan vähentää fossiiliriippuvuuttaan laajamittaisilla tuuli- ja aurinkovoimainvestoinneilla, mikä mahdollistaa kasvavan sähkönkysynnän kattamisen yhä suuremmassa määrin puhtaalla energialla. Euroopan unioni pitää energiamurrosta turvallisuus- ja kilpailukysymyksenä, ja se on kiihdyttänyt irtautumista fossiilisten polttoaineiden tuonnista Venäjän helmikuussa 2022 aloittaman hyökkäyssodan jälkeen. Muutos on ollut merkittävä, sillä vuonna 2025 tuuli- ja aurinkovoima ylittivät ensimmäistä kertaa fossiiliset polttoaineet EU:n sähköntuotannossa.

Fossiilittoman ja uusiutuvan sähkön tuotannon lisääminen mahdollistaa teollisuuden sähköistymisen sekä fossiilisten polttoaineiden ja raaka-aineiden korvaamisen lämmitys- ja liikennesektoreilla. Suomessa teollisuuden sähköistyminen voi moninkertaistaa sähkönkulutuksen, erityisesti jos vientipotentiaali toteutuu sähköpohjaisissa tuotteissa, kuten synteettisissä polttoaineissa, kemikaaleissa ja materiaaleissa. Tämä edellyttää mittavia investointeja myös akkuihin (sähköajoneuvoihin ja sähköjärjestelmiin) sekä muihin energiaravastointiteknologioihin. Muutos synnyttää uusia riippuvuussuhteita ja muokkaa geopolittista toimintaympäristöä.

Uudet riippuvuudet liittyvät Euroopan unionissa muun muassa aurinkosähkö- ja tuulivoimateknologioiden globaaleihin toimitusketjuihin sekä kriittisiin mineraaleihin (ks. luku 2 geopolitiikasta ja kriittisistä mineraaleista). Kiina hallitsee näitä toimitusketjuja laajasti, sillä se tuottaa yli 70 prosenttia maailman aurinkopaneeleista ja vastaa lähes puolesta maailman tuuliturbiinien valmistuskapasiteetista. Lisäksi Kiinalla on hallitseva asema harvinaisten maametallien tuotannossa ja jalostuksessa sekä merkittävä osuus keskeisistä globaaleista toimitusketjuista. Esimerkiksi Kiina on nykyisin merkittävin toimittaja 23:lle Euroopan komission kriittisiksi määrittelemälle metallille. Akkusektorilla EU:n riippuvuus Kiinasta on merkittävä: Kiinasta hankitaan 37 prosenttia raaka-aineista (EU:n osuus 2 %), 72 prosenttia jalostetuista materiaaleista (4 %), 67 prosenttia komponenteista (3 %) ja 75 prosenttia kokoonpanoista (6 %). (Carrara ym., 2023.)

Suomella on hyvä asema energiamurroksessa, sillä sähköntuotanto on jo pitkälti fossiilitonta, sähköverkko on vahva, sähkön hinnat kilpailukykyisiä sekä maapinta-ala harvaan asuttua, mikä tarjoaa hyvät edellytykset uusiutuvan energian tuotannolle. Metsäteollisuudesta saatavan biogeenisen hiilidioksidin saatavuus mahdollistaa myös synteettisten polttoaineiden ja kemikaalien tuotannon. Suomi voi myös osaltaan vähentää EU:n Kiina-riippuvuutta, sillä EU-maista juuri Suomella on kaikkien merkittävien akku-mineraalien esiintymiä. Suomella on myös pitkä kokemus kaivostoiminnasta ja metallien jalostuksesta, joten osaavaa työvoimaa sekä vahvaa tutkimus- ja yhteistyöpohjaa löytyy. Tämä avaa Suomelle useita uusia teollisia kehitysmahdollisuuksia, mutta luo myös uusia luonnonvarojen saatavuuteen ja ympäristövaikutuksiin liittyviä jännitteitä. Siten Suomi on osa laajempaa globaalia murrosta, jossa energia-, teollisuus- ja geopolittisia kysymyksiä ohjaavat yhä vahvemmin teknologinen kehitys sekä poliittiset ja strategiset valinnat.



1.5 Kasvava kysyntä ja järjestelmätason haasteet

Energiamurroksen haasteena on sähkön kysynnän nopea kasvu ja sen muuttuva profiili. Vaihtelevan uusiutuvan sähköntuotannon lisääntyminen, teollisuuden, lämmityksen ja liikenteen sähköistyminen sekä data-keskusten kasvava energiantarve lisäävät sähkönkulutusta ja muuttavat sähköverkon kuormitusta. Tämä johtaa korkeampiin huipputehotarpeisiin ja suurempaan kulutusvaihteluun, mikä edellyttää investointeja säätö- ja varavoimakapasiteettiin sekä joustoratkaisuihin. Samalla kysyntäjousten houkuttelevuus kasvaa ja vaihtelevan uusiutuvan tuotannon tasapainoa on parannettava. Haaste korostuu, kun huomataan, ettei nykyinen sähkömarkkinamalli tarjoa riittäviä kannustimia rakentaa varavoima- ja huipputehokapasiteettia.

Murroksessa ovat haasteina myös järjestelmäintegraatio ja infrastruktuuri. Uusiutuvan energian tuotannon voimakas lisääminen edellyttää sähköverkon laajentamista ja parempaa yhteensovittamista sähkö-, lämpö-, liikenne- ja teollisuussektorien välillä. Sektorikytkentä eli näiden sektorien integrointi sähköistämisen sekä joustavuutta tarjoavien energiakantajien, kuten vedyn ja lämmön, avulla voi parantaa koko energiajärjestelmän tehokkuutta ja resilienssiä. Se kuitenkin lisää järjestelmän monimutkaisuutta ja keskinäisriippuvuuksia.

Resurssirajoitteet voivat hidastaa energiamurrosta. Monien mineraalien kasvava

kysyntä herättää huolta niiden saatavuudesta, kestävästä käytöstä ja kiertotalousratkaisuista. Uusiutuvan sähköntuotannon laajentamiseen liittyy uusia maankäytön muotoja, mikä edellyttää entistä huolellisempaa arviointia siitä, miten maa-alueita kohdennetaan ja miten nämä kehityskulut vaikuttavat ekosysteemeihin ja luonnon monimuotoisuuteen.

Energiamurros on ennen kaikkea yhteiskunnallinen muutos. Infrastruktuurihankkeet toteutetaan aina tietyillä alueilla, joilla ne vaikuttavat paikallisten ihmisten ja yhteisöjen elämään. Energiahankkeet voivat kohdata paikallista vastustusta, kun kustannusten ja hyötyjen jakautuminen herättää kysymyksiä oikeudenmukaisuudesta ja sosiaalisesta kestävydestä. Oikeudenmukaisen siirtymän varmistaminen edellyttää paikallisten yhteisöjen osallistumista päätöksentekoon sekä paikallisten ja alueellisten vaikutusten huomioimista. Energiamurros on siten jatkuva yhteiskunnallinen prosessi, jossa teknologinen kehitys, ympäristön reunaehdot ja sosiaaliset arvot on sovittava yhteen.

Tätä taustaa vasten LUTin kolmas energiase-lonteko tuo esiin useita toisiinsa kytkeytyviä näkökulmia, jotka muovaavat energiamurrosta käytännössä: geopolitiikka ja kiertotalous, järjestelmän resilienssi, ihmiset ja markkinat, kestävyys sekä muutoksen mahdollistavat teknologiat. Yhdessä nämä näkökulmat avaavat keskeisiä haasteita ja ratkaisuja, jotka liittyvät energiajärjestelmien turvaamiseen muuttuvassa maailmassa.

2. GEOPOLITIikka JA KRIITTISTEN MINERAALIEN TURVAAMINEN

Kirjoittajat: Alicja Dankowska, Joni Lappi, Ayesha Sadiqa, Roosa Talala ja Eeva-Lotta Apajalahti

2.1 Muutokset energian geopolitiikassa

Energiaan liittyvällä geopolitiikalla tarkoitetaan sitä, miten energiariippuvuudet muovavat valtioiden asemaa ja niiden kansainvälistä vaikutusvaltaa (Overland, 2015). Perinteisesti energiageopolitiikka on keskittynyt öljy- ja kaasumarkkinoihin. Riippuvuus fossiilisista polttoaineista on edelleen suurta, sillä noin 80 prosenttia maailman energiankulutuksesta perustuu fossiilisiin polttoaineisiin (IEA, 2025a) ja noin 6,9 miljardia ihmistä eli noin 86 prosenttia maailman väestöstä asuu öljyä, kaasua ja hiiltä maahan tuovissa maissa. Öljy ja muut fossiiliset polttoaineet ovat siten edelleen merkittäviä, vaikka investoinnit uusiutuvaan energiaan ja siihen liittyviin komponentteihin ylittivät fossiiliseen energiaan tehdyt investoinnit ensimmäistä kertaa vuonna 2023 ja lähes kaksinkertaistuivat vuoteen 2025 mennessä (IEA, 2025b).

Fossiilisiin energialähteisiin liittyy erilaisia geopolitiittisia dynamiikkoja. Öljy sekä sen saatavuus ja kuljetusreitit ovat pitkään olleet energiageopolitiikan ytimessä, kun taas hiileen ja kaasuun liittyvät kuljetusreitit ja toimittajarakenne poikkeavat toisistaan, mikä luo erilaisia geopolitiittisia jännitteitä riippuen polttoaineesta. Poikkeuksena on nesteytetty maakaasu (LNG), joka käyttää pitkälti samoja merikuljetusreittejä kuin öljy. Öljymarkkinoiden suuret häiriöt ovat usein kytköksissä geopolitiittisiin konflikteihin, jotka sekä vaikuttavat öljymarkkinoihin että kärjistyvät niiden kautta, kun toimitusreitit katkeavat, tuotanto pysähtyy ja epävarmuus lisääntyy.

Helmikuun 2026 lopussa Israelin ja Yhdysvaltojen joukkojen hyökättyä Iraniin öljykuljetukset ovat lähes kokonaan pysähtyneet Hormuzinsalmessa, joka on keskeinen kuljetusreitti noin viidesosalle maailman öljy- ja maakaasutoimituksille. Tämä on nostanut jyrkästi öljyn hintaa ja aiheuttanut globaalin energiashokin, joka tapahtuu samanaikaisesti toisen energiashokin aiheuttaneen sodan kanssa, jossa Venäjän aloittama hyökkäyssota Ukrainaan jatkuu.

Suoran humanisen kriisin, kuten kuolemien, pelon ja turvattomuuden, lisäksi energiakriisi heikentää energian toimitusvarmuutta ja vaikuttaa voimakkaasti maailman talouteen sekä öljy- ja kaasuteollisuuteen (DNV, 2026). Kansainvälisen energijärjestön pääjohtaja Fatih Birolin mukaan Iranin sota aiheuttaa globaalisti suurempia ja vakavampia vaikutuksia kuin 1970-luvun öljykriisit tai Venäjän hyökkäyssodan vaikutukset kaasumarkkinoihin (Euronews, 2026). Lähi-idässä vaikutukset eivät rajoitu ainoastaan Iraniin, vaan sota on vaurioittanut vakavasti noin 40:tä energijärjestelmän kannalta kriittistä kohdetta yhdeksässä eri maassa (DNV, 2026).

Energiashokki vaikuttaa suoraan öljy- ja kaasuteollisuuteen sekä näitä hyödyntäviin raskaisiin teollisuudenaloihin, lannoiteteollisuuteen ja lento- ja tieliikenteeseen. Lisäksi inflaatio ja korkotasot nousevat, mikä vaikuttaa negatiivisesti kaikkiin investointeihin. Vaikutukset vaihtelevat suuresti maittain. Pieni- ja keskitaloiset maat ovat erityisen haavoittuvia hinnannousuille (DNV, 2026), kun taas esi-

merkiksi Venäjä hyötyy tilanteesta, sillä sen kuljetusreitit eivät ole yhtä pahasti häiriintyneet ja nousevat öljyn hinnat lisäävät tuloja Venäjällä. Euroopan irtautuminen venäläisen fossiilisen energian tuonnista on lisännyt riippuvuutta nesteytetystä maakaasusta (LNG), johon Iranin sota on myös suuresti vaikuttanut. Energiashokki on toisaalta vaikuttanut myönteisesti Kiinan akkuteollisuuteen (DNV, 2026) ja osaltaan korostanut energiamurroksen tärkeyttä.

Fossiilisiin energialähteisiin liittyvien kriisien ja häiriöiden odotetaan nopeuttavan siirtymää uusiutuviin energialähteisiin. Vaikka korkotason nousu heikentää tällä hetkellä uusien investointien kannattavuutta, nykyisen kriisin arvioidaan hyödyttävän uusiutuvaa energiaa, akkuteollisuutta ja ydinvoiman käyttöönottoa (DNV, 2026). Uusiutuvan energian maailmanlaajuinen kasvu muuttaa siten valtasuhteita ja määrittelee uudelleen, mitkä valtiot hyötyvät ja mitkä kärsivät energiamurroksesta. Fossiilisia polttoaineita vievien maiden tulot laskevat pitkällä aikavälillä, samalla kun puhtaan energian sektorit avaavat uusia mahdollisuuksia. Tämä asettaa alueet erilaiseen asemaan, kun myöhään fossiilisista polttoaineista luopuvien maiden öljy- ja kaasumarkkinaosuudet voivat tilapäisesti kasvaa (esim. Persianlahden öljyvaltiot) ja haavoittuvassa asemassa olevien fossiilisen energian tuottajien tulot laskea (esim. Nigeria). Sen sijaan voittajamailla on runsaasti puhdasta energiaa (esim. Islanti).

Siirtyminen uusiutuvaan energiaan pohjautuviin järjestelmiin voi vähentää tuontiriippuvuutta ja edistää ilmastonmuutoksen hillintää päästöjen vähennyttyä, mutta samalla sen odotetaan muuttavan globaalia valtasapainoa (ks. esim. IRENA, 2024a). Tämä muuttuva valtasapaino näkyy jo maiden kansallisissa strategioissa lisääntyneinä geopolittisina jännitteinä. Tämä näkyy myös talousalueiden strategioiden sisäisinä ristiriitoina. Esimerkiksi EU:n strategioissa on ristiriita tarpeessa lisätä päästövähennystoimia samaan aikaan, kun riippuvuus edullisista tuontiratkaisuista Kiinasta kasvaa ja taloudellisen kilpailukyvyn paineet nousevat, kirjoittaa Mario Draghi Euroopan kilpailukykyraportissa (EU, 2024).

Näistä ristiriidoista huolimatta siirtymä uusiutuviin energiajärjestelmiin voi kuitenkin merkittävästi vähentää fossiiliriippuvuuden riskejä ja lisätä maiden energiaomavaraisuutta.

Perinteisesti fossiilisten polttoaineiden tarjonta on ollut vahvasti geopolittista, ja keskitetty infrastruktuuri on ollut altis häiriöille ja hinnat ovat vaihdelleet voimakkaasti. Uusiutuvan energian lisääminen vähentää altistumista poliittisille riskeille, joita nostavat polttoaineiden hinnat, markkinamanipulaatio, pitkien toimitusketjujen katkeaminen sekä ympäristöriskit, kuten öljyvuodot (IRENA, 2024a). Uusiutuvaan energiaan pohjautuvaan energiamurrokseen liittyy myös uusia geopolittisiä riskejä, joista merkittävimmät liittyvät kriittisten mineraalien saatavuuteen ja kyberturvallisuuteen (Vakulchuk ym., 2020).

Tämä niin kutsuttu uusi geopolitiikka (Siddi, 2021) lisää riippuvuutta kriittisten mineraalien saatavuudesta, ja kyseisiä mineraaleja onkin alettu kutsua ”uudeksi öljyksi”. Vanhan ja uuden energiageopolitiikan dynamiikat poikkeavat kuitenkin toisistaan aikajänteiden osalta: fossiilisten polttoaineiden puute ja hintashokit vaikuttavat suoraan päivittäiseen energiansaantiin ja hintoihin, kun taas uusiutuvan energian teknologioihin tarvittavien kriittisten materiaalien saatavuus vaikuttaa erityisesti investointien suunnittelu- ja rakentamisvaiheisiin.

Globaali siirtymä kohti uusien energiateknologioiden käyttöönottoa lisää merkittävästi mineraalien, kuten nikkelin, koboltin, litiumin ja harvinaisten maametallien, kysyntää. Siksi uuden energiageopolitiikan huomio on siirtynyt kriittisten mineraalien saatavuuteen, niiden lähteisiin ja jakautumiseen. Mineraaleista on tullut ”uusi öljy” geopolittisessä ja taloudellisessa kilpailussa, mikä on käynnistänyt uuden resurssinationalismin aallon tuottajamaissa sekä suurten talousalueiden välisen kilpailun toimitusketjujen hallinnasta (Amineh, 2025). On kuitenkin toistaiseksi epäselvää, vähentääkö siirtymä uusiutuvaan energiaan geopolittisiä konflikteja, sillä vaikka energiaomavaraisuus ja riippumattomuus kasvavat, jännitteet voivat säilyä muuttaen ainoastaan muotoa (Vakulchuk ym., 2020).

Tällä hetkellä maailman maista Kiina pystyy parhaiten turvaamaan energiamurroksen edellyttämät resurssinsa. Kiinan uusi Silkkitie-kehityshanke (Belt and Road initiative) on laaja infrastruktuurihanke, jolla Kiina pyrkii rakentamaan ja yhdistämään tiiviimmin Aasian, Euroopan ja Afrikan infrastruktuurit, mikä voi entisestään vahvistaa Kiinan asemaa (Huang, 2016). Kiina hallitsee harvinaisten maametallien tuotantoa ja jalostusta ja siten merkittävää osaa keskeisistä globaaleista toimitusketjuista. Esimerkiksi Kongon demokraattisessa tasavallassa 19:stä kupari- ja kobolttikaivoksesta 15 on kiinalaisessa omistuksessa, ja suuri osa tuotannosta kuljetetaan Kiinaan, jossa tapahtuu noin 75 prosenttia globaalista jalostuksesta.

Kiina on myös suurin toimittaja 23:lle Euroopan komission kriittisiksi määrittelemälle metallille. Akkusektorilla EU hankkii 37 prosenttia raaka-aineista Kiinasta (2 % EU:sta), 72 prosenttia jalostetuista materiaaleista (4 % EU:sta), 67 prosenttia komponenteista (3 % EU:sta) ja 75 prosenttia kokoonpanoista (6 % EU:sta) (Carrara ym., 2023). Eurooppaan tämä voi vaikuttaa siten, että markkinat keskittyvät, luodaan vientirajoituksia sekä ilmenee markkinamanipulaatiota sekä ”kestävyyden musta laatikko”, jossa raaka-aineiden vastuullista alkuperää on vaikea todentaa. Tämä havainnollistaa Kiinan vahvaa asemaa kriittisten mineraalien globaalissa kaupassa.

Kiina on myös merkittävä uusiutuvan energian teknologioiden ja akkujen valmistaja. Maa valmistaa yli 70 prosenttia maailman aurinkosähkömoduuleista ja vastaa lähes puolesta maailman tuuliturbiinien valmistuskapasiteetista. Kiina on kuitenkin vahvasti riippuvainen pienestä määrästä mineraalien toimittajamaista, minkä vuoksi Kiinan toimitusketjut ovat alttiita näiden maiden poliittisille ja taloudellisille muutoksille. Tästä huolimatta Kiinalla on merkittävä etulyöntiasema energiamurroksessa tarvittavien mineraalien jalostuksessa ja prosessoinnissa, ja se hallitsee suurta osaa globaalista markkinasta. Kasvava geopolittinen kilpailu ja vahvistuva resurssinationalismi vaikuttavat kuitenkin merkittävästi heikentäen Kiinan mineraaliturvallisuutta. (Amineh, 2025; Vakulchuk ym., 2020.)

Euroopan unionilla on vahvaa teknologista osaamista tuulivoiman, aurinkoenergian ja sähköajoneuvojen akkujen valmistuksessa, mutta kriittisten mineraalien kulutus on pitkälti tuontiriippuvaista. Jalostuksen, prosessoinnin ja kierrätyksen vahvistamiseksi Euroopan komissio hyväksyi vuonna 2024 kriittisiä raaka-aineita koskevan asetuksen (EU, 2024/1252). Asetuksen mukaan kriittisten raaka-aineiden vuosittainen tuonti yhdestä kolmannelle maasta ei saa ylittää 65 prosenttia EU:n vuosittaisesta kulutuksesta missään toimitusketjun vaiheessa. (Amineh, 2025; Wigell ym., 2022.)

2.2 Kriittisten mineraalien turvaaminen: vihreän kolonialismin välttäminen

Viimeisimmän 20 vuoden aikana energiasiirtymään liittyvien kriittisten mineraalien (kuten litiumin, nikkelin, kobolttin, grafiitin ja harvinaisten maametallien) vuotuinen kauppa on kasvanut yli seitsenkertaiseksi. Vuoteen 2040 mennessä akkumineraalien kysynnän ennustetaan kasvavan vuoteen 2020 verrattuna noin 20-kertaiseksi nikkelin, 19-kertaiseksi grafiitin ja 14-kertaiseksi litiumin osalta (Carrara ym., 2023). Kansainvälinen energiajärjestö IEA varoittaa, että toimitusketjut ovat voimakkaasti keskittyneitä ja alttiita geopolittisille riskeille sekä vientirajoituksille (IEA, 2023a). Kysynnän voimakas kasvu synnyttää siten geopolittisiä toimitusriskejä eli rajoitteita ja pullonkauloja, jotka voivat häiritä resurssien tasaista saatavuutta (Habib ym., 2016).

On huomionarvoista, että monet mineraalivarannoiltaan rikkaat maat sijaitsevat globaalissa etelässä, jossa heikko hallinto, korruptio sekä aseelliset konfliktit ja sodat voivat lisätä toimitusriskejä ja vaikeuttaa vastuullista hankintaa. IEA:n kriittisten mineraalien markkinaraportin (IEA, 2023a) mukaan energiamurroksen nopeuden ja turvallisuuden varmistamiseksi on vastattava kolmeen keskeiseen haasteeseen:

1. On varmistettava, että tuleva tarjonta pysyy nopean kysynnän kasvun tahdissa.

2. Mineraalien tarjoajien määrää on lisätävä, jotta vältetään liiallinen toimittajariippuvuus.
3. On taattava, että raaka-aineet tuotetaan puhtaasti ja vastuullisesti.

Esimerkkinä koboltti – vihreä siirtymä ei saa olla vihreää kaivannaisuutta eli riistoon pohjautuvaa kaivosteollisuutta

Koboltti havainnollistaa erityisen selvästi kriittisiin mineraaleihin liittyvää globaalia dynamiikkaa. Kobolttia käytetään litiumioniakuissa. Sähköajoneuvot ovat merkittävän kohde, joissa sen markkinaosuus on noin 40 prosenttia. Kobolttin maailmanlaajuinen kysyntä on kasvanut noin 70 000 tonnista arviolta 250 000 tonniin vuosien 2010–2028 välillä. Samalla kobolttin globaalit toimitusketjut ovat erittäin keskittyneitä, sillä Euroopassa sijaistee vain noin kaksi prosenttia maailman kaivostoinnista ja 12 prosenttia jalostuksesta. Noin 73 prosenttia maailman koboltista louhitaan Kongon demokraattisessa tasavallassa (KDT), jolla on lähes puolet maailman tunnetuista varannoista. Tästä huolimatta KDT kuuluu maailman viiden köyhimmän maan joukkoon.

Arviolta noin 20 prosenttia Kongon koboltista louhitaan pienimuotoisissa käsityöläiskaivoksissa. Tällainen kaivostointi on usein vaarallista ja sääntelemätöntä. Tunnelit ovat kapeita ja käsin kaivettuja, suojarustus on vähäistä tai olematonta, ja loukkaantumisia, kuolemaan johtavia sortumia ja tulvia tapahtuu toistuvasti. Myös lapsityövoiman käyttö on edelleen yleistä. Ympäristöön kohdistuvat vaikutukset ovat myös vakavia, kun happamat jätevedet saastuttavat jokia, lähiyhteisöissä on merkittäviä terveysongelmia sekä väestön pakkosiirtoja tehdään kaivostoinnin laajentuessa. Tällaisia haittoja aiheutuu heikon hallinnon ja korruption vuoksi. Kaivosyhtiöt ja valtiolliset toimijat hyötyvät, mutta paikallisyhteisöt jäävät vaille vaikutusmahdollisuuksia ja kantavat suurimman osan kustannuksista.

Näiden haasteiden tiedostamisen myötä yritykset ja kuluttajat ovat alkaneet vaatia kestävyyttä ja jäljitettävyyttä kobolttin toimitusketjuihin. Kriitikot kuvaavat nykyistä mallia käsitteellä *vihreä kaivannaisuus* (green extractivism), jossa ympäristöä koskevat ja sosiaaliset haitat ulkoistetaan tuottajaalueille mutta suurin osa arvonalisästä jää muualle (Remme ym., 2023). Tärkeä käännekohta oli Amnesty Internationalin vuonna 2016 julkaisema raportti, joka dokumentoi vakavia ihmisoikeusloukkauksia kobolttin toimitusketjuissa ja esitti todisteita siitä, että länsimaisilla valmistajilla, kuten Volkswagenilla, Samsungilla ja Mercedesellä, oli yhteyksiä kobolttiin, jota louhittiin lapsityövoimaa käyttävillä kaivosalueilla (Amnesty International, 2016).

Tämän jälkeen sähköajoneuvojen valmistajilta alettiin vaatia ”eettistä akkua”, ja huolellisuusvelvoitteesta (due diligence) tuli yritysvastuun kansainvälinen normi koko kobolttin arvoketjussa. Useita vastuullisten mineraalien aloitteita, kuten *Responsible Raw Materials Initiative*, perustettiin lisäämään suurten valmistajien vastuullisuutta sekä tukemaan läpinäkyvyyttä ja vahvempaa valvontaa.

Kriittisiin materiaaleihin ja yksittäisiin maihin liittyvää riippuvuutta voidaan kuitenkin vähentää. Materiaaliriippuvuutta koboltista on jo osittain lievennetty siirtymällä NMC (nikkeli-mangaani-koboltti) -akuista kohti LFP (litium-rautafosfaatti) -akkuja, joissa kobolttia ei tarvita. Vuonna 2024 lähes 50 prosenttia maailman sähköajoneuvomarkkinoista perustui LFPakkuihin, ja Kiinassa osuus oli jo noin 75 prosenttia. Kehitykseen vaikuttavat kobolttin välttämisen lisäksi myös nikkelin saatavuuteen liittyvät haasteet (IEA, 2025c). Lisäksi natriumioniakkuja on alettu käyttää ajoneuvoissa, jolloin jopa litium voidaan korvata.

Maakohtaisen riippuvuuden, erityisesti Kiina-riippuvuuden, vähentämiseksi Euroopan unioni on asettanut vuodelle 2030 tavoitteet, joiden mukaan kriittisistä raaka-aineista 10 prosenttia tulisi louhia, 40 prosenttia jalostaa ja 25 prosenttia kierrättää EU:n alueella

(EU, 2024b). Keskeinen periaate on toimitusketjujen monipuolistaminen ja sen välttämisen, ettei jokin riippuvuus vaihdu vain toiseen.

Suomi on tässä kehityksessä merkittävä tekijä Euroopassa. Suomessa on esiintymiä kaikista keskeisistä akkuminaaleista, kehittyneet jalostusvalmiudet, runsaasti fossiilitonta sähköä, osaavaa työvoimaa sekä vahva tutkimus ja yhteistyöpohja. Suomi asetti kansallinen akkustrategian, jonka tavoitteena Suomesta tulisi kestävä akkutuotannon edelläkävijämaa. Suomen Malmijalostus (Finnish Minerals Group) pyrkii rakentamaan Suomeen ”vahvan akkualan arvoketjun” (Akkuteollisuus, 2025). Suotuisat olosuhteet ja julkinen yhteissijoittaminen ovat houkutelleet arviolta 6–9 miljardin euron investointikiinnostuksen ja jopa 20 000 työpaikkaa seuraavien viiden vuoden aikana. Esimerkiksi Terrafame on solminut kumppanuuden Renaultin kanssa kehittääkseen sähköautojen valmistuksen katkeamattoman toimitusketjun kaivostoiminnasta ja jalostuksesta ajoneuvojen valmistukseen.

Kaivosteollisuuden nopea laajentuminen aiheuttaa kuitenkin ympäristöriskejä ja yhteiskunnallista vastustusta. Suomessa on koettu vakavia ympäristövahinkoja, kuten vuonna 2012 tapahtunut Talvivaaran kaivosvuoto, joka saastutti noin tuhat hehtaaria jokia ja järviä, sekä 1990-luvulla tapahtunut kobolttikaivoksen myrkkypäästö Saimaaseen. Lisäksi Sodankylässä sijaitsevalle, Naturasuojellulle Viiankiaapa-nimiselle suolle kohdistuvat suunnitelmat nikkeli ja kupari-kaivoksen perustamisesta ovat herättäneet laajaa vastustusta, sillä hankkeella arvioidaan olevan vakavia ja peruuttamattomia ympäristövaikutuksia.

Tämän seurauksena mineraali ja metallikaivostoiminnan laajentamiseen liittyvät suunnitelmat kohtaavat Suomessa voimakasta sosiaalista vastustusta. Esimerkkinä tästä on eduskuntaan jätetty kansalaisaloite *Kaivoslaki uudistettava – rajat kaivostoiminnalle*. Kaivostoiminnan laajentaminen on synnyttänyt konflikteja erityisesti luonnonsuojelualueilla, saamelaiden poronhoitoalueilla, matkailu ja kulttuuriperintökohteissa sekä järviolu-

eilla, joilla on runsaasti vapaaajan asumista. (Eerola, 2024.) Mikäli näihin huoliin ei vastata, energiamurros hidastuu tältä osin, kustannukset kasvavat, nollapäästötavoitteiden saavuttaminen hidastuu, luottamus murenee ja yhteiskunnalliset ristiriidat pahenevat.

2.3 Kiertotalous vähentää resurssiriippuvuuksia

Riippuvuuden vähentäminen konfliktimineeraaleista ja muista strategisista raaka-aineista voi osaltaan lieventää energiaan liittyviä konfliktiriskejä (Scheffran, 2023). Tätä riippuvuutta voidaan vähentää siirtymällä entistä vahvemmin kiertotalouteen. Se on yhteiskunnan, talouden ja ympäristön kannalta välttämätöntä. (Georgescu ym., 2025.)

Kiertotalous voidaan määritellä perinteisen lineaarisen talousmallin vaihtoehdoksi ja sitä uudistavaksi lähestymistavaksi, jossa edistetään jätteen vähentämistä ja materiaalien kierrätystä. Kiertotalous tukee Euroopan unionin vihreän ja digitaalisen siirtymän strategisia tavoitteita, joiden päämääränä on saavuttaa fossiiliton talousjärjestelmä ja parantaa resurssien ja materiaalien kiertoa (Georgescu ym., 2025). Kiertotaloudella pyritään käytävissä olevien resurssien mahdollisimman tehokkaaseen hyödyntämiseen sekä puhtaampien prosessien ja energiajärjestelmien käytön edistämiseen (A Arias ym., 2023).

Euroopan unionissa kiertotalous on keskeinen osa Euroopan vihreää kehitysohjelmaa (European Green Deal) ja kiertotalouden toimintasuunnitelmaa, joiden tavoitteena on ympäristövaikutusten vähentäminen. EU:n jäsenmaissa kiertotalous toteutuu eri tavoin riippuen taloudellisesta kehitystasosta ja kierrätysinfrastruktuurista. (Georgescu ym., 2025.) Suomi on maailman ensimmäinen maa, joka laati kansallisen kiertotalouden tiekartan, ja sittemmin kaikki ministeriöt ovat ottaneet käyttöön kiertotalousstrategioita, jotka tukevat kansallista hiilineutraaliustavoitetta vuodelle 2035 (Re ym., 2023). Kiertotalouteen liittyviin päästövähennystoimiin kuuluvat muun muassa puhtaiden teknologioiden (cleantech) kehittäminen ja vientimahdolli-

suuksien parantaminen, energiansäästö sekä tuotenergia riippuvuuden vähentäminen (Valtioneuvosto, 2021).

Energiapohjainen teollinen symbioosi on yksi kiertotalouden tärkeistä toteutuspoluista. Teollisissa symbioosisissa jonkin tuotantoprosessin sivuvirrat hyödynnetään toisen prosessin panoksina perinteisten raaka-aineiden tai energialähteiden sijaan. Tällaisia symbiooseja ovat esimerkiksi energian peräkkäiskäyttö (energy cascading), polttoaineiden korvaaminen sekä bioenergian tuotanto. Energian peräkkäiskäytössä toisen toimijan tuottama hukkalämpö tai höyry hyödynnetään toisen toimijan prosesseissa. Teollinen symbioosi toteutuu myös silloin, kun jätteistä tuotetut polttoaineet korvaavat perinteisiä polttoaineita tai kun orgaanisia jätteitä jalostetaan bioenergiaksi. (Fraccascia ym.)

Kiertotalouteen perustuva biotalous parantaa järjestelmän resilienssiä ja edistää resurssien käyttöä hyödyntämällä orgaanisia jätteitä energiantuotannossa (Georgescu ym., 2025; ks. myös luku 3 energiajärjestelmien resilienssistä). Liikennesektorilla jätteiden ja sivuvirtojen hyödyntämiseen perustuvat biopolttoaineet, kuten metsäteollisuuden sivutuotteista, peltobiomas-soista ja maatalousjätteistä tuotettu bioetanoli, tarjoavat toisenlaisen kiertotalousratkaisun (Di Blasio ym., 2022). Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi tai hyödyntämisteknologiat (CCS/CCU) voivat puolestaan toimia kiertotalouden mukaisina ratkaisuin, joilla voidaan lieventää fossiilisten polttoaineiden käytöstä aiheutuvia ilmastovaikutuksia. (Arias ym., 2023; ks. luku 5.5.)

Kierrätys vahvistaa taloudellista resilienssiä ja vähentää haitallisia ympäristövaikutuksia pienentämällä riippuvuutta neitseellisistä raaka-aineista ja tehostamalla materiaali-virtojen hyödyntämistä arvoketjuissa (Georgescu ym., 2025). Vuoteen 2050 mennessä energiajärjestelmissä käytettävien kriittisten mineraalien kysynnän ennustetaan kasvavan voimakkaasti. Erityisesti akkuteollisuuden arvoketjuista tulee merkittäviä, minkä vuoksi tulee luoda suljettuja materiaalikiertoja litiumille ja muille harvinaisille mineraaleille. (Di Blasio ym., 2022.)

Energiamurroksesta aiheutuu myös muita haasteita kiertotaloudelle, sillä uusiutuviin energialähteisiin perustuvien teknologioiden jätteiden määrä kasvaa. Esimerkiksi aurinkopaneeleista syntyvän jätteen määräksi arvioidaan noin 78 miljoonaa tonnia vuoteen 2050 mennessä, ja tämä voi aiheuttaa merkittäviä haasteita ilman asianmukaista jätteenhallintaa. (Arias ym., 2023.) Euroopan unionin alueella tuulivoimaloiden lapajätettä syntyy vuoteen 2030 mennessä arviolta 570 miljoonaa tonnia (Diez-Cañamero & Mendoza, 2023). Tuulivoimaloiden lavat ovat vaikeasti kierrätettäviä, sillä ne koostuvat useista materiaaleista: lasi- ja hiilikuiduista, epokseista ja polyestereistä, kuparijohdoista, teräspulteista sekä ydinmateriaaleista, kuten puusta ja vaahdoista. Lisäksi ne on pinnoitettu polyeteenillä tai polyuretaanilla. Tämän vuoksi suurin osa lapajätteestä päätyy edelleen kaatopaikoille. (Diez-Cañamero & Mendoza, 2023.) Tuulivoimateknologian jätteiden kierrätettävyyttä onkin parannettava, jotta voidaan luopua jätteiden poltosta, loppusijoituksesta ja uudelleenkäytöstä. Vaikka esimerkiksi aurinkosähköjärjestelmien jätevolyymit ovat toistaiseksi pieniä verrattuna fossiilisen energiantuotannon jätteisiin, kuten öljylietteeseen ja kivihiilituhkaan (Mirlatz ym., 2023), uusiutuvan energian teknologioiden kierrätettävyyttä on parannettava.

Kiertotalous on otettava huomioon energiajärjestelmien suunnitteluvaiheessa esimerkiksi ekosuunnittelun (ecodesign) avulla, jotta järjestelmien kierrätettävyyden ja korjauskelpoisuuden paranevat teknologian elinkaaren lopussa. Myös kiertotalousstandardit on huomioitava suunniteltaessa energiajärjestelmiä, sillä se lisää teknologioiden tehokkuutta, vähentää kriittisten mineraalien kysyntää ja tukee paikallista omavaraisuutta. (Arias ym., 2023.) Mitä enemmän energiasektori nojaa kotimaisiin ja eri teollisuuden alojen välisiin kiertotalouden arvoketjuihin, sitä kestävämpi ja vähemmän geopolittisille häiriöille altis se on (Kumar ym., 2023). Energiamurroksen avulla saadaan myönteisiä ja kestäviä vaikutuksia vain silloin, kun noudatetaan kestävyys- ja kiertotalouden periaatteita (Arias ym., 2023).

3. RESILIENTTI ENERGIAJÄRJESTELMÄ – YHTEISKUNNAN KOKONAIS- TURVALLISUUDEN PERUSTA

Kirjoittajat: Jukka Lassila, Behnam Ivatloo, Pertti Kauranen, Jarmo Partanen, Esa Vakkilainen ja Christian Breyer

Yhteiskunnan vakaus ja toimintakyky ovat riippuvaisia energiajärjestelmästä, joka toimii luotettavasti myös odottamattomissa tilanteissa. Hyvin toimiva energiajärjestelmä varmistaa sähkön, lämmön, polttoaineiden ja muiden raaka-aineiden turvallisen saatavuuden sekä mahdollistaa niiden jakelun ja käytön yhteiskunnan eri osa-alueilla. Energiajärjestelmien toimivuudella on suora vaikutus moniin kriittisiin perustoimintoihin, kuten terveydenhuoltoon, vesihuoltoon, viestintään, elintarvikehuoltoon, turvallisuuteen ja logistiikkaan sekä näitä tukevien palvelujen toimintaan. Järjestelmän kokonaisvaltainen hallinta korostuu, sillä yhteiskunnan sähköriippuvuus on kasvussa.

EU-sääntelyyn perustuvan sähkömarkkinoiden kehityksen myötä Suomen sähköjärjestelmää on uudistettu. Hiilidioksidipäästöt ovat vähentyneet noin 80 prosenttia, toimitusvarmuus on parantunut ja sähkön hinnat ovat pysyneet Euroopan alhaisimpien joukossa. Viime vuosina energiajärjestelmissä on kuitenkin tapahtunut merkittäviä muutoksia, jotka vaikuttavat järjestelmien muutosjoustavuuteen eli resilienssiin ja siten koko yhteiskunnan toimintaan. Näitä muutoksia ovat muun muassa sähköntuotannon lisääntyvä sääriippuvuus ja irtautuminen perinteisistä polttoaineista, tuotannon maantieteellinen hajautuminen, sähkön käytön kasvu lämmöntuotannossa, ilmajohdojen korvaaminen maakaapeloinnilla sekä hajautettujen akkuvarastojen määrän

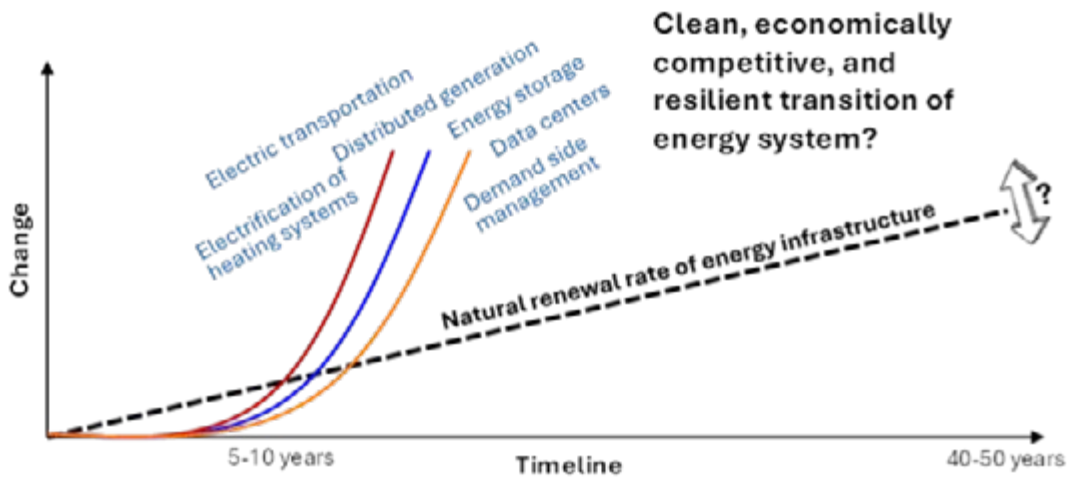
kasvu. Tällaisilla jo tehdyillä ja vasta toteutuvilla muutoksilla on sekä myönteisiä että kielteisiä vaikutuksia energiajärjestelmän toimintavarmuuteen ja resilienssiin.

Eri energialähteet, energiamuodot ja energian käyttötavat vaikuttavat yhteiskunnan toimivuuteen ja kilpailukykyyn. Energialähteiden hyödyntämisessä korostuu kolme reunaehto. Ensinnäkin energian tuotanto ei saa aiheuttaa kasvihuonekaasupäästöjä. Toiseksi sen on oltava taloudellisesti kannattavaa ja kansainvälisesti kilpailukykyistä. Kolmanneksi sen tulisi perustua mahdollisimman suureen omavaraisuuteen. Vaikka täydellinen omavaraisuus ei ole mahdollista ja nykyiset yhteiskunnalliset ja energiajärjestelmien olosuhteet edellyttävät yhä jonkin verran fossiilisten polttoaineiden käyttöä, riippuvuutta niistä voidaan vähentää merkittävästi. Tämä on kuitenkin tehtävä siten, että se ei heikennä energiajärjestelmien kokonaisresilienssiä. Venäjän hyökkäyssota Ukrainassa sekä Lähi-idän kriisi ovat entisestään korostaneet näiden tavoitteiden merkitystä.

3.1 Muutostekijät ja mahdollistajat

3.1.1 Hajautettu tuotanto ja sääriippuvuus

Sähkön kysyntä kasvaa nopeasti Suomen edetessä kohti fossiilitonta energiajärjestelmää ja vahvistaessa globaalia teollista



Kuva 3.1. Aikatauluhaaste: energiajärjestelmän kehityssuunnat ja energiainfrastruktuurin luonnollinen uusiutumistahti

kilpailukykyään. Sähköä tuotetaan eri puolilla Suomea monentyyppisissä voimalaitoksissa. Pohjoismaat muodostavat yhtenäisen sähköjärjestelmän, jossa kukin maa pyrkii noudattamaan ennalta sovittuja tuotannon ja kulutuksen tasapainoperiaatteita. Osa voimalaitoksista pystyy muuttamaan tuotantoaan hyvin nopeasti, jopa sekunneissa, kun taas toisilla säätö kestää kymmeniä minutteja. Jotta sähköjärjestelmä toimii, tuotannon ja kulutuksen on pysyttävä tasapainossa joka hetki. Koska sähköä voidaan varastoida ”sähkönä” vain hyvin rajallisia määriä suhteessa kokonaiskulutukseen, tuotannon on käytännössä seurattava kysyntää reaaliajassa. Tulevaisuudessa joustava kulutus, kuten joustava teollinen kysyntä, sähkölämmitys ja sähköajoneuvojen lataus, voi yhä aktiivisemmin ylläpitää sähköjärjestelmän tasapainoa.

Tuuli- ja aurinkovoiman nopea kasvu on vähentänyt hiilidioksidipäästöjä mutta samalla lisännyt sähkön hintavaihteluita. Tuotannon hajauttaminen niin tuotantokoon kuin myös sijainnin osalta on pienentänyt yksittäisen voimalaitoksen tai verkon osan vaikutusta koko sähköjärjestelmän toimintavarmuuteen. Huoltovarmuuden näkökulmasta kotimaisen sähköntuotannon kasvu on vähentänyt riippuvuutta kansainvälisistä siirtoyhteyksistä ja polttoainevarastoista. Kuitenkin tuotannon sääriippuvuus ja siihen liittyvä ennakoimattomuus ovat lisänneet

huolta energian riittävästä saatavuudesta ja tehotasapainon ylläpitämisestä kaikissa olosuhteissa mutta erityisesti tyyninä ja kylminä ajanjaksoina.

3.1.2 Energia-alan sektori-integraatio

Sähköistyminen muuttaa yhteiskuntaa monin tavoin, ja riippuvuus sähköstä kasvaa erityisesti sektori-integraation myötä. Sektori-integraatiossa yhteiskunnan eri osa-alueet linkittyvät yhä vahvemmin osaksi sähköenergiajärjestelmää, mistä esimerkkinä on liikenteen sähköistyminen. Suurille energiamäärille soveltuvia ratkaisuja haetaan energian muuntopoluista, kuten vetytaloudesta ja Power-to-X-tekniologioista eli esimerkiksi elektrolyysistä ja vetyvarastoista. (Breyer ym., 2024.) Vedestä sähkön avulla erotettu vety voi olla tulevina vuosikymmeninä tärkeä raaka-aine ja energiankantaja kotimaisten synteettisten polttoaineiden tuotannossa. Vedyn erottaminen vedestä vaatii erittäin suurta määrää sähköä, ja teollisessa mittakaavassa synteettisten polttoaineiden tuotanto moninkertaistaisi Suomen sähkönkulutuksen. Synteettisten polttoaineiden valmistamiseen voidaan käyttää biopohjaista hiilidioksidia, jota saadaan otettua talteen puunjalostusteollisuuden savukaasuista. Raaka-ainevarannoit riittäisivät tarvittaessa kääntämään Suomen fossiilisten polttoaineiden tuojasta polttoaineiden viejäksi.

Fossiilisiin energialähteisiin perustuvan lämmityksen ja liikenteen tilalle tulevat sähkökäyttöiset kattilat, lämpöpumput ja sähköinen liikenne, jotka lisäävät kiinteistöjen ja liikenteen riippuvuutta sähköstä. Kehityskulku tarkoittaa sitä, että yhteiskunnan eri osa-alueet, kuten asuminen, työ, liikkuminen ja logistiikka, ovat yhä enemmän sidoksissa sähköjärjestelmän toimivuuteen. Sähkön merkitys kasvaa, ja sen häiriöttömästä saannista tulee yhä tärkeämpi osa yhteiskunnan resilienssiä.

Uusiutuvaan energiaan perustuvan energijärjestelmän on oltava joustava, sillä energian saatavuus eri energialähteistä vaihtelee luontaisesti. Aiemmissa tutkimuksissa on tunnistettu viisi erilaista joustavuuden muotoa, jotka toimivat myös samanaikaisesti (Khalili ym., 2025). Näitä ovat erilaiset energiarastot, kysyntäjousto, Power-to-X-ratkaisut, sähkön siirto- ja jakeluverkkojen joustava käyttö sekä vaihtelevan uusiutuvan sähkön tuotannon rajoittaminen (Khalili ym., 2025).

Näiden lisäksi eri energialähteet, kuten tuuli ja aurinkoenergia, vesivoima ja bioenergia, täydentävät toisiaan, mikä voi vähentää merkittävästi energiatuotantomäärän kokonaisvaihtelua. Uusiutuvaan energiaan perustuva energijärjestelmä vaatii joustoratkaisujen tehokasta yhdistämistä ja monipuolisia energialähteitä, jotka luovat vakaan ja kilpailukykyisen perustan järjestelmälle.

Pohjoismaissa tärkeimpiä uusiutuvan energian tuotantomuotoja ovat vesivoima ja siihen liittyvät säädettävät allaskapasiteetit sekä tuulivoima, aurinkosähkö ja bioenergia. Suomessa energijärjestelmän toimivuutta tukevat näiden lisäksi ydinvoimasta saatava vakaa peruskuorma, hyvät kotimaiset energiarastot sekä erinomaiset sähköverkkoyhteydet muihin Pohjoismaihin, sillä niiden ansiosta voidaan hyödyntää pohjoismaista vesivoimaa. Sektori-integraation ja Power-to-X-teknologioiden hyödyt ovat Suomelle huomattavat. (Satymov ym., 2025.)

3.1.3 Joustava kuorma ja teknologiakehitys

Energiamurroksen nopea kehitys ja energiainfrastruktuurin hidas uusiutuminen aiheuttavat ristiriidan, jota pyritään ratkaisemaan lisäämällä joustavuutta energijärjestelmän eri tasoille. Lämmitys- ja liikeneratkaisujen muutokset sekä pienenevät teknologiakustannukset mahdollistavat sen, että joustoilla voi hallita energia- ja tehotasapainoa. Energia-infrastruktuurin kehittämisessä ja toimintavarmuuden turvaamisessa tärkeintä on hajautettu jousto ja sen hallinta. Samalla pitää kuitenkin huomioida, että jos suuri määrä hajautettuja resursseja reagoi samanaikaisesti sähkön markkinasignaaleihin (kuten kysyntäjoustoratkaisut ja akkuvastot), voi tämä muuttaa verkon kuormituskäyttäytymistä hallitsemattomasti. Tällöin toimintavarmuus voi vaarantua ja kapasiteetin käyttö on tehotonta. Näin ollen joustavuuden lisääminen voi tuoda mukanaan myös uusia haasteita. Hajautettujen resurssien hallintaan liittyvä tehoelektroniikka ja ohjelmistoratkaisut voivat lisäksi muodostaa riskejä, mikäli ulkopuolinen taho saa niihin hallinnan, jolloin yhteiskunnan kokonaisturvallisuus heikentyy.

Joustavan kulutuksen tarve korostuu erityisesti, kun datakeskusten määrä kasvaa voimakkaasti. Suomeen on suunnitteilla merkittävä määrä uutta datakeskuskapasiteettia, ja liittymäkyselyjen (alustava kysely sähköverkko-yhtiölle liittämismahdollisuuksista) skaala on poikkeuksellisen suuri energijärjestelmän näkökulmasta. Riskinä on, että datakeskusten kuorma on tyypillisesti lähes vakio ja niiden joustavuus on rajallista. Laskentatehoa tarvitaan asiakaskysynnän mukaisesti, eikä kulutusta voida merkittävästi ajoittaa vastaamaan uusiutuvan sähköntuotannon (tuuli- ja aurinkoenergia) vaihtelua. Tämä voi lisätä hintapiikkejä, kiristää tehotasapainoa ääritilanteissa ja kasvattaa painetta sähköverkkoinvestointeihin.

Haasteista huolimatta datakeskukset voivat toimia myös energijärjestelmän resurssina. Niiden UPS-akkuja ja tehoelektroniikkaa voidaan hyödyntää, jos tarvitaan lyhytaikaista taajuus- ja jännitetukea. Varavoimagene-

raattoreita voidaan käyttää häiriötilanteissa sähköverkon tukemiseen, mikäli polttoainelogistiikka ja lupaehdot mahdollistavat pidempikestoisen käytön. Datakeskusten kokonaisvaikutus riippuu myös niiden maantieteellisestä sijainnista esimerkiksi suhteessa alueelliseen sähköntuotantopotentiaaliin ja hukkalämmön hyödyntämismahdollisuuksiin. Datakeskuksiin liittyviä riskejä voidaan vähentää ennakoivalla ohjauksella, vaatimuksilla ja taloudellisilla kannustimilla.

3.1.4 Kehitystä tukeva sääntely

Energiajärjestelmän kehittäminen on perinteisesti vaatinut pitkäjänteisyyttä, mutta nopeasti etenevä energiamurros haastaa infrastruktuurin asteittaisen ja maltillisen kehittämisen periaatteet. Erityisesti sähkönsiirtoinfrastruktuurin osalta herää kysymys siitä, kykeneekö monopolitoimintaa valvova ja ohjaava sääntely reagoimaan riittävän nopeasti muuttuvassa toimintaympäristössä. Valvonnan on turvattava samanaikaisesti siirtoverkon pitkäjänteinen kehittäminen ja vakaa investointiympäristö sekä rohkaistava ketteriin ja uusiin toimintamalleihin, jotka mahdollistavat energiamurroksen kannalta resilientin ja toimintavarman sähköenergiajärjestelmän.

3.2 Resilientin energijärjestelmän tavoitteet ja vaatimukset

Energiajärjestelmien on tuettava hyvää elämänlaatua ja yhteiskunnan toimintojen kehittymistä oikeudenmukaisesti koko Suomessa. Resilienttien energijärjestelmien toiminnalliset ja organisatoriset tavoitteet (teknologia, organisaatiot ja lainsäädäntö) muodostavat kokonaisuuden, jossa yhdistyvät yhdenvertaisuus, omavaraisuus, ilmastotavoitteet ja häiriönsietokyky. Ulkoisista toimitusketjuista aiheutuvien riippuvuuksien ja geopolitiittisten riskien vähentämiseksi energijärjestelmissä on käytettävä mahdollisimman laajasti kotimaisia energialähteitä, komponentteja ja osaamista. Energiajärjestelmillä voidaan vaikuttaa myös ilmastomuutoksen hillintään ja siihen sopeutumiseen. Kehittämällä sähkö- ja lämpöjärjestelmiä voidaan vaikuttaa päästöjen vähentämiseen ja puhtaaseen tuotantoon

siirtymiseen. Suomessa voidaan luoda merkittävää lisäarvoa hyödyntämällä mittavaa fossiilitonta sähkön tuotantopotentiaalia sekä biopohjaisia hiilidioksidivirtoja, joita voidaan ottaa talteen teollisuusprosesseista. Tämä mahdollistaa hiilineutraalien polttoaineiden ja muiden tuotteiden valmistamisen, joka ylittää kotimaisen tarpeen. Edellytyksenä tällaiselle kehitykselle on kyky tuottaa kohtuuhintaista sähköä myös poikkeuksellisissa yhteiskunnallisissa tilanteissa.

Toimintavarmuutta tukevien teknisten järjestelmien on kyettävä reagoimaan joustavasti, tehokkaasti ja osittain automaattisesti sekä Suomen sisäisiin häiriötilanteisiin, kuten laajoihin jakelukatkoksiin, että ulkoisesti aiheutuneisiin teknisiin ja toiminnallisiin häiriöihin, kuten päämuuntajien vaurioitumiseen, henkilöstön toimintakyvyn estymiseen tai kyberhyökkäyksiin. Tarvittaessa sähköjärjestelmä on kyettävä muuttamaan nopeasti useiksi itsenäisiksi alueelliseksi sähköjärjestelmiksi ja jopa tuhansiksi samanaikaisesti toimiviksi saarekkeiksi, mikä vaatii ennakkosuunnittelua. Paikallisen tuotannon ja akkuvarastoinnin nopea yleistymisen yhdistettynä kehittyneisiin tietojärjestelmien ja automaattioratkaisuihin mahdollistaa tämän ilman merkittäviä lisäkustannuksia. Useita teknisesti toimivia ratkaisuja on jo käytössä, ja pienimmillään itsenäinen sähköjärjestelmä voidaan luoda yksittäiseen kotitalouteen. Tällöin järjestelmä sisältää akun tai muun energiavaraston sekä oman energiantuotannon, kuten aurinkosähkön ja lämpöpumpun.

Yhteiskunnan resilienssi voidaan varmistaa siten, että energijärjestelmät toimivat saumattomasti yhdessä kansallisten turvallisuusjärjestelmien kanssa. Energiainfrastruktuuri ei saa estää niihin liittyvien järjestelmien toimintaa. Esimerkiksi tuulivoimarakentamisen ja Puolustusvoimien järjestelmien yhteensovittaminen edellyttää ratkaisuja, jotka turvaavat valvonta- ja tutkajärjestelmien toiminnan ja samalla mahdollistavat tuulivoiman lisäämisen. Esimerkkinä tästä on Puolustusvoimien ja tuulivoimahankkeiden yhteistyö Itä-Suomessa, jossa tarkastellaan tuulivoimaloiden tornien käyttöä Puolustusvoimien tutkajärjestelmän tukiasemina.

4. IHMISET JA MARKKINAT

Kirjoittajat: Salla Annala, Alicja Dankowska, Samuli Honkapuro, Juha Haakana, Minna Havukainen, Elena Poli, Ayesha Sadiqa ja Eeva-Lotta Apajalahti

4.1 Toimivat markkinat turvaavat energian saatavuuden

Hyvin toimivat sähkömarkkinat perustuvat siihen, että energiajärjestelmä toimii, sähköä on saatavilla ja se on kohtuuhintaista. Sähkömarkkinat koostuvat useista eri markkinoista, jotka palvelevat eri tarkoituksia ja toimivat eri aikajänteillä. Markkinoilla toimii laaja joukko erilaisia toimijoita, jotka osallistuvat kaupan käyntiin eri markkinoilla.

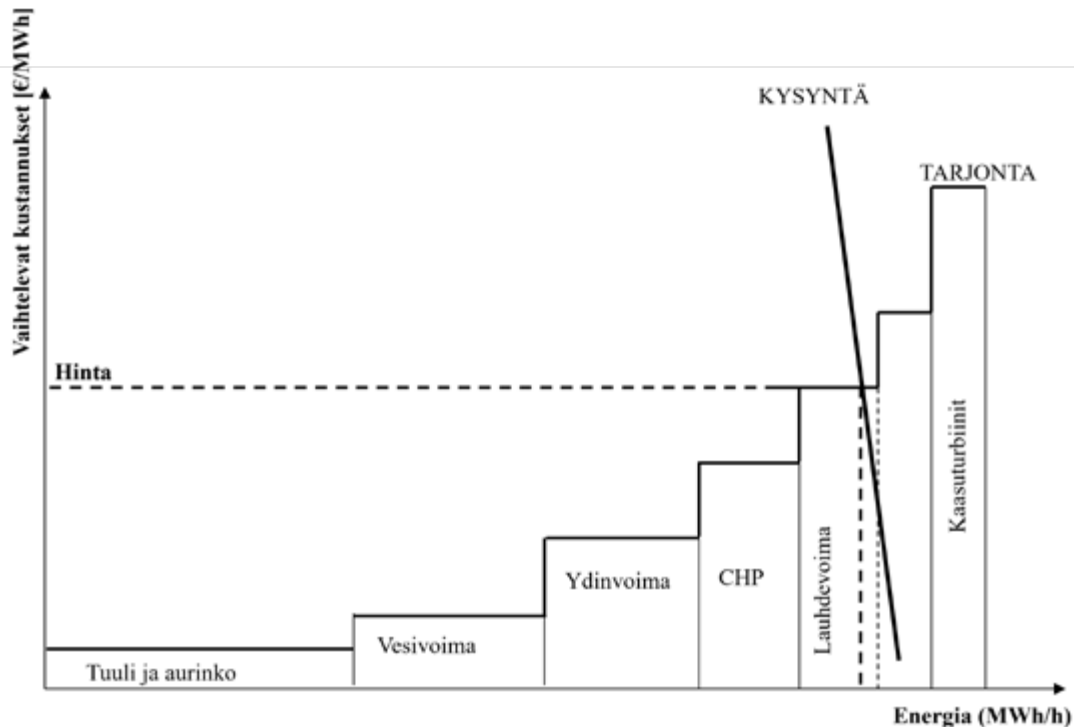
Tässä luvussa kuvataan sähkömarkkinoiden keskeiset toimintamekanismit ja sähkön hinnan muodostuminen markkinoilla sekä kerrotaan ajankohtaisesta tehopohjaisen hintaalementin käyttöönotosta, jonka tarkoituksena on hillitä kulutushuippujen kasvua. Edellisessä energiaselonteossa käytiin läpi yksityiskohtaisesti se, miten kuluttajahinnat muodostuvat. Siksi sitä ei käsitellä tässä selonteossa uudelleen (Ks. LUT Energiaselonteko, 2024).

4.1.1 Sähkön markkinapaikat

Suurin osa sähkökaupasta tapahtuu Euroopan tukkusähkömarkkinoilla, jotka toimivat marginaalihintaperiaatteella. Tämä tarkoittaa, että sähkön hinta määräytyy kalleimman tuotantomuodon kustannusten perusteella. Tukkusähkömarkkinoilla tarjontapuolen tarjoukset asetetaan nousevaan hintajärjestykseen, ja kun tarjonta kohtaa kysynnän tason, kyseinen hintataso määrittää markkinahinnan. Tarjonnan ja kysynnän käyrien leikkauspiste muodostaa siten marginaalihinnan, joka

on sama kaikille myyjille ja ostajille. Vaikka tätä hinnoittelumallia on kritisoitu esimerkiksi hintavaihtelun ja kaikista halvimmille tuotantomuodoille maksetun ylituoton (ns.

windfall-tuoton) takia, toisenlaista toimivaa ja laajamittaisesti käyttökelpoista vaihtoehtoisia markkinamallia ei ole toistaiseksi löydetty.



Kuva 4.1. Sähkön hinnoittelumekanismi tukkusähkömarkkinoilla

Käytännössä kaikki sähkön myyjät ja ostajat jättävät tarjouksensa vuorokautta ennen kauppaa 15 minuutin aikajaksoissa. Kun kaikki tarjoukset on jätetty ja rajasiirtoyhteyksien käytettävissä oleva kapasiteetti on tiedossa, Euphemia-algoritmi laskee markkinahinnat maksimoimalla tuottaja ja kuluttajaylijäämien summan. Kuluttajaylijäämä syntyy silloin, kun marginaalihinta on matalampi kuin se hinta, jonka kysyntäpuoli olisi valmis maksamaan (eli kuvassa $>P$). Tuottajaylijäämä puolestaan syntyy, kun marginaalihinta on korkeampi kuin tarjouksen hinta eli tuotantokustannus (kuvassa $<P$). Ylijäämien summan maksimointi johtaa kokonaishyödyn maksimointiin. Algoritmi optimoi samalla rajat ylittävää sähkökauppaa siten, että lopputulos on koko Euroopan sähköjärjestelmän kannalta mahdollisimman tehokas.

Marginaalihintamekanismi tukee energiasäätelyn resilienssiä ja tehon tasapainoa. Kun tuotantokapasiteetista on niukkuutta esimerkiksi silloin, kun sääriippuvaista tuotantoa ei ole tarpeeksi, hinnat nousevat, koska silloin tarvitaan lisää kalliimpaa tuotantoa (kuvassa 4.1 esimerkiksi kaasua). Hintojen nousu luo kannustimen vähentää kulutusta, mikä auttaa ylläpitämään tasapainoa tuotannon ja kulutuksen välillä. Tämä tasapaino on sähkön toimitusvarmuuden kannalta keskeistä. Korkeiden hintojen aikana kysyntä tyypillisesti laskee, jolloin markkinamekanismi sopeuttaa kulutusta energian saatavuuden mukaan. Marginaalihintaperiaate varmistaa, että kullakin hetkellä käytössä on kustannuksiltaan kaikista edullisimmat tuotantomuodot (aurinko, tuuli, vesi ja ydinvoima kuvassa 4.1). Hinnat myös antavat signaaleja markkinoille:

korkeat hinnat kannustavat investoimaan uuteen tuotantokapasiteettiin, kun taas matalat hinnat tukevat energiantensiivisen teollisuuden investointeja.

Vuorokausimarkkinoiden lisäksi sähkömarkkinoihin kuuluvat lyhyen aikavälin päivänsäiset markkinat sekä reservi ja säätösähkömarkkinat, jotka tasapainottavat markkinoita lyhyellä aikavälillä ja parantavat taajuudenhallintaa.

Rahoitusmarkkinoilla käydään kauppaa johdannaisilla, joita sähkön markkinatoimijat käyttävät hintariskien hallintaan. Näiden markkinapaikkojen ohella suurkuluttajat ja sähköntuottajat voivat solmia kahdenvälisiä pitkäaikaisia sähkönosto- eli PPA-sopimuksia (Power Purchase Agreements). Kuvassa 4.2 näkyvät kaikki keskeiset markkinapaikat, niiden aikajänteet sekä markkinoiden keskeiset käyttötarkoitukset.

Aika (T)				
Useampi vuosi	24h	1 – 24h	Käyttötunti	Käytön jälkeen
<i>Kapasiteetti-mekanismi</i> <i>Power Purchase Agreements (PPA)</i> <i>Nasdaq sähkön johdannais-markkinat</i>	<i>Nordpool vuorokausi-markkinat</i>	<i>Nordpool päivänsäiset markkinat</i>	<i>Tasehallinta ja reserve-markkinat</i>	<i>Taseselvitys, tase-energia-kauppa (säätösähkö)</i>
Tarkoitus: Uuden kapasiteetin hankinta Sähkön hintariskin suojaaminen futuureilla	Tarkoitus: Sähkön pääasiallinen kauppapaikka Saavutetaan sähkön kysynnän ja tarjonnan tasapaino	Tarkoitus: Kysynnän ja tarjonnan tasapainon hienosäätöä	Tarkoitus: Taseen reaaliaikainen hallinta Kantaverkkoyhtiö (TSO) ainoana ostajana	Tarkoitus: Saavuttaa kaupankäynnin tasapaino todellisen tuotannon/ kulutuksen ja kaupankäynnin perusteella

Kuva 4.2. Sähkömarkkinoiden eri markkinapaikat, aikajänteet ja niiden tarkoitus

Sähkönostosopimukset (*Power Purchase Agreements, PPA*) otettiin Suomessa käyttöön vuonna 2018, jolloin solmittiin ensimmäinen tuulivoimatuotantoa koskeva PPAsopimus (Renewables Finland, 2019). PPA-sopimus solmitaan tyypillisesti uusiutuvan energian tuottajan ja suuren teollisen sähkönkäyttäjän välillä. PPAsopimuksia voidaan kuitenkin solmia myös esimerkiksi hiilidioksidin toimitajan ja käyttäjän välillä tai muulle vastaavalle tuotteelle, jolle ei ole vakiintunutta markkinapaikkaa.

PPAsopimus on yleensä pitkäaikainen, kestoltaan noin 10–20 vuotta, ja sen aikana sähkön hinta on ennalta sovittu. PPAsopimukset ovat vaikuttaneet merkittävästi siihen, että on voitu toteuttaa uusiutuvan energian hank-

keita. Ne lisäävät energian hinnan ennustettavuutta ja vakautta molemmille osapuolille sekä parantavat sitä, miten uusiutuvan energian hankkeita voidaan rahoittaa, koska ne varmistavat tuotetulle sähkölle ostajan. PPAsopimukset ovat kahdenvälisiä sopimuksia myyjän ja ostajan välillä, ja niiden yksityiskohdat vaihtelevat sopimuskohtaisesti.

4.1.2 Markkinoita kehitetään jatkuvasti

Vaikka nykyinen markkinamalli on osoittautunut toimivaksi, siirtymä kohti vaihtelevaa uusiutuvaan energiaan perustuvaa järjestelmää lisää markkinoiden kehittämistarvetta. Riittävän kapasiteetin turvaamiseksi pitkien kylmien ja tynien talvijaksojen aikana tai tilanteessa, jossa suuri tuotantoyksikkö

tai siirtoyhteys on pitkään poissa käytöstä, tarvitaan erillinen kannustin varavoimakapasiteetin investointeihin. Tavanomaiset markkinamekanismit, jotka perustuvat marginaalihintoihin ja signaloivat investointien tarpeesta, eivät tässä tapauksessa toimi, sillä edellä kuvatut niukkuustilanteet ovat erittäin harvinaisia. Mahdollinen ratkaisu voisi olla esimerkiksi investointitukeen perustuva huu-tokaupparemekanismi sellaisille harvoin käytettävälle voimalaitoksille, jotka ovat todennäköisesti kaasuturbiineja tai moottoreita ja joita voidaan käyttää bio tai synteettisillä polttoaineilla.

Normaalioloissa tällaiset poikkeukselliset häiriötilanteet, joissa varavoimaa tarvitaan, esiintyvät tyypillisesti vain noin kerran vuosikymmenessä. Sen sijaan suuren voimalaitoksen tai siirtoyhteyden vikaantuminen voi johtaa vastaaviin tilanteisiin huomattavasti useammin. Mallinnustulosten perusteella (Salmi & Honkapuro, 2025) sähköverkon kuorman menettämisen arvo tällaisissa tilanteissa on pienempi kuin varakapasiteetin hankinnasta aiheutuvat kustannukset. Puh-taasti taloudellisesta näkökulmasta tarkastel-tuna yhteiskunnalliset kokonaiskustannukset olisivat siten pienemmät verrattuna siihen, että harvinaisissa niukkuustilanteissa yksin-kertaisesti sallittaisiin kuorman menetys. Toimitusvarmuuden takaaminen voi kuitenkin olla tärkeämpää kuin mahdollisimman edul-liset kustannukset. Varakapasiteetin aiheut-tama lisäkustannus sähkönkäyttäjille on joka tapauksessa hyvin pieni, alle 0,3 snt/kWh.

Tuulivoiman saatavuus on yleisesti parempi talvella kuin kesällä, mikä korreloi hyvin säh-kön suuremman talvikauden kysynnän kanssa. Esimerkiksi Suomen kaikkien aikojen korkein sähkön kulutushuippu mitattiin 8. tammikuuta 2026, jolloin suurin 15 minuutin keskimääräi-nen tehontarve oli 15 279 MW. Samaan aikaan tuulivoimatuotanto ylitti 5 000 MW.

Edellä esitetty tarkastelu koskee tuk-susähkömarkkinoita, joilla sähköntuottajat myyvät sähköä ja suuret sähkönkäyttäjät sekä vähittäissähkönmyyjät ostavat sitä. Vähittäissähkönmyyjät myyvät hankkimansa sähkön edelleen asiakkailleen, kuten koti-

talouksille ja muille sektoreille, joilla ei ole suoraa pääsyä tukkumarkkinoille. Jokaisella asiakkaalla on oikeus valita sähkönmyyjä, jolta sähkö ostetaan. Sähkönmyyjät tarjoavat erilaisia sopimustyyppisiä, jotka voidaan jakaa määräaikaan ja toistaiseksi voimassa ole-viin sopimuksiin, joissa hinnoittelu voi olla kiinteää tai dynaamista (ks. tarkempi kuvaus kuluttajahintojen muodostumisesta vuoden 2024 energiaselonteosta).

4.1.3 Kysyntäjouston ja energiansäästön ohjaaminen kulutushuippujen aikana

Sähkön loppukäyttösektoreilla on käynnissä merkittäviä rakenteellisia muutoksia. Sähkön kuormitusprofiileihin vaikuttavat sähköi-nen liikenne, lämmityksen sähköistyminen, sähkön varastointi sekä markkinaehtoinen kysyntäjousto. Tuotantopuolella sen sijaan vaihtelevan uusiutuvan energian lisään-tyminen kasvattaa sähkön hintavaihtelua energiajärjestelmissä. Haasteet korostuvat erityisesti kulutushuippujen aikana, joita on viime aikoina havaittu myös tilanteissa, joissa tuotantoa on runsaasti, esimerkiksi hyvin tuulisina päivinä, jolloin sähkön hinnat ovat olleet poikkeuksellisen matalia.

Mikäli kuluttajilla ei ole kannustimia kulu-tushuippujen leikkaamiseen, seurauksena voi olla merkittävästi kasvavat huipputehot ja siten lisääntyvät investointitarpeet jake-luverkkoihin. Tämä puolestaan johtaa säh-könloppukäyttäjien kustannusten nousuun. Sähkön loppukäyttäjää voidaan kuitenkin ohjata eri tavoin vähentämään kulutustaan kulutushuippujen aikana.

Ensimmäinen ja yleisimmin käytetty ohjaus-keino on sähkön hinnoittelu eli sähköso-pimusten hinnoittelumallit. Dynaamisissa hinnoittelumalleissa sähkön hinta sähkön-käyttäjälle mukailee markkinahintaa, jolloin sähkönkäyttäjät voivat saavuttaa kustannus-säästöjä siirtämällä kulutustaan korkean hin-nan ajankohdista matalan hinnan hetkiin. Tätä kutsutaan kysyntäjoustoksi. Kysyntäjousto tukee sähköjärjestelmän tasapainoa, sillä se vähentää kuormitusta tilanteissa, joissa tuotannosta on niukkuutta. Dynaamisiin hinnoittelusopimuksiin liittyy kuitenkin riski

voimakkaista hintapiikeistä. Vaikka pitkällä aikavälillä dynaamisen hinnoittelun keskimääräinen sähkön hinta on usein matalampi kuin kiinteähintaisissa sopimuksissa, edellyttää sen valinta sähkönkäyttäjältä taloudellista puskuria hintavaihtelujen varalta. Tästä syystä monet kuluttajat suosivat kiinteähintaisia sopimuksia, joissa sähkön hinta pysyy pääosin samana koko sopimuskauden ajan.

Tulevaisuuden energiajärjestelmissä korostuu joustomahdollisuus. Sähkön loppukäyttäjä voi tarjota joustoa sähköjärjestelmässä kahdella tavalla:

1. mukauttamalla omaa kulutustaan sähkön hinnanvaihteluiden mukaan, kuten dynaamisen sopimuksen malleissa, tai
2. sallimalla merkittävien kuormien ulkoisen ohjauksen esimerkiksi tarjoamalla joustopalveluja kantaverkkoyhtiölle (TSO).

Asiakkaita, jotka tarjoavat tällaista joustoa, kutsutaan myös *flexumereiksi*. Tällä hetkellä noin kolmanneksella suomalaisista sähkön vähittäisasiakkaista on dynaaminen sähkösopimus, jossa hinta vaihtelee tukkusähkömarkkinoiden mukaan. Syyskuussa 2025 tukkusähkömarkkinat siirtyivät tunti hinnoittelusta varttihinnoitteluun, mikä tarkoittaa sitä, että myös dynaamista hinnoittelua käyttävät asiakkaat siirtyivät varttihinnoitteluun, mikäli heidän sähkömittarinsa sen mahdollistaa.

Asiakkaiden jousto toimii ainakin äärimmäisten hintavaihteluiden aikana, vaikka kaikki pörssisähköasiakkaat eivät kykene joustamaan kulutuksessaan (esim. Haakana ym., 2025). Vaikka varttihinnoittelun käyttöönotto kannustaa sopeuttamaan kulutusta sähköjärjestelmän mukaan, lisää se sähkönkäyttäjien päätöksenteon monimutkaisuutta ja sähkölaitteiden kulutuksen ohjaukseen tarvittavien teknologisten ratkaisujen tarvetta. Monille tällaisten ohjausjärjestelmien kustannukset voivat olla suuret, mikä vähentää halua hankkia kyseisiä järjestelmiä.

Toinen ohjauskeino on verkkopalvelumaksu,

jota perivät monopoliasemassa olevat jakeluverkkoyhtiöt (DSO:t). Jakeluverkkoyhtiöiden toimintaa ja verkkopalvelumaksuja sääntelee Energiavirasto, joka asettaa yhtiöille sallitun tuottokaton. Jakeluverkkoyhtiöt voivat valita hinnoittelunsa yksityiskohdat, mutta kokonaistuottojen on pysyttävä Energiaviraston määrittämissä rajoissa. Pienasiakkaiden verkkopalvelumaksu koostuu tyypillisesti kiinteästä perusmaksusta (e/kk) sekä siirrettyyn energiamäärään perustuvasta energiamaksusta (snt/kWh). Sähköverkon kustannukset ovat kuitenkin lyhyellä aikavälillä pääosin kiinteitä ja pitkällä aikavälillä riippuvaisia verkon huipputehotarpeesta. Tästä syystä energiamaksu ei vastaa kustannuksia, joten verkon kustannusten kattamiseksi jakeluverkkoyhtiöt ovat nostaneet kiinteitä maksuja ja vastaavasti alentaneet energiamaksua. Tämän takia verkkopalvelumaksut eivät ohjaa sähkönkulutusta tehokkaasti, ja niiden vaikutus kulutushuippuihin on vähäinen.

Tämän haasteen ratkaisemiseksi jakeluverkkoyhtiöt ovat ottamassa käyttöön tehopohjaisen maksuelementin (e/kW) pienasiakkaiden, kuten kotitalouksien, verkkopalvelumaksuihin. Suurilla sähkönkäyttäjillä tehopohjainen maksu on ollut käytössä jo pitkään. Uusi tehomaksu ei lisää jakeluverkkoyhtiöiden kokonaistuloja Energiaviraston asettaman tuottokaton vuoksi eikä nosta verkkopalvelumaksujen kokonaismäärää vaan lähinnä muuttaa verkkopalvelumaksun eri osien keskinäisiä painotuksia. Tehopohjaisen elementin käyttöönoton myötä kiinteän perusmaksun ja energiamaksun suhteellinen osuus pienenee. Tämä tarkoittaa sitä, että pienasiakkaat, joilla on suuri sähkönkäyttö ja korkeat huipputehot (esimerkiksi sähkölämmitys tai sähköajoneuvoja), maksavat korkeampia verkkopalvelumaksuja. Tämä luo kaikille kannustimen pienentää omaa huipputehoaan. Samalla siirtymä kohti kustannuksia paremmin vastaavaa hinnoittelua edistää myös verkkokustannusten oikeudenmukaisempaa jakautumista asiakkaiden kesken.

Energiavirasto (2026) on julkaissut määräyksen verkkopalvelumaksujen hintaelementtien muodostamisesta. Määräyksen mukaan tehopohjaisen maksun tulee perustua kuukauden



korkeimpaan tuntitehoon [e/kW, kk). Kukin jakeluverkkoyhtiö voi kuitenkin itse päättää tehomaksun suuruudesta sekä siitä, ottaako se käyttöön tehopohjaisen elementin pienasiakkailleen. Energiaviraston määräyksen tavoitteena on varmistaa, että eri jakeluverkkoyhtiöt soveltavat yhtenäisiä periaatteita, mikä helpottaa esimerkiksi energianhallinta ja automaattioratkaisujen kehittämistä ja käyttöönottoa koko Suomessa.

4.2 Energiakansalaisuus ja energiayhteisöt

4.2.1 Aktiiviset energiakansalaiset

Sähkön hinnoittelu perustuu sähkömarkkinoihin, ja sähkönmyyjät tarjoavat asiakkaille erilaisia sähkösopimuksia. Asiakkaat eli energian loppukäyttäjät ja kansalaiset valitsevat sopimusmallin ja kuluttavat ostetun energian, mutta nyt kaikilla asiakkailla on mahdollisuus olla entistä aktiivisempia toimijoita energiajärjestelmässä.

Energiayhteisöt, energiakansalaiset, energian tuottajakuluttajat (prosumerit) sekä joustoa tarjoavat asiakkaat (flexumerit) lisäävät kotitalouksien ja yksittäisten kansalaisten mahdollisuutta vaikuttaa aktiivisesti energiajärjestelmiin. Tuottajakuluttajat nimensä mukaan toimivat sekä energian tuottajina että kuluttajina, sillä he voivat tuottaa itse osan tarvitsemastaan energiasta asentamalla mikrotuotantoa, aurinkosähköjärjestelmiä tai lämpöpumppuja sekä myydä käyttämättä jäänyttä sähköä verkkoon. Oman energian-

tuotannon avulla kotitaloudet voivat hyötyä suojautumalla korkeiden sähkönhintojen aiheuttamilta hintavaihteluilta (erityisesti jos sopimus ei ole kiinteähintainen) sekä saada lisätuloja ylijäämäsiähkön myynnistä. Lisäksi saman kiinteistön, esimerkiksi kerrostalon, asukkaat voivat muodostaa energiayhteisön ja jakaa paikallisesti tuotettua sähköä yhteisön kesken. Tässä luvussa tarkastellaan aktiivisen energiakansalaisuuden ja energiayhteisöjen keskeisiä ajureita, toteutusmuotoja ja haasteita.

Yksi tärkeimmistä energiakansalaisuuden ajureista on Euroopan unioni, jonka mukaan kansalaisten tulisi voida vaikuttaa käynnissä olevassa energiamurrokseen nykyistä aktiivisemmin. EU on kannustanut jäsenmaidensa asukkaita aktiiviseen energiakansalaisuuteen säätämällä direktiivin, joka tunnistaa kansalaiset aktiivisiksi toimijoiksi energiajärjestelmässä passiivisten kuluttajien sijaan (yleisön osallistuminen, direktiivin 2001/42 artikla 6). Kansalaiset voivat omaksua energiajärjestelmässä useita erilaisia ja muuttuvia rooleja, jotka limittyvät toisiinsa ja kehittyvät ajan myötä. Aktiivinen energiakansalaisuus kytkeytyy tuottajakuluttajuuden ohella energiajärjestelmien hajauttamiseen, energiaköyhyyden vähentämiseen, ympäristöahdistuksen vähentämiseen (Biresellioglu, 2024) sekä energiademokratian vahvistamiseen.

Periaatteessa energiakansalaisuus viittaa kansalaisten vaikutusmahdollisuuksiin energiapäätöksenteossa niin energian käytön kuin myös tuotannosta tehtäviin päätöksiin.

Yhä useammin kansalaisia kutsutaankin osallistumaan uuden energiainfrastruktuurin suunnitteluun ja kehittämiseen, joskin tietyin reunaehdoin (Lennon ym. 2019). Energiakan-salaiset voivat myös toimia yksin tai yhdessä sijoittajina energiaaloitteissa ja hallinnoida paikallisia energiajärjestelmiä. Energiakan-salaisuudella voidaan siten vaikuttaa ilmas-totavoitteiden saavuttamiseen, eikä se ole vain yksi poliittisen tai kansalaisosallistumi-sen muoto muiden joukossa. (DevineWright, 2012.) Aktiivisen energiakan-salaisuuden edis-tämiseksi energiapolitiikan ja markkinoiden päätöksentekoprosessit edellyttävät entistä osallistavampia ja avoimempia toimintamal-leja. Samalla aktiivinen energiakan-salaisuus muuttaa perinteisiä energiaalan liiketoimin-tamalleja.

4.2.2 Energiayhteisöt

Energiayhteisöt mahdollistavat uusiutuvan energian yhteistuotannon, varastoinnin ja myynnin tuoden ympäristöä koskevia, talou-dellisia ja sosiaalisia hyötyjä suoraan koti-talouksille ja alueille (Wittmayer ym., 2021). Tutkimusten mukaan tällaiset aloitteet levit-tävät paikallista hiljaista tietoa, vahvistavat kansalaisten vaikutusvaltaa ja edistävät alu-eellista sosioekonomista kehitystä erityisesti silloin, kun yhteisöt tai kotitaloudet omistavat energiaratkaisut (Dall'Orsoletta ym., 2022). Energiayhteisöjen odotetaan lisäävän päätök-senteon läpinäkyvyyttä ja energiademokratiaa sekä edistävän hyötyjen tasaisempaa jakau-tumista ja uusiutuvan energian sosiaalista hyväksyttävyyttä sekä vahvistavan yhteisöjen resilienssiä ja työllisyyttä (Van Bommel & Höffken, 2021).

Energiayhteisöjen juuret ovat kansalaisläh-töisissä tuuli ja aurinkoenergiahankkeissa, joita syntyi Saksassa ja Tanskassa 1970-luvun öljykriisin jälkeen (GorroñoAlbizu ym., 2019). Nykyisin energiayhteisöt toimivat monissa eri muodoissa ja mahdollistavat asukkai-den, kuntien ja pienten yritysten yhteistyön vähähiilisen energian tuottamisessa, siirtä-misessä, kaupankäynnissä, varastoinnissa ja kuluttamisessa. EU edistää energiayhteisöjen osallistumista uusiutuvan energian direktii-veillä RED II (EU, 2018/2001) ja RED III (EU,

2023/2413) sekä sähkömarkkinadirektiivillä (EU, 2019/944), jotka mahdollistavat kulutta-jien suoran osallistumisen energiamarkkinoi-hin, sähkön toimitukseen ja kysyntäjoustoon. Eulainsäädäntö tunnistaa kaksi energiayh-teistötyyppiä: kansalaisenergiayhteisöt, joita jäsenet tai osakkeenomistajat voivat perustaa toteuttaakseen uusiutuvan energian hank-keita, sekä uusiutuvan energian yhteisöt, joissa edellytetään, että jäsenet tai osakkaat asuvat uusiutuvan energian laitosten lähei-syydessä (EU, 2018/2001). Suomessa lainsää-däntö edellyttää tällä hetkellä, että jäsenet asuvat saman kiinteistön alueella.

EU:n mukaan energiayhteisöt lisäävät uusiu-tuvan energian kapasiteettia ja sosiaalista hyväksyntää, mobilisoivat yksityistä pääomaa, tarjoavat joustavuutta sähköjärjestelmälle ja vahvistavat kuluttajien asemaa (Vernay ym., 2023). Teknologisten ratkaisujen ohella energiayhteisöt ovat sosiaalisia ja organi-satorisia innovaatioita, sillä ne muokkaavat sekä infrastruktuureja että energiajärjes-telmän sosiopoliittisia suhteita, kun maat siirtyvät hajautetumpiin uusiutuvan energian energiajärjestelmiin keskitetyistä, usein fos-siilista energiajärjestelmistä (Walker & DevineWright, 2008). Energiayhteisöjen odotetaan tuottavan laajempia yhteiskunnallisia hyötyjä, kuten energiapäätöksenteon demokratisoi-tumista, kun kansalaisten osallistuminen ja päätöksenteko tulee läpinäkyvämmäksi. Lisäksi ne vahvistavat paikallista resilienssiä ja sosiaalista pääomaa, alentavat energiakustan-nuksia ja vähentävät energiaköyhyyttä, lisäävät osaamista ja itseluottamusta sekä edistävät energiamurroksen hyötyjen oikeudenmukai-sempaa jakautumista. (Ruggiero ym., 2026.)

Energiayhteisöjen ja energiakan-salaisten määrä vaihtelee Euroopassa. Schwanitz ym. (2023) arvioivat, että Euroopassa toimii noin 10 500 kansalaislähtöistä energia-aloitetta 30 maassa ja ne tavoittavat yli kaksi miljoonaa kansalaista ja omistavat yhteensä 7–10 GW uusiutuvaa energia asennettuna kapasiteet-tina. Energiayhteisöihin kohdistuu suuria odotuksia ja niillä on suuri potentiaali, sillä kotitaloudet vastaavat noin 27 prosentista EU:n loppuenergiankulutuksesta, mutta ener-giayhteisöt muodostavat kuitenkin edelleen

vain pienen osan Euroopan energijärjestelmästä. Vaikka kansallinen ja EULainsäädäntö tukevat energiayhteisöjen perustamista, niiden kehitys Suomessa on ollut toistaiseksi vähäistä. Tällä hetkellä Suomessa on rekisteröity 376 kansalaislähtöistä energiayhteisöä, joista vain 19 sijaitsee Pohjois ja Itä-Suomessa (Sorsa, 2025).

Energiayhteisöt kohtaavat myös erilaisia sosiaalisia ja organisatorisia haasteita. Energiayhteisöjen sisällä voi muodostua eriarvoisuutta ja valtasuhteet voivat synnyttää jännitteitä, jos esimerkiksi taloudelliset hyödyt kasautuisivat vain pienelle osalle asukkaista, mikä edelleen heikentää luottamusta ja hyväksyttävyyttä yhteisön sisällä (Walker ym., 2010). Osallistuminen energiayhteisöihin painottuu edelleen korkeasti koulutettuihin, iäkkäämpiin valkoihoisiin miehiin, jolloin muut ryhmät ja esimerkiksi haavoittuvassa asemassa olevat ryhmät jäävät vähemmistöön. Oikeudenmukaisuuden varmistaminen edellyttää jatkuvaa vuoropuhelua järjestelmien kehittäjien ja kansalaisten välillä, jotta erilaiset arvot ja odotukset voidaan paremmin yhteensovittaa (Mihailova ym., 2022). Energiayhteisöjen tuottamat myönteiset sosiaaliset vaikutukset, kuten yhteenkuuluvuus, resilienssi ja voimaantuminen, riippuvat sosiaalisista verkostoista ja paikallisista tavoista osallistua yhteiseen tekemiseen. Joskus energiayhteisöt voivat myös aiheuttaa jäsenilleen kokemuksia siitä, että ne heikentävät jäsentensä vaikutusmahdollisuuksia (Ruggiero ym., 2026).

Suurin osa suomalaisista energiayhteisöistä on kaupungeissa sijaitsevia kerrostaloja. Vaikka monien kaupunkien ilmastotavoitteet tukevat energiayhteisöjä, kaupunkisuunnittelun ja päätöksenteon rakenteet, materiaaliset vaatimukset sekä muut rakentamiseen liittyvät tekijät voivat aiheuttaa haasteita ja jännitteitä energiayhteisöjen perustamisessa (Apajalahti & Matschoss, 2021; Apajalahti ym., 2023). Energiayhteisöjen edistäminen edellyttääkin yhteistoimintaa kansalaisten välillä, mutta se koskee myös kaupunkisuunnittelua, alueellisia energiayhtiöitä, verkkoyhtiöitä ja lainsäädäntöä.

4.3 Yhteiskunnallinen resilienssi ja energiahaavoittuvuus

4.3.1 Yhteiskunnallinen resilienssi

Energiayhteisöt ja aktiivinen energiakanalaisuus voivat vahvistaa yhteisöjen ja alueiden yhteiskunnallista resilienssiä ja siten edistää nykyaikaisten energijärjestelmien turvaamista. Energiaan liittyvä yhteiskunnallinen resilienssi viittaa yhteisöjen ja instituutioiden kykyyn sopeutua energiahäiriöihin samalla, kun luottamus, legitimitetti ja sosiaalinen yhteenkuuluvuus säilyvät. Yhteiskunnallisesti resilienssissä energijärjestelmässä julkinen hyväksyttävyys, osallistuminen ja paikallinen sitoutuminen yhdessä vahvistavat järjestelmän vakautta ja sopeutumiskykyä.

Energiayhteisöt ja aktiivinen energiakanalaisuus voivat myös vähentää haitallisia vaikutuksia ja parantaa sähkön saatavuutta sähköverkon häiriöiden aikana. Suomessa energiayhteisöt voivat kuitenkin vain harvoin toimia erillään valtakunnanverkosta, sillä tekninen toteutus on useimmiten rakennettu siten, että yhteys pääverkkoon säilyy, mikä mahdollistaa myös energiayhteisön ylijäämä-sähkön myynnin.

Yhteisöt voivat osallistua uusiutuvan energian kehittämiseen, ja sillä on suuri merkitys. Osallistumalla aktiivisesti päätöksentekoon ja suunnitteluun yhteisöt voivat varmistaa, että päätöksissä otetaan huomioon paikalliset tarpeet ja tärkeät asiat, mikä vahvistaa omistajuuden, vastuun ja osallisuuden tunnetta. Esimerkiksi tuulivoimasektorilla yhteiskunnallinen resilienssi vahvistuu silloin, kun yhteisöt kokevat omistajuutta, vaikutusmahdollisuuksia ja konkreettisia hyötyjä paikallisista hankkeista. Tästä tunnetuin esimerkki on Tanska, jossa hajautetut ja osuuskuntatoimintaan perustuvat, poliittisesti tuetut tuulivoiman omistusmallit on paremmin integroitu paikallisiin instituutioihin, ja ne ovat lisänneet vastuullisuuden ja hyväksynnän tunnetta (Vasström ym., 2024) sekä jakaneet taloudellisia hyötyjä laajasti, mikä on vahvistanut yhteiskunnallista resilienssiä (Mendonça ym., 2018).



Pohjoismaiden energijärjestelmät ovat omistuspohjaltaan melko monimuotoisia ja ulottuvat keskitetyistä valtion ja kuntien sekä yksityisten energiayhtiöiden omistamasta energiantuotannosta hajautettuihin paikallisiin ratkaisuihin. Tällä on suuri merkitys energijärjestelmän resilienssiin ja oikeudenmukaisuuteen, sillä ne määrittävät, kuka hallitsee energiavaroja, miten hyödyt jakautuvat ja kuinka järjestelmät reagoivat häiriöihin, mikä vaikuttaa myös yhteiskunnalliseen varautumiseen. Yhteiskunnallinen resilienssi rakentuu jatkuvasti, ja sitä pitää myös rakentaa jatkuvasti, sillä se ei ole staattinen tila. Se muotoutuu jatkuvasti vuoropuhelun, kiistojen ja politiikkakehysten uudelleenarvioinnissa, jolloin päätöksentekoprosessit pysyvät joustavina yhteisöjen muuttuville tarpeille.

4.3.2 Energiahaavoittuvuus

Aktiivinen energiakansalaisuus, oman energian tuottaminen tai energiayhteisön perustaminen edellyttää tietoa, osaamista, vastuunkantoa ja mahdollisuuksien tunnistamista sekä taloudellista ja sosiaalista pääomaa, jota kaikilla ei kuitenkaan ole. Korkea energianhinnan nousu, jota geopolittiset shokit, kuten Venäjän hyökkäyssota Ukrainaan ja Yhdysvaltojen ja Israelin hyökkäykset Iraniin, ovat aiheuttaneet, ja sähkön hintojen jatkuva voimakas vaihtelu ovat nostaneet esiin energiahaavoittuvia ryhmiä ja ajaneet useat kotitaloudet kohti energiaköyhyyttä (Numminen ym., 2024). Energiaköyhyydellä tarkoitetaan yleisesti tilannetta, jossa yli kymmenen prosenttia kotitalouden tuloista kuluu energiaan. Nousevien kustannusten vuoksi monet ovat vähentäneet energiankulutustaan ja karsineet muita välttämättömiä menojaan, kuten ruokakuluja, mikä on lisännyt taloudellista stressiä ja ahdistusta myös Suomessa.

Energiahaavoittuvat ryhmät, joilla on jo valmiiksi vaikeuksia selviytyä kuukausittaisista energialaskuista, investoivat harvoin omaan energiantuotantoon, joustoratkaisuihin tai älykkäisiin kotiautomaattoratkaisuihin, joiden avulla voitaisiin vähentää ostetun energian määrää. Poliittisilla ohjauskeinoilla voidaan kannustaa kotitalouksia perustamaan ener-

giayhteisöjä tai tuottamaan edes osa omasta energiankäytöstään, joten säädettäessä tällaisia poliittisia ohjauskeinoja ne on arvioitava huolellisesti. Muutoin ohjaus voi itse asiassa ylläpitää tai jopa lisätä eriarvoisuutta ja sosioekologista eriytymistä, mikäli varakkaammat kotitaloudet saavat suhteettoman suuren hyödyn esimerkiksi mikroverkoista tai energiavarastointiratkaisuista. Suurituloiset ryhmät hyötyvät enemmän energiamurrokseen liittyvistä tuista, mikä nostaa esiin oikeudenmukaisuuskysymyksiä (Sovacool ym., 2019).

Energiahaavoittuvuuteen vaikuttavat useat eri tekijät ja niiden yhdistelmät, kuten ikä, sukupuoli, terveys ja perherakenne, esimerkiksi eläkeläiset, vammaiset henkilöt ja yksinhuoltajaäidit, joiden tulotaso on pieni ja tulot epätasaisesti jakautuneet. Lisäksi suuri hoivavastuu aiheuttaa haavoittuvuutta. Myös iäkkäillä henkilöillä ja lapsiperheillä energiantarve on keskimääräistä suurempi, mikä lisää alttiutta energiahaavoittuvuudelle ja köyhyydelle. Näiden lisäksi maantieteelliset ja asumiseen liittyvät tekijät vaikuttavat tilanteeseen, ja maaseutualueet, vanha rakennuskanta ja tietyt lämmitysmuodot voivat joko pahentaa tai lieventää haavoittuvuutta. (Numminen ym., 2024.)

Haavoittuvuudet tulisi ottaa huomioon energiapolitiisessa suunnittelussa ja sisällyttää ne osaksi resilienssisuunnittelua. Tällä hetkellä energiapolitiikka on usein liian yleisluonteista ja keskittyy esimerkiksi energiatehokkuuden parantamiseen, uusiutuvan energian lisäämiseen ja investointien edistämiseen, vaikka haavoittuville ryhmille kohdennetut, räätälöidyt toimenpiteet olisivat tarpeellisia (Kajoskoski ym., 2025).

Suomessa energiahaavoittuvuus ja energia-köyhyys ovat saaneet toistaiseksi vain vähän huomiota, vaikka ongelma on tunnistettu ja sen odotetaan pahenevan erityisesti voimakkaiden hintapiikkien myötä (Numminen ym., 2024). Vuoden 2022 energiakriisin aikana toteutettu laaja kyselytutkimus suomalaisista kotitalouksista osoittaa, että 18 prosenttia omakoti ja paritaloasujista ylitti energiaköy-

hyiden rajan ja 27 prosenttia koki energiakustannusten suuruuden rasittavan talouttaan jatkuvasti (Numminen ym., 2024). Yleinen käsitys on, että Suomen hyvinvointivaltio ja sosiaalietuudet suojaavat haavoittuvia ryhmiä köyhyydeltä, mutta energian osalta näin ei ole ollut, mikä voidaan todeta vuoden 2022 poikkeuksellisen korkean hintatason aikana.

Energiahaavoittuvuus voi lisääntyä energiamurroksessa yhteisön tasolla, mikäli esimerkiksi paikallisilla yhteisöillä ei ole mahdollisuutta osallistua tai vaikuttaa suuriin energiahankkeisiin, jotka vaikuttavat yhteisöjen arkeen tai elinkeinoihin. Julkinen keskustelu energiahaavoittuvuudesta on tärkeää, sillä se tekee eriarvoisuudet näkyväksi ja tukee oikeudenmukaista energiapolitiikan suunnittelua. Päätöksenteossa tulee arvioida energiapolitiikka, joka huomioi energiaoikeudenmukaisuuden kolme oikeudenmukaisuuden osaa eli 1) tunnustavan oikeudenmukaisuuden, jossa tunnustetaan eri ryhmien erilaiset kyvyt ja tarpeet, 2) jako-oikeudenmukaisuuden, jossa huomioidaan hyötyjen ja kustannusten jakautumisen oikeudenmukaisuus, ja 3) menettelytapojen vaikutusmahdollisuuksien ja osallistumisen oikeudenmukaisuutta. Tällä pyritään vastaamaan haasteisiin, jotka liittyvät energian kohtuuhintaisuuteen, tasapuoliseen saatavuuteen sekä hyötyjen ja riskien oikeudenmukaiseen jakautumiseen.

Eriarvoisuutta syntyy erityisesti silloin, kun kotitaloudet tai yhteisöt joutuvat kantamaan energiahankkeisiin liittyviä riskejä tai kustannuksia ilman riittävää kompensatiota. Esimerkkinä voidaan mainita laajamittaiset tuulivoimahankkeet ja niihin liittyvät infrastruktuurihankkeet, jotka voivat joko lisätä yhteiskunnallista resilienssiä mutta myös kasvattaa energiahaavoittuvuutta. Mikäli paikalliset asukkaat joutuvat kokemaan maisemaan liittyviä vaikutuksia, melua tai muita haittoja ilman, että he ovat pystyneet osallistumaan päätöksentekoon tai jäävät paitsi hyödyistä, haavoittuvuus lisääntyy ja hankkeiden sosiaalinen hyväksyttävyys heikkenee. (Apajalahti & Galvão Lyra, 2025.)

5. ENERGIAJÄRJESTELMIEN KESTÄVYYS

Kirjoittajat: Christian Breyer, Alicja Dankowska, Minna Havukainen, Jouni Havukainen, Joni Lappi, Husain Patel, Hanna Paulomäki, Tapio Ranta, Jani Sillman, Tero Tynjälä, Ville Uusitalo ja Esa Vakkilainen

Onnistuneen energiamurroksen edellytyksiä ovat resurssien kestävä käyttö sekä luonnon, ilmaston, maa-alueiden ja vesistöjen suojelu. Toimiminen planetaaristen rajojen sisällä tarkoittaa sitä, että ilmastomuutoksen hillintä ei saa kiihdyttää luonnon monimuotoisuuden köyhtymistä, maaperän heikkenemistä tai vesivarojen ylikuormitusta. Myös oikeudenmukainen siirtymä ja ihmisten osallistumismahdollisuuksien turvaaminen ovat tärkeitä. Murroksen keskellä on varmistettava, että ihmiset sekä hyötyvät energiamurroksesta että voivat vaikuttaa sen suuntaan.

Fossiilisista polttoaineista luopuminen, siirtyminen uusiutuviin energiateknologioihin ja sähköistyminen ovat välttämättömiä ilmastomuutoksen sekä siihen liittyvien terveys- ja ympäristöhaittojen hillitsemiseksi. Energiamurroksen myötä voi kuitenkin syntyä uusia luontohaittoja tai muita paikallisia vaikutuksia. Uusiutuvan energian tuotanto vaikuttaa elinkaarensa aikana maankäyttöön, maaperään, vesistöihin ja luonnon monimuotoisuuteen alkaen komponenttien valmistuksesta ja infrastruktuurin rakentamisesta voimalaitoksen käyttöönottoon ja lopulta toiminnan lakkauttamiseen. Kriittisten mineraalien kasvava kysyntä lisää paineita kaivostoimintaan ja lisää tarvetta lisätä kiertotalousratkaisuja ja kehittää jätehuoltoa (ks. luku 2 mineraaleista ja kiertotaloudesta). Globaalien ja paikallisten vaikutusten välille voi syntyä ristivetoa, jos globaalit ilmastohyödyt saavutetaan paikallisten ympäristöllisten ja sosiaalisten vaikutusten kustannuksella. Tämä dynamiikka ja mahdolliset ristiriidat tulee ottaa huomioon energiapoliittisessa päätöksenteossa.

Materiaalien ja maankäytön kysymysten lisäksi hiilen hallinta on keskeinen osa energiamurrosta. Fossiilipohjainen hiilidioksidi lisää uutta hiiltä ilmakehään ja kiihdyttää ilmastomuutosta, kun taas biomassasta saatava biogeeninen hiilidioksidi voi olla osa uusiutuvaa hiilen kiertoa, mikäli biomassan käyttö on kestävä. Talteen otettu hiilidioksidi puolestaan voidaan varastoida, tai se voi toimia resurssina kiertotalouteen perustuvissa hiilijärjestelmissä, joissa hiilidioksidia hyödynnetään uusien tuotteiden raaka-aineena.

Energian, ympäristön ja yhteiskunnallisten tavoitteiden yhteensovittaminen edellyttää siten sektorirajat ylittävää politiikkaa, joka ennaltaehkäisee haittojen siirtämistä sektorilta tai alueelta toiselle ja varmistaa luonnonvarojen kestävä käytön. Kuten Ison Britannian kansallisessa turvallisuusarviossa todetaan (HM Government, 2026), luonnon monimuotoisuuden heikkeneminen on kasvava turvallisuusriski. Ekologinen kestävyys, yhteiskunnallinen vakaus ja energiasysteemien resilienssi ovat siis kytkeytyneet tiiviisti toisiinsa. Tässä luvussa käsittelemme näitä toisiinsa liittyviä teemoja.

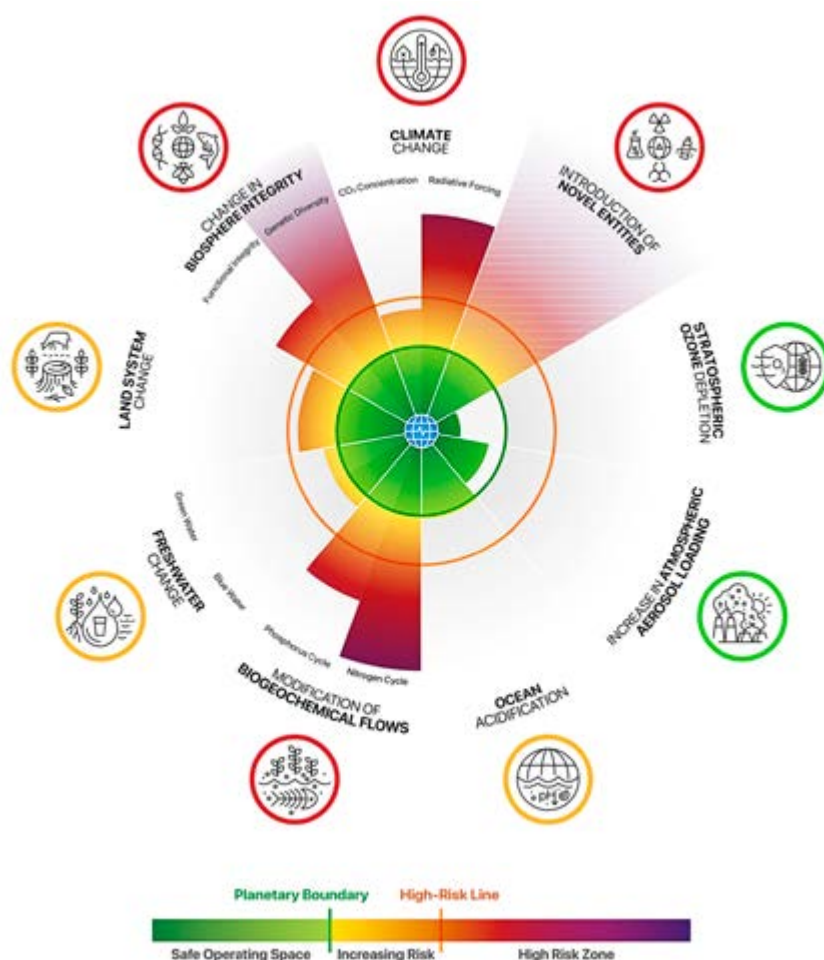
5.1 Toimiminen planetaarisissa rajoissa

Planetaariset rajat kuvaavat biofysikaalisia rajoja, joiden puitteissa ihmiskunta voi toimia maapallolla turvallisesti. Myös energiamurrosta ja energiasysteemiä voidaan tarkastella suhteessa tähän viitekehykseen. Planetaariset rajat sisältävät yhdeksän toisiinsa kytkeytyntä maapallon kannalta elintärkeää

järjestelmää ja prosessia, kuten ilmastonmuutoksen, biosfäärin eheyden, makean veden käytön ja biogeokemialliset kierrot. Kytkeytyneisyys tarkoittaa, että fossiilisesta hiilestä irtautumista ei voida edistää muista ympäristön reunaehdoista irrallaan, vaan ilmastotoimien tulee tukea samanaikaisesti kaikkein planetaaristen rajojen vakautta (ks. kuva 5.1.). Toisin sanoen fossiilisista polttoaineista irtautuminen ei saa aiheuttaa kestäväntöntä maankäyttöpainetta, lisätä luontokatoa tai ylittää muita reunaehtoja, kuten typen ja fosforin kiertoja. Energiajärjestelmien suun-

nittelun ja energiapolitiikan näkökulmasta tämä tarkoittaa sitä, että energiajärjestelmiä ja teknologisia valintoja täytyy arvioida näiden reunaehtojen mukaan, jotka asettavat ympäristöä koskevan kestävyys ylärajan.

Tällä hetkellä seitsemän yhdeksästä planetaarisesta rajasta on jo ylitetty. Syynä tähän on ihmisen toiminnan aiheuttama kasvava paine ilmastoon, luonnon monimuotoisuuteen, maankäyttöön, vesivaroihin, ravinnekiertoihin, kemiallisiin saasteisiin ja happamoitumiseen (Planetary Health Check, 2025; ks. kuva 5.1).



Kuva 5.1. Planetaaristen rajojen kuvio esittää yhdeksän maapallolle kriittisen järjestelmän ja prosessin nykytilan. Nämä prosessit säätelevät planeetan vakautta. Kukaan raja on määritelty yhden tai useamman muuttujan avulla havaintoaineiston, mallisimulaatioiden ja asiantuntijaarvioiden perusteella. Kunkin sektorin laajuus kuvaa nykytilaa suhteessa turvalliseen toimintalueeseen, ja rajan ylitys osoittaa reunaehdon rikkoutumista. Seitsemän yhdeksästä rajasta on ylitetty. Tummanvihreä ympyrä kuvaa planetaarista rajaa ja ohut oranssi viiva korkean riskin kynnystä. (Planetary Health Check, 2025.) Kuva on lisensoitu Creative Commons Attribution 4.0 International lisenssillä.

Viimeaikaisten YK:n ilmastokokousten keskeiset tulokset osoittavat, missä määrin ilmastomuutosta koskevissa planetaarisissa rajoissa pysyminen voidaan saavuttaa. Näitä tuloksia vasten voidaan arvioida, kuinka suuri osa sovitusta päästövähennystavoitteista toteutuu ja miten nykyiset toimet suhteutuvat yhteisiin ilmastotavoitteisiin.

Pariisin sopimuksen tavoitteena on pitää maapallon keskilämpötilan nousu selvästi alle 2 °C:n verrattuna esiteolliseen aikaan ja pyrkiä rajoittamaan nousu 1,5 °C:seen ilmastoriskien vähentämiseksi. Pitkän aikavälin tavoitteena on saavuttaa kasvihuonekaasujen nettonollapäästöt vuosisadan puoliväliin mennessä. Tavoitteen toteutumista seurataan säännöllisillä läpinäkyvillä arvioilla. Lisäksi yhteistyötä tehdään kansainvälinen rahoituksen, teknologian ja osaamisen valjastamiseksi. (COP21, 2015.) Sitoumus vahvistettiin COP30kokouksessa Belémmissä vuonna 2025 (COP30, 2025). Jäsenvaltiot eivät kuitenkaan päässeet yhteisymmärrykseen tiekartasta, joka olisi ohjannut fossiilisten polttoaineiden globaalia alasajoa, vaikka monet maat tukivat tätä. Kokouksen merkittävin aikaansaannos oli erilaiset rahoitussitoumukset, *Belém Mission to 1.5 °C* -aloitteen käynnistäminen, sekä mekanismi, jolla pyritään tukemaan oikeudenmukaista siirtymää. Fossiilisten polttoaineiden alasajoon ja metsäkadon pysäyttämiseen liittyvien sitovien päätösten puutetta kritisoitiin laajasti.

Nykyiset ilmastopäästöjen vähentämistoimet eivät riitä Pariisin sopimuksen tavoitteiden saavuttamiseen (Emissions Gap Report, 2025). Mikäli ainoastaan nykyiset politiikat pannaan täytäntöön, maapallon keskilämpötilan arvioidaan nousevan noin 2,6–2,7 °C vuoteen 2100 mennessä ja joidenkin arvioiden mukaan jopa 3,1 °C. Nykyisten kansallisten sitoumusten täysimääräinen toteuttaminen voisi alentaa lämpenemisen noin 2,3–2,5 °C:seen, kun taas optimistisen skenaarion mukaan, jossa kaikki ilmoitetut nettonollatavoitteet saavutetaan, lämpeneminen voisi rajoittua noin 1,9–2,1 °C:seen. Näitä optimistisia kehityskulkuja pidetään kuitenkin tällä hetkellä epätodennäköisinä.

Riippumaton tiedepohjainen Climate Action Tracker (CAT) on samoilla linjoilla. Sen arvion mukaan kansallinen ilmastopolitiikka ja sitoumukset eivät ole riittäviä suhteessa Pariisin sopimuksen 1,5 °C:n tavoitteeseen (CAT, 2009). CATin mukaan yhä kasvava fossiilisten polttoaineiden käyttö kumoaa uusiutuvan energian käyttöönotosta saatavat ilmastohyödyt ja päästöjen odotetaan saavuttavan huippunsa vuosikymmenen loppuun mennessä, mikäli päästöissä ei tapahdu tarvittavaa jyrkkää laskua. Päästökuilun umpeen kurominen ja vakavimpien ilmastovaikutusten välttäminen edellyttävät tiukempia tavoitteita vuosille 2030 ja 2035 sekä nopeampia päästövähennystoimia. Vain Norjan ja Yhdistyneen kuningaskunnan on arvioitu olevan aikataulussa 1,5 °C:n tavoitteen kanssa.

On siis selvää, etteivät nykyiset päästövähennystoimet riitä pitämään ilmaston lämpenemistä alle 2,0 °C:n tai 1,5 °C:n. Tämä vuoksi fossiilittomaan energiajärjestelmään tulee siirtyä nopeasti, sillä energiasectori on edelleen suurin ihmisen aiheuttama ilmaston lämpenemisen syy. Siten myös puhtaiden energiaratkaisujen kysynnän on jatkettava kasvuaan. Koska ilmaston lämpeneminen näyttää todennäköisesti ylittävän 2,0 °C:n, taloudellisia resursseja tulee kohdentaa riittävästi ilmastomuutokseen sopeutumiseen. Tämä koskee erityisesti maita, jotka ovat jo vähentäneet päästöjään merkittävästi tai joiden historiallinen vastuu kasvihuonekaasupäästöistä on pieni, mutta joille silti aiheutuu sopeutumisesta kasvavaa taakkaa.

Ilmastomuutoksen planetaariseen rajaan liittyvä haaste on tätäkin vakavampi, sillä turvallinen ja oikeudenmukainen raja on lähempänä 1,0 °C:ta kuin 1,5 °C:ta (Rockström ym., 2023). Tämä on noin 350 ppm:n hiilidioksidipitoisuus ilmakehässä, joka vastaa 1980-luvun lopun ilmastoolosuhteita (Hansen ym., 2008). Yksikään hallitustenvälisen ilmastomuutospaneeli IPCC:n kuudennen arviointiraportin tarkastelemista skenaarioista ei kuitenkaan saavuta 1,0 °C:n tasoa, ja vain harvat kehityspolut lähestyvät 1,0–1,2 °C:ta. Näihin sisältyy ongelmallisia oletuksia, kuten erittäin laaja bioenergian käyttö tai taloudellinen supistu-

minen, jotka voisivat osaltaan vaikeuttaa globaalin etelän energiaköyhyyden vähentämistä.

Viimeaikaiset tutkimukset viittaavat siihen, että 1,0 °C:n rajan saavuttaminen voisi olla mahdollista laajamittaisen uusiutuvan energian käyttöönoton ja hiilidioksidin poistoteknologioiden avulla (Breyer ym., 2023; Mühlbauer ym., 2025). Tämä edellyttäisi noin 10 prosenttia enemmän primäärienergiaa ja aiheuttaisi kustannuksia noin 0,6 prosenttia maailman bruttokansantuotteesta (BKT). Ilmaston lämpenemisen rajoittamisen 1,0 °C:seen 1,5 °C:n sijaan arvioidaan kasvattavan maailman BKT:tä noin kahdeksan prosenttia, joka ylittäisi selvästi lisäkustannukset. (Burke ym., 2015.)

Ilmastonmuutoksen rinnalla luonnon monimuotoisuuden heikkeneminen muodostaa toisen keskeisen globaalin haasteen, joka lisää epävarmuutta ihmisille elintärkeiden ekosysteemipalveluiden heikentyessä (Richardson ym., 2023; WWF, 2024). Vuonna 2022 sovitun kansainvälisen Kunming-Montrealin biodiversiteettikehityksen tavoitteena on pysäyttää luontokato vuoteen 2030 mennessä (GBF, 2022).

Tällä hetkellä maankäyttö ja sen muutokset vaikuttavat eniten maaekosysteemeissä luonnon monimuotoisuuden heikkenemiseen (ks. tarkemmin maankäytöstä ja biodiversiteetistä luvussa 5.3). Voimistuva ilmaston lämpeneminen voi kuitenkin tulevaisuudessa tulla suurimmaksi tekijäksi. (IPBES, 2019.) Luontokato myös lisää kasvihuonekaasupäästöjä, kun esimerkiksi metsäkato lisääntyy, ekosysteemit muuttuvat ja niiden toiminta heikkenee. Esimerkiksi metsäkato ja ilmastonmuutos voivat yhdessä johtaa keikahduspisteeseen, jossa Amazonin sademetsä muuttuu hiilinielusta päästölähteeksi. Tällöin 1,5 °C:n tavoitteen saavuttaminen ei enää olisi mahdollista. (Nobre ym., 2021; WWF, 2024; Järvinen ym., 2025.) Energiamurros tulee siis suunnitella niin, että se tukee sekä ilmasto- että luontotavoitteiden saavuttamista.

5.2 Sosiaalinen kestävyys ja oikeudenmukaisuus energiamurroksessa

Ympäristöön liittyvien ja taloudellisten ulottuvuuksien lisäksi sosiaaliset tekijät vaikuttavat oikeudenmukaiseen ja kestäväan energiamurrokseen. Viime kädessä murroksen etenemisnopeuden ratkaisee sosiaalinen hyväksyttävyyys.

Sosiaaliseen hyväksyttävyyteen vaikuttaa kansalaisten osallistuminen, luottamus ja omistajuus, ja sillä on useita ulottuvuuksia (Wüstenhagen ym., 2007). Se kattaa sen, miten ihmiset yleisesti suhtautuvat energiamurrokseen, miten paikallisyhteisöt reagoivat konkreettisiin hankkeisiin ja muutoksiin omassa elinympäristössään sekä miten markkinat ja sijoittajat suhtautuvat uusiin energiaratkaisuihin ja innovaatioihin. Sosiaalista hyväksyttävyyttä muovaavat myös käytännön vaikutukset, kuten työpaikkojen syntyminen ja paikallinen talouskehitys, jotka vaikuttavat siihen, miten energiamurros koetaan ja arvioidaan arjessa. (Wüstenhagen ym., 2007.) Energiamurros tapahtuu monella eri tasolla paikallisista yhteisöistä kansalliselle ja alueelliselle tasolle.

Paikalliset toimijat voivat olla keskeisiä energiamurroksen edistäjiä, mutta usein heidän vaikutusmahdollisuutensa ovat riippuvaisia EU:n ja kansallisen tason politiikasta. Tämän vuoksi politiikkatoimia tulee yhteensovittaa. Esimerkiksi energiayhteisöjen tukeminen on tehokkainta silloin, kun se perustuu yhteisöjen tarpeisiin, saa tukea paikallisista politiikkatoimista ja osallistumisesta sekä turvaa tarvittavat resurssit (Liljenfeldt, 2025). Kun nämä tekijät ymmärretään, voidaan suunnitella sellaista energiapolitiikkaa, joka auttaa yhteisöjä toimimaan aktiivisesti energiamurroksen edistäjinä.

Mikäli osallisuus ja yhteisöjen osallistuminen puuttuvat, päästövähennystoimet voivat vahvistaa sosiaalisia eriarvoisuuksia tai epäonnistua kokonaan (Rehman ym., 2026). Aktiivinen kansalaisten osallistuminen onkin edellytyksenä sille, että energiahankkeet ja energiamurros onnistuvat, ja tätä korostaa myös Euroopan vihreän siirtymän kehitysoh-

jelma (Green Deal). Odotukset energian tuottajakuluttajien (prosumereiden), kansalaisten ja energiayhteisöjen roolin kasvattamisessa ovat korkealla. Siten kansalaisten nähdään muuttuvan pelkistä energiankuluttajista aktiivisiksi energian tuottajiksi, sijoittajiksi ja paikallisten energijärjestelmien hallinnoijiksi (ks. luku 4 Ihmiset ja markkinat energiakansalaisuudesta).

Energiamurros voi lisätä merkittävästi sosioekonomisia hyötyjä, kuten vahvempia ja joustavampia talouksia, lisätä tasa-arvoa ja osallisuutta, edistää terveyttä sekä lisätä uusien työpaikkojen määrää (UN, 2021). Jotta nämä hyödyt voidaan saavuttaa, se edellyttää maiden hallitusten ja suurten yritysten lisäksi myös yrittäjien, kuntien ja kansalaisyhteiskunnan eli kansalaisten ja paikallisten järjestöjen välistä yhteistyötä, kun suunnitellaan uusia energiapäätöksiä ja tulevaisuuden energijärjestelmiä.

Hajautettuihin uusiutuviin energijärjestelmiin siirtyminen ja kotitalouksien aktiivinen osallistuminen voivat muuttaa sitä, mitkä yhteiskuntaryhmät käyttävät valtaa energia-alalla. Aurinkosähkön laajamittainen käyttöönotto, yhteisölliset tuulivoimahankkeet, paikallinen energiavarastointi ja älymittarit tukevat kansalaisten aktiivista osallistumista energiamarkkinoilla. Energia ei tällöin siirry ainoastaan suurilta tuottajilta passiivisille kuluttajille, vaan ihmiset voivat toimia aktiivisina energiakansalaisina tuottaen, varastoiden ja käyden kauppaa itsetuotamallaan sähköllä. (Jimenez Iturriza ym., 2019.) Tämä edistää energijärjestelmien hajauttamista ja energiademokratiaa.

Tällöin esimerkiksi tuottajakuluttajiksi ryhtyvät kansalaiset muuttuvat entistä vastuullisemmiksi, sillä heidän odotetaan paitsi maksavan laskunsa myös osallistuvan aktiivisesti siihen, miten energiaa tuotetaan, hallitaan ja jaetaan. Kotitalouksien muuttuva rooli on merkittävä, sillä kotitaloudet käyttävät suuren osan energiasta. EU:ssa kotitalouksien osuus on noin 27 prosenttia loppukulutuksesta (Eurostat, 2022). Arkisilla valinnoilla voidaan siten vaikuttaa merkittävästi energiamurrokseen. Tuottajakuluttajiksi ryhtymisen lisäksi kansalaiset

voivat tukea siirtymää säästämällä energiaa, muuttamalla elämäntapojaan (esimerkiksi vähentämällä lentomatkustamista), siirtymällä sähköiseen liikenteeseen tai parantamalla rakennusten energiatehokkuutta.

Energiamurroksen on oltava oikeudenmukaista, jotta se saa laajan yhteiskunnallisen tuen. Tämä tarkoittaa sitä, että siirtymä ei saa ylläpitää tai syventää eriarvoisuutta, vaan sen tulee tuottaa hyvää kaikille yhteiskuntaryhmille ja huomioida erityisesti kaikista haavoittuvimmassa asemassa olevat ryhmät. Euroopan komission puheenjohtajan Ursula von der Leyenin mukaan ”Ihmiset ovat Euroopan vihreän kehityksen ohjelman ytimessä... joka toimii vain, jos se on oikeudenmukainen – ja jos se toimii kaikille. Tuemme ihmisiä ja alueita, joiden on tehtävä suurempia ponnistuksia... varmistaaksemme, ettemme jätä ketään jälkeen” (EC, 2020).

On keskeistä ymmärtää, etteivät siirtymät ole pelkkiä teknisiä päivityksiä vaan syvästi yhteiskunnallisia prosesseja, jotka kietoutuvat politiikkaan ja talouteen sekä eri toimijaryhmien arvoihin ja uskomuksiin. Tämä näkökulma auttaa ymmärtämään, miksi oikeudenmukaisuuskysymysten tulisi olla energiamurrosta koskevan keskustelun ytimessä.

Oikeudenmukaisuus on jaettu käsitys siitä, mikä on oikein ja toivottavaa. Tutkijat korostavat, että energiamurros on ”inhimillistettävä” eli sen on perustuttava reiluuden periaatteen siten, etteivät kaikkein haavoittuvimmassa asemassa olevat ryhmät marginalisoidu eikä eriarvoisuus lisäännä (Jenkins ym., 2012). Vaikka vähähiilisten järjestelmien usein oletetaan olevan oikeudenmukaisempia, on muistettava, että myös vähähiilinen siirtymä voi keskittää ympäristöriskejä tai epäoikeudenmukaisia vaikutuksia vähemmän vaikutusvaltaisille toimijoille, kuten haavoittuville ryhmille tai syrjäisille paikallisyhteisöille.

Oikeudenmukaisen siirtymän käsite juontaa juurensa työväenliikkeisiin, mutta nykyisin se kytkeytyy tiiviisti ympäristö, ilmasto ja energiaoikeudenmukaisuuteen. Se korostaa, että vaikka päästöjen vähentäminen on kiireellistä, myös toteutustapojen on oltava

oikeudenmukaisia. Oikeudenmukaisuutta arvioitaessa voidaan kysyä esimerkiksi, kuka hyötyy, kuka vastaa kustannuksista ja miten päätöksiä tehdään. Oikeudenmukaisuuden eri ulottuvuudet auttavat tarkastelemaan, jakautuvatko hyödyt ja haitat yhteiskunnassa tasapuolisesti, ovatko päätöksentekoprosessit osallistavia ja läpinäkyviä sekä tunnistaako ja kunnioitetaanko marginalisoitujen ryhmien näkökulmia. (Zimm ym., 2024.)

Energiaan liittyvää oikeudenmukaisuutta voidaan tarkastella myös sen kautta, miten haittoja hyvitetään, tunnistetaanko rajat ylittävät ja tuleviin sukupolviin kohdistuvat vastuut sekä arvostetaanko erilaisia tiedon muotoja yhdenvertaisesti. Nämä kysymykset auttavat tunnistamaan mahdollisia epäoikeudenmukaisuuksia ja ohjaavat korjaaviin toimiin. Mikäli oikeudenmukaisuuskysymykset sivuutetaan, julkinen vastustus voi kasvaa ja hidastaa merkittävästi tai jopa pysäyttää osia energiamurroksesta. Kuten useat esimerkit energiainfrastruktuurihankkeiden vastustuksesta osoittavat, tällainen vastareaktio kertoo usein käsittelemättömistä epäoikeudenmukaisuuksista. (Brisbois & Cantoni, 2025.)

Ajankohtainen esimerkki tästä on litiumioniakkujen tuotantosektorin nopea kasvu Suomessa. Globaalit hiilineutraaliustavoitteet ovat nostaneet Suomen strategisesti tärkeään asemaan Euroopan akkualan toimitusketjussa. Suomen mineraalivarat ja teollinen osaaminen luovat merkittäviä taloudellisia mahdollisuuksia: arviolta 6–9 miljardin euron investoinnit ja jopa 20 000 työpaikkaa seuraavien viiden vuoden aikana (Akkuteollisuus, 2025). Samanaikaisesti nopea kasvu synnyttää kuitenkin monimutkaisia oikeudenmukaisuushaasteita.

Teollinen laajentuminen on luonut konflikteja ja sosiaalista vastustusta erityisesti herkillä alueilla, kuten luonnonsuojelualueiden läheisyydessä, saamelaiden poronhoitoalueilla, matkailu ja kulttuuriperintökohteissa sekä järvialueilla, joilla on runsaasti vapaaajan asumista (Eerola, 2024). Ympäristöriskit ovat synnyttäneet niin sanottuja greenongreen-konflikteja, joissa ilmastotavoitteet asettuvat vastakkain luonnonsuojelun kanssa. Tilan-

netta ovat kärjistäneet myös aiemmat ympäristövahingot, kuten Talvivaaran kaivosvuoto vuonna 2012, jolloin noin tuhat hehtaaria jokia ja järviä saastui.

Lisälaajentumista vastustavat kansalaiset ja järjestöt kritisoivat läpinäkymättömiä menettelytapoja, kuten epäselviä lupaprosesseja, keskitettyä päätöksentekoa ja rajallisia paikallisia vaikutusmahdollisuuksia, jotka ovat heikentäneet luottamusta ja toiminnan sosiaalista hyväksyttävyyttä. Vastustusta lisää myös kokemus paikallisten arvojen ja omistusoikeuksien sivuuttamisesta tai alkuperäiskansojen oikeuksien loukkaamisesta erityisesti Lapissa. Lisäksi kansainvälisten yritysten investointien kasvaessa syntyy taloudellisia jännitteitä siitä, kuka kantaa suurimmat haitat ja kuka hyötyy investoinneista. (Leino, 2024; Similä & Wallen, 2023.) Tutkimusten perusteella tällaisen vastustuksen voidaan odottaa lisääntyvän litiumioniakkujen koko toimitusketjun investointien kasvaessa Suomessa, mikä voi hidastaa tai estää energiamurroksen etenemistä.

Jotta näihin huoliin voidaan vastata, oikeudenmukaisuuden on oltava julkisen keskustelun keskiössä. Tämä tarkoittaa kansalaisten ja marginalisoitujen ryhmien kutsumista mukaan päätöksentekoon jo varhaisessa vaiheessa, jotta erilaiset intressit ja arvot huomioidaan, kaikki osapuolet voivat osallistua ja tulla kuulluiksi sekä paikalliset kontekstit ja oikeudet tunnistetaan. Oikeudenmukaisuutta vaativa paikallinen vastustus ei ole este, joka tulisi ohittaa, vaan perusta murrokselle, johon ihmiset luottavat, jota he tukevat ja jota he itse ovat rakentamassa. Kun oikeudenmukaisuuskysymykset käsitellään ajoissa ja avoimesti, siirtymä puhtaaseen energiatulevaisuuteen on kestävämpi, demokraattisempi ja laajemmin jaettu.

5.3 Ilmaston, maankäytön, luonnon ja vesivarojen suojelu

Tässä luvussa tarkastellaan energiamurroksen teknisiä, järjestelmän toimintaan liittyviä ja paikallisia ympäristövaikutuksia sekä niihin liittyviä yhteensovittamisen haasteita, joita syntyy, kun ratkaisuja toteutetaan eri sektoreilla ja vaihtelevissa paikallisissa olosuh-

teissa. Tarkastelu täydentää planetaaristen rajojen viitekehystä, joka keskittyy globaalien ekologisten reunaehto- jen määrittelyyn.

5.3.1 Ilmasto

Energiantuotanto on ilmaston maailmanlaajuisen lämpenemisen suurin yksittäinen aiheuttaja. Yli 75 prosenttia kasvihuonekaasupäästöistä aiheutuu fossiilisten polttoaineiden poltosta (Kunak, 2025). Energiantuotantoon liittyvät suorat ympäristövaikutukset voidaan jakaa kolmeen keskeiseen elinkaari- vaiheeseen:

Ylävirran prosessit: Energiainfrastruktuuri (raaka-aineiden otto, valmistus ja rakentaminen) sekä mahdollinen polttoaineketju (raaka-aineiden louhinta, tuotanto, jalostus ja kuljetus)

Käyttövaihe: Poltto, kunnossapito ja muut operatiiviset toiminnot

Alavirran prosessit: Purkaminen, käytöstä poistaminen ja kierrätys.

Kuvassa 5.2 esitetään eri polttoaineisiin ja teknologioihin perustuvan sähköntuotannon kasvihuonekaasupäästöjen vaihteluvälit. Kivihiileen, öljyyn ja maakaasuun perustuvassa sähköntuotannossa päästöt syntyvät pääosin poltossa. Päästöjen vaihteluun vaikuttavat muun muassa raaka-aineiden tuotantoon liittyvä kaasun soihdutus, metaanivuodot, alueelliset olosuhteet sekä käytetyt teknologiat. Hiilidioksidin talteenoton ja varastoinnin (CCS) käyttöönotto voi vähentää päästöjä merkittävästi, mutta fossiilisten polttoaineiden toimitusketjuun jää silti noin 10–15 prosenttia kokonaispäästöistä. CCS-teknologiaa hyödyntävässä fossiiliseen energiaan perustuvassa sähköntuotannossa päästöjen vaihteluun vaikuttavat muun muassa talteenottoaste, käyttöolosuhteet ja järjestelmän energiatehokkuus.

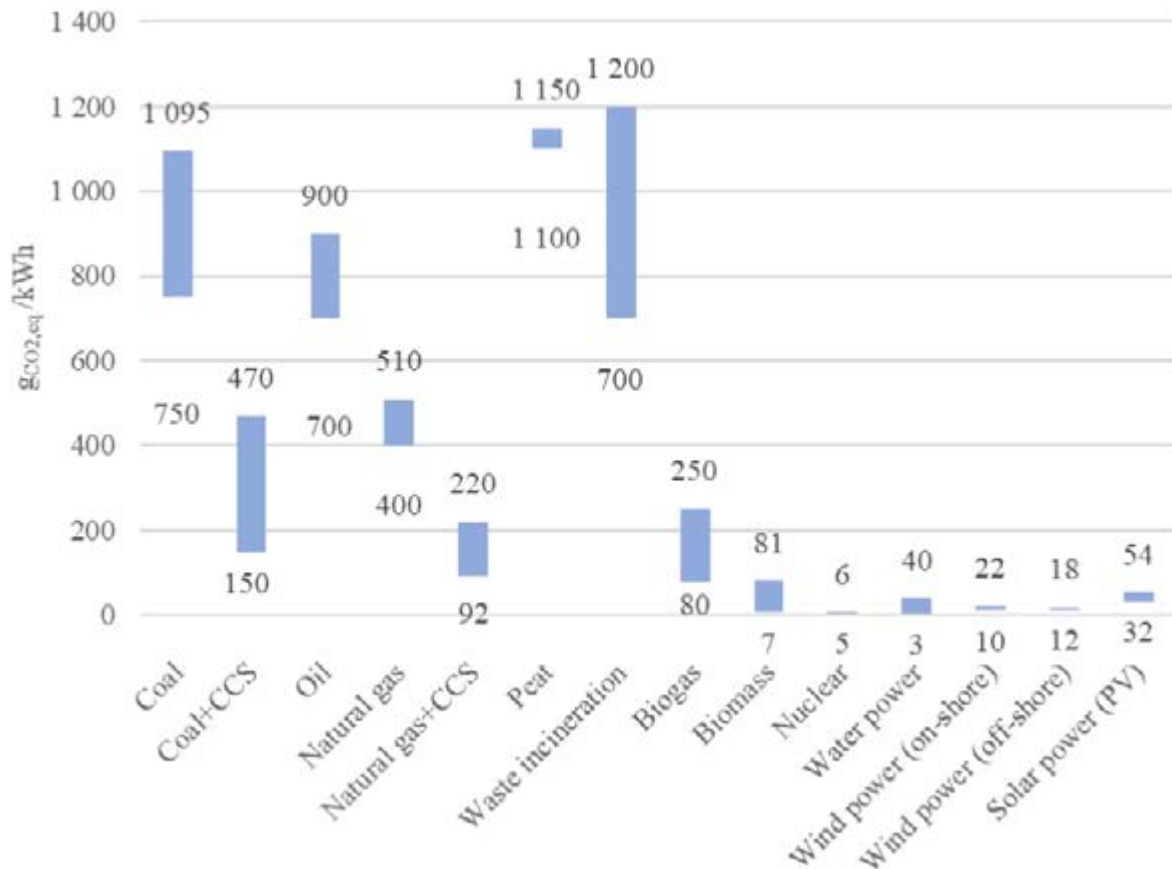
Turpeeseen perustuvan sähköntuotannon kasvihuonekaasuvaikutukset ovat korkeammat kuin monien muiden fossiilisten polttoaineiden, koska turve on hitaasti uusiutuva luonnonvara, jonka muodostuminen kestää

vuosisatoja. Suomi on yksi harvoista maista, joissa turvetta käytetään edelleen merkittäviä määriä energiantuotantoon. Turpeen käytön päästöt koostuvat ojituksesta, nostosta, kuljetuksesta ja poltosta, ja päästöjen suuruuteen vaikuttaa erityisesti turvemaiden sijainti ja ominaisuudet.

Jätteenpoltossa päästöjen vaihteluvälit määräytyvät jätteen koostumuksen ja järjestelmän hyötysuhteen mukaan. Merkittävä osa kasvihuonekaasupäästöistä syntyy jätevirran muoviosuudesta. Biokaasuun perustuvassa sähköntuotannossa poltosta aiheutuvaa hiilidioksidia pidetään usein ilmastoneutraalina, koska se on biogeenistä alkuperää. Tämän vuoksi päästövaihteluihin vaikuttavat ensisijaisesti syötteen tyyppi, kuljetus sekä metaanivuodot erityisesti mädätysprosessin aikana.

Uusiutuvan sähköntuotannon osalta suurin osa kasvihuonekaasupäästöistä syntyy rakentamisvaiheessa. Tämä korostuu erityisesti vesivoimassa sekä maa ja merituulivoimateknologioissa. Biomassaan perustuvassa sähköntuotannossa kasvihuonekaasupäästöt vaihtelevat merkittävästi riippuen käytetyn raaka-aineen tyypistä (erillinen tai sivuvirtoihin perustuva biomassa), toimitusketjun ominaisuuksista, maankäytön muutoksista, vaikutuksista hiilivarastoihin sekä järjestelmän energiatehokkuudesta. Ydinvoiman osalta päästöjen ylärajaa määrittää erityisesti polttoaineen hankintaketju, joka muodostaa suurimman osuuden elinkaaren aikaisista kasvihuonekaasupäästöistä.

Monokiteisiin ja monikiteisiin piiteknologioihin perustuvissa järjestelmissä on eroja, ja ne ilmenevät aurinkosähkössä päästöjen vaihteluväleinä. Tämän vuoksi monikiteiseen teknologiaan (multicrystalline) perustuvaa aurinkosähköä ei juuri enää käytetä aurinkosähköpaneelien valmistuksessa (Fraunhofer, 2025). Koska teknologinen kehitys jatkuu ja tuotannon sekä elinkaaren hallintakäytännöt tehostuvat, aurinkosähkön elinkaaren aikaiset kasvihuonekaasupäästöt voivat laskea 2020luvun alussa olleesta noin 27 gCO₂ekv/kWh:n tasolta alle 10 gCO₂ekv/kWh:n tasolle, joka voidaan saavuttaa 2040luvulta alkaen. (Dashti ym., 2025.)



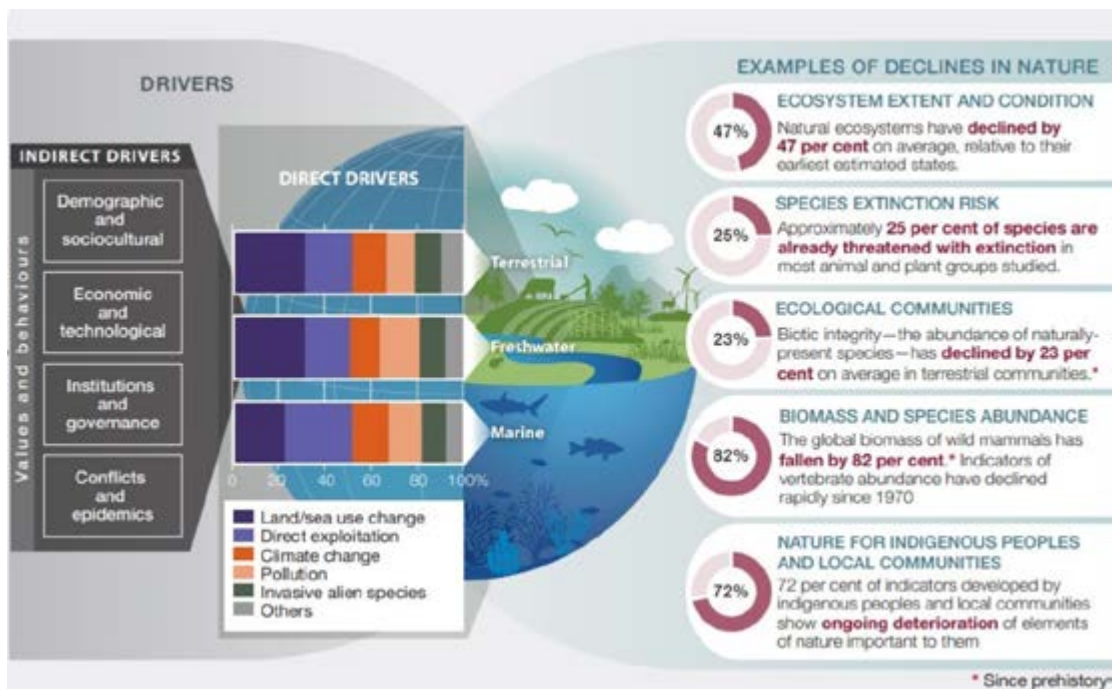
Kuva 5.2 Sähkön tuotannon kasvihuonekaasujen päästökertoimien kooste eri polttoaineille ja teknologioille (CCS = hiilidioksidin talteenotto ja varastointi, PV = aurinkosähkö). Lähteet: UNECE, 2021; Gibon & Hahn Menacho, 2023; Kadiyala ym., 2016; Giuntoli ym., 2017; Paolini ym., 2018; Han ym., 2023; Murphy ym., 2015; Gan ym., 2024; Li ym., 2025.

5.3.2 Maankäytön muutokset ja vaikutukset luonnon monimuotoisuuteen

Tässä alaluvussa tarkastellaan energiamurrokseen liittyviä maankäytön muutoksia ja niiden vaikutuksia luonnon monimuotoisuuteen. Metsien käyttöä ja hiilinieluja koskevia kysymyksiä käsitellään erikseen luvussa 5.5.

Maapintaala on globaalisti rajallinen resurssi. Arviolta noin 50 prosenttia asuinkelpoisesta maa-alueesta on jo varattu ruoantuotantoon, ja ihmistoiminta on muuttanut yli 75 prosenttia maapallon maa-alueista (IPBES, 2019). Kilpailu

luon välttämisen ruoantuotannon kanssa sekä metsäkadon ja luonnon monimuotoisuuden heikkenemisen ehkäisy edellyttää energiajärjestelmien maankäyttötarpeiden ja voimalaitosten sijoittelun huolellista tarkastelua. Luonnon monimuotoisuus heikkenee tällä hetkellä nopeammin kuin koskaan ihmiskunnan historiassa. Suorat luontokatoon vaikuttavat ajurit ovat maa- ja merialueiden käyttö, luonnonvarojen suora hyödyntäminen, ilmastomuutos, saastuminen sekä vieraslajit (kuva 5.3). Maaekosysteemeissä maankäyttö ja sen muutokset ovat merkittävin luonnon monimuotoisuuden heikkenemistä aiheuttava tekijä. (IPBES, 2019.)



Kuva 5.3 Luonnon köyhtymiseen vaikuttavat suorat ja epäsuorat ajurit. Esimerkkejä luonnon tilan heikkenemisestä globaalilla tasolla, erityisesti biodiversiteetin vähenemisestä, jotka johtuvat suorista ja epäsuorista muutostekijöistä (IPBES, 2019).

Energian tuotannon eri elinkaarivaiheisiin kuuluu myös maankäyttö, joka sisältää muun muassa kaivostoiminnan, valmistuksen ja tuotantolaitokset, biomassan ja polttoaineiden tuotannon sekä käytöstä poistamisen ja jätehuollon. Luontovaikutusten suuruuteen vaikuttaa se, kuinka paljon maa-alaa tarvitaan, millaista maankäyttö on (säilykö alueella osa alkuperäisestä luonnosta vai häviääkö se kokonaan) sekä missä maantieteellisessä sijainnissa maankäyttö tapahtuu. Samanlainen maankäyttö voi aiheuttaa hyvin erilaisia biodiversiteettivaikutuksia eri maantieteellisillä alueilla.

Globaalisti vaikutukset ovat suurimmat lähellä päiväntasaajaa ja saarilla, joissa luonnon monimuotoisuus on tyypillisesti runsas, lajien kotoperäisyysaste korkea ja ekosysteemit jo valmiiksi voimakkaan ihmistoiminnan paineen alla (Verones ym., 2022). Paikallisen luonnon turvaaminen on kuitenkin yhtä tärkeää kaikkialla, sillä ekosysteemien resilienssi, ruoantuotanto, kulttuuriset

arvot ja huoltovarmuus vaikuttavat luonnon monimuotoisuuteen kansallisella ja paikallisella tasolla. Nämä maantieteelliset erot luontovaikutuksissa herättävät kysymyksiä vastuunjaosta ja oikeudenmukaisuudesta erityisesti tilanteissa, joissa maankäyttöpaineet syntyvät globaalien toimitusketjujen ja kansainvälisen kulutuksen seurauksena kaukana varsinaisesta kulutuksesta.

Energiajärjestelmien suunnittelussa ilmastomuutos ja luonnon köyhtyminen liittyvät tiiviisti toisiinsa, eikä fossiilisista polttoaineista irtautumista tule tarkastella erillisenä tavoitteena. Kestävä energiamurros edellyttää, että toiminnassa otetaan huomioon ilmasto, luonnon monimuotoisuus ja maankäytön ympäristöön liittyvät tekijät. Uusiutuvan energian käyttöönoton kiihtyessä energiainfrastruktuurin vaikutukset ekosysteemeihin, elinympäristöihin ja maisemaan on arvioitava järjestelmällisesti ja vaikutuksia hallittava huolellisesti.

Maankäyttövaikutukset ovat keskeinen osa energiamurrosta, ja ne on huomioitava avoimesti energiasuunnittelussa. Kaikki energialähteet vaativat maapinta-alaa, mutta vaikutukset vaihtelevat merkittävästi teknologian, sijainnin sekä paikallisten ekologisten ja sosiaalisten olosuhteiden mukaan. Maankäytön intensiteetti eli energiantuotantoon tarvittava pintaala tuotettua energiamäärää kohti vaihtelee suuresti energialähteiden välillä ja riippuu voimakkaasti ympäristöolosuhteista, kuten tuuliolosuhteista tai auringonsäteilystä (ks. kuva 5.4).

Fossiilisten polttoaineiden tuotanto aiheuttaa tyypillisesti laajoja ja voimakkaasti haitallisia maankäyttövaikutuksia, jotka kohdistuvat maaperään, vesistöihin ja ekosysteemeihin. Vähähiilisistä energialähteistä ydinvoiman maankäytön intensiteetti on yleensä pienin, kun taas erilliseen biomassan viljelyyn perustuva energiantuotanto aiheuttaa suurimmat maankäyttövaikutukset tuotettua energiamäärää kohden. Tuuli ja aurinkoenergia vaativat usein verrattain vähän suoraa maa-alaa, mutta niiden vaikutukset voivat ulottua laajoille alueille.

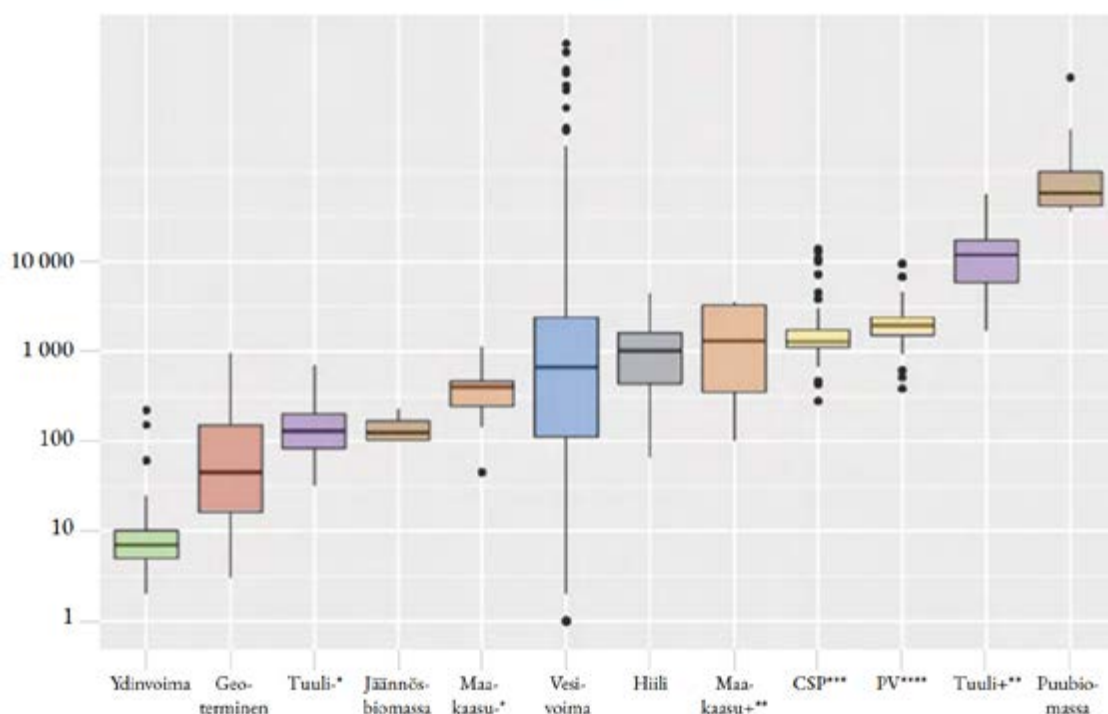
Tämä on erityisen tärkeää Suomen tavoitteen kannalta, sillä Suomi aikoo tuottaa noin kymmenen prosenttia Euroopan unionin vihreästä vedystä vuoteen 2030 mennessä (TEM, 2023). Tarvittavan maapinta-alan suuruus määräytyy sen mukaan, kuinka tiheästi tuuliturbiineita voidaan sijoitella tuulisähköntuotantoalueelle. Mikäli voimaloiden välisiä etäisyyksiä joudutaan kasvattamaan alueellisten olosuhteiden takia, asennettu kapasiteetti tiheys jää pieneksi ja saman sähkömäärän tuottaminen edellyttää suurempaa maa-alaa kuin tilanteessa, jossa kapasiteetti tiheys on suurempi. Näin ollen vedyn tuotantoon tarvittavan tuulisähkön vaatima kokonaispinta-ala voi vaihdella merkittävästi, arviolta noin 8 000–25 000 neliökilometriin. Yläraja on suuruusluokaltaan verrattavissa Suomen nykyiseen peltoalaan. (Paulomäki ym., 2026.)

Maankäyttö tulee siten ottaa huomioon uusiutuvan energian laajamittaisessa käyttöönotossa, mikä edellyttää huolellista alueellista suunnittelua ja maankäytön optimointia.



Politiikkatoimien näkökulmasta teknologiset valinnat, sijoituspaikkojen huolellinen arviointi ja integroidut maankäyttöstrategiat ovat ratkaisevia. Valitsemalla vähävaikutteisia alueita, arvioimalla systemaattisista ilmastoon, luonnon monimuotoisuuden ja maankäytön kompromisseja sekä yhdistämällä energian tuotantoa muihin maankäyttömuotoihin, kuten maa ja metsätalouteen, voidaan

osaltaan varmistaa, että energiajärjestelmän laajentaminen tukee sekä päästövähennys että luonnonsuojelutavoitteita. Esimerkkejä integroiduista ratkaisuista ovat tuulivoiman sijoittaminen talousmetsiin, aurinkosähkön yhdistäminen soiden ennallistamiseen sekä maatalouden ja aurinkosähkön yhdistävät järjestelmät, jotka voivat parantaa maankäytön tehokkuutta ja vähentää ympäristö- ja ilmastopaineita.



Kuva 5.4 Sähköntuotannon maankäytön intensiteetti (Land Use Intensity of Electricity, LUIE). Arvo 100 ha/TWh vastaa arvoja 1 km²/TWh ja 1 m²/MWh. Laatikot kuvaavat kvartiiliväliä (interkvartiilialue), ja laatikon keskimäinen viiva esittää mediaania. Janat ("viikset") ulottuvat korkeimpaan ja matalimpaan havaintoon, jotka sijaitsevat enintään 1,5kertaisen kvartiilivälin sisällä. Tämän alueen ulkopuolelle jäävät havainnot esitetään poikkeavina arvoina. Tarkastellut sähköntuotantomuodot ovat ydinenergia (Nuclear), geotermiinen energia (Geo), tuulivoima pelkän fyysisen jalanjäljen mukaan (Wind-), maakaasu pelkän fyysisen jalanjäljen mukaan (NG-) sekä maakaasu turvavälit huomioiden (NG+), vesivoima yksikäyttöisissä patoaltaissa (Hydro), kivihiili (Coal), aurinkolämpövoima (concentrating solar power, CSP), maahan asennettu aurinkosähkö (PV), tuulivoima fyysisen jalanjäljen ja turvavälien kanssa (Wind+), jäätännösbio-massa (BioRes) sekä erikseen viljelty biomassa (BioDed). Lähde: Lovering ym., 2022.

Energiantuotanto ei vaikuta ainoastaan siihen, kuinka paljon maapinta-alaa käytetään, vaan myös elinympäristöjen tilaan ja kytkeytyvyyteen. Maapinta-alaa tarvitaan polttoaineiden ja raaka-aineiden hankintaan, energiainfrastruktuuriin, materiaalien tuotantoon sekä jätehuoltoon, ja nämä toiminnot voivat muuttaa luonnonmaisemia merkittävästi. Esimerkiksi puu- ja turvepohjainen energiantuotanto on vahvasti sidoksissa luonnonvarojen käyttöön ja voi muuttaa elinympäristöjä merkittävästi raaka-aineiden korjuun, hakkuiden ja ojitus-ten vuoksi. Sen sijaan uusiutuvan energian, kuten tuulivoiman, tuotanto sijoittuu usein laajoille alueille, mutta varsinaisesti suoraan rakennettu tai pysyvästi muutettu pinta-ala jää tyypillisesti melko pieneksi. Vaikka suoraan muuttuva alue on rajallinen, siihen liittyvä infrastruktuuri, kuten huoltotiet ja sähköverkkoyhteydet, voi silti pirstoa elinympäristöjä ja vaikuttaa haitallisesti lajistoon laajalla alueella.

Elinympäristöjen pienentyminen ja pirstaloituminen uhkaavat lajeja suoraan ja heikentävät ekosysteemien resilienssiä eli niiden kykyä sietää häiriöitä, palautua muutoksista ja säilyttää toimintakykynsä pitkällä aikavälillä. Energiantuotanto, kuten tuulivoimalat, voi vaikuttaa biodiversiteettiin myös ympäröivillä maaalueilla niin sanotun syrjäytymisvaikutuksen vuoksi, kun osa lajeista välttelee tuulivoimaloiden läheisyyttä, mikä kaventaa niiden käytettävissä olevaa elinympäristöä. (Tolvanen ym., 2023.) Maankäytön tyyppi, laajuus ja käyttötavat määrittävät sitä, miten energiantuotanto vaikuttaa luonnon monimuotoisuuteen.

Luonnonvarojen suora hyödyntäminen liittyy energiantuotannossa esimerkiksi raaka-aineiden ja materiaalien käyttöön. Energiainfrastruktuuri voi myös lisätä lajien kuolleisuutta esimerkiksi sähkölinjoihin tai tuulivoimaloihin törmäysten seurauksena. (Tiago ym., 2018.) Saastumiseen liittyvät vaikutukset kattavat erilaisia ympäristöhaittoja, kuten happamoitumisen, rehevöitymisen ja mikromuovit. Energiantuotannossa happamoitumista tapahtuu usein polttoprosessien myötä, kun taas rehevöitymistä aiheuttaa lannoitteiden käyttö. Tätä tapahtuu erityisesti

energiakasvien viljelyssä, mutta myös esimerkiksi kivihiihikaivostoiminta voi vapauttaa fosforia ympäristöön. Haitallisia vieraslajeja voi siirtyä alueelle pitkien kuljetusketjujen myötä, mutta myös energiantuotantokohteet voivat toimia niiden leviämisalustoina.

5.3.3 Vesi

Ilmastonmuutoksen ja maankäyttövaikutusten tarkastelun lisäksi tulee arvioida myös sitä, miten energiajärjestelmät vaikuttavat vesivaroihin. Vaikka maapallolla on runsaasti vettä, vain noin kolme prosenttia siitä on makeaa vettä. Vesi on siten kriittinen resurssi, jonka suojeleminen ja käyttö edellyttävät huolellista hallintaa.

Vesi on keskeinen osa energiajärjestelmän toimintaa. Lämpövoimalaitokset, mukaan lukien kivihiihi, maakaasu, biomassa ja ydinvoimalat, tarvitsevat runsaasti vettä jäähdytykseen ja höyryn lauhdutukseen (Dahl Larsen & Drews, 2019). Lisäksi fossiilisten polttoaineiden tuotanto ja biomassan jalostus vaativat huomattavan paljon vettä (IEA Bioenergy, 2024). Toisaalta veden saatavuus itsessään edellyttää energiaa vedenottoon, käsittelyyn, pumppaukseen ja jakeluun. Tätä keskinäisriippuvuutta kutsutaan vesi-energiakytkökseksi (water-energy nexus) (Lee ym., 2017).

Energiasektori on yksi suurimmista teollisista makean veden käyttäjistä. Sen osuudeksi arvioidaan noin 10–15 prosenttia, ja tämän ennustetaan kaksinkertaistuvan vuoteen 2030 mennessä (IEA, 2023b). Lisäksi energiantuotannon vedenkäyttö voi heikentää veden laatua kemiallisen saastumisen, lämpökuorituksen ja virtaamien muutosten vuoksi.

Energiasektorilla makean veden otot ovat selvästi suurempia kuin varsinainen vedenkulutus, sillä suurin osa jäähdytysvedestä palautuu takaisin vesistöihin, kuten taulukossa 5.1 esitetään. Sähköntuotannon jäähdytys sekä lämpö että ydinvoimateknologioissa muodostaa sektorin suurimman vedenoton. Sen sijaan primäärienergian tuotanto kuluttaa eniten vettä erityisesti fossiilisten polttoaineiden tuotannossa ja biomassan viljelyssä.

Aurinko ja tuulivoimateknologiat vaativat suhteellisen vähän vettä valmistusvaiheessa, ja nämä vaikutukset sisältyvät taulukossa 5.1 uusiutuvan energian luokkaan. Jos fossiilinen ja ydinvoimaan perustuva lämpösähköntuotanto korvattaisiin pääosin uusiutuvalla sähköntuotannolla, vedenkulutus voisi vähentyä jopa 98 prosenttia ja vedenotto 95 prosenttia. Tämä perustuu tutkimukseen, jossa verrattiin 13 863 lämpövoimalaitosyksikön vesijalanjälkeä. (Lohrmann, 2019.)

Tällä hetkellä maailmanlaajuinen vedyn tuotanto kuluttaa noin 1,5 miljardia kuutiometriä makeaa vettä. Tämän määrän arvioidaan kasvavan noin kolmeen miljardiin kuutiometriin vuoteen 2030 mennessä ja noin kymmeneen miljardiin kuutiometriin vuoteen 2050 mennessä, kun tarkastellaan pelkästään vihreän vedyn tuotantoa. (IEA, 2023b.)

Taulukko 5.1. Energiasektorin vedenkäyttö globaalisti eri luokittain. Lähteet: IEA 2023b; Planète Énergies, 2025.

	Vedenotto (mrd. m ³)	Vedenotto (%)	Vedenkulutus (mrd. m ³)	Vedenkulutus (%)
Yhteensä (energiasektori)	367.5	100	52.5	100
Sähköntuotanto (jäähdytys)	308.0	83.80	16.2	30.90
Primäärienergian tuotanto (alkutuotanto) (fossiiliset + biopolttoaineet)	59.5	16.20	36.3	69.10
Fossiiliset (yhteensä)	21.7	5.90	18.8	35.80
Kivihiili	8.6	39.70	3.2	17.00
Maakaasu	6.0	27.50	2.1	11.30
Öljy	0.2	1.10	0.4	1.90
Ydinenergia	2.2	10.30	1.7	9.10
Biopolttoaineet ja bioenergia	37.8	10.30	17.5	33.30
Uusiutuva sähkö ja muut uusiutuvat prosessit	12.1	3.30	1	1.90

5.4 Bioenergian ja biomassan rooli

Maailmanlaajuinen bioenergian kulutus kasvoi hieman vuonna 2024 ja ylitti 60 EJ:n tason. Perinteinen kiinteä biomassa muodosti tästä noin kolmanneksen (20 EJ), kun taas moderni bioenergia, johon kuuluvat kiinteä bioenergia (34 EJ), nestemäiset biopolttoaineet (4 EJ) ja biokaasu (2 EJ), kattoi loput (IEA, 2025a).

Kiinteä bioenergia vastaa nykyisin noin 85 prosenttia modernin bioenergian kysynnästä. Sitä syntyy muun muassa metsätalouden sivuvirroista ja yhdyskuntajätteestä, ja sitä käytetään pääasiassa lämmön ja sähkön tuotannossa sekä raaka-aineena liikenteen biopolttoaineiden valmistuksessa. Biopolttoaineiden tuotannon laajentumista rajoittavat

kuitenkin kilpailevat maankäyttömuodot, kuten ruoantuotanto ja luonnon monimuotoisuuden suojeleminen. Vuoteen 2050 mennessä bioenergian ja jätteiden kokonaiskulutus voisi ylittää 100 EJ:n tason, joka vastaa varovaisia arvioita globaalista kestävästä tuotantopotentiaalista (IEA, 2025a) ja jota pidetään usein bioenergian kestävästä globaalista tarjonnan ylärajana (Creutzig ym., 2015).

Euroopan unionissa bioenergialle on asetettu maailman tiukimmat kestävyyskriteerit, joista ajantasaisimmat on määritelty RED III direktiivissä. Kriteerit edellyttävät kasvihuonekaasupäästöjen merkittäviä vähennyksiä ja asettavat rajoituksia bioenergian tuotannossa käytettävän biomassan maankäytölle. Kansainväliset vapaaehtoiset sertifiointijärjestelmät täydentävät sääntelyä ja varmentavat kestävyttä myös sosiaalisten ja hallinnollisten vaatimusten osalta. Puubiomassaa koskeviin vaatimuksiin sisältyy lisäksi kestävä metsänhoidon periaatteiden noudattaminen ja kaskadikäytön periaate, jotka edistävät hiilensidontaa ja luonnon monimuotoisuutta tukemalla metsien rakenteellista ja toiminnallista monimuotoisuutta.

Biopolttoaineet ovat edelleen keskeinen vaihtoehto, joilla liikenteessä käytettävä fossiilinen öljy voidaan korvata, mutta niiden käytön laajentamisen on pysyttävä kestävyden rajoissa. Näihin kuuluvat maankäytön saataavuus, vaikutukset ruoantuotantoon, luonnon monimuotoisuuteen ja vesivarojen käyttöön sekä hiilitaseeseen liittyvät kysymykset. Vain näiden ehtojen täytyessä biopolttoaineet voivat edistää ilmastomuutoksen hillintää vaarantamatta muita planetaarisia reunaehtoja. Vaikka nestemäiset biopolttoaineet hallitsevat edelleen fossiilittoman tieliikenteen ratkaisuja, sähköajoneuvojen odotetaan olevan tärkein keino vähentää henkilöliikenteen päästöjä. Nestemäisiä biopolttoaineita käytetään yhä enemmän ilmailussa käytetyissä kestävässä lentopolttoaineissa (Sustainable Aviation Fuels, SAF) sekä merenkulussa, jossa vaihtoehtoina ovat muun muassa metanoli, vety ja ammoniakki (Kian, 2026). EU:n toimenpiteet, kuten ReFuelEU Aviation, FuelEU Maritime ja päästökauppajärjestelmä, lisäävät biopolttoaineiden sekoitevelvoitteita

vuoteen 2035 mennessä. 2040-luvulla kestäviä lentopolttoaineita arvioidaan valmistettavan vedystä ja talteen otetusta biogeenisestä hiilidioksidista valmistetuista synteettisistä polttoaineista. Nykyisten politiikkatoimien arvioidaan mahdollistavan sen, että vähäpäästöiset polttoaineet kattavat vuoteen 2050 mennessä lähes kymmenen prosenttia ilmailun ja 15 prosenttia merenkulun energiankäytöstä (IEA, 2025a).

Biokaasu on nopeimmin kasvava bioenergian muoto, ja yhä suurempi osa siitä jalostetaan biometaaniksi. Kasvua vauhdittavat useissa maissa sitä tukevat politiikkatoimet, jotka edistävät biometaanin käyttöä suorana maakaasun korvaajana ja sen merkitystä energiaturvallisuuden vahvistamisessa. Tällä hetkellä maailmanlaajuisesta kestävästä biokaasun ja biometaanin potentiaalista hyödynnetään vain noin viisi prosenttia. Euroopan unioni on niiden käytössä edelläkävijä ja hyödyntää noin 40 prosenttia omasta biokaasupotentiaalistaan. Sillä on kunnianhimoisia biometaanin käyttöä koskevia tavoitteita, joilla vahvistetaan kotimaisten energialähteiden käyttöä ja vähennetään riippuvuutta venäläisestä kaasusta (IEA, 2025a).

Sähköistyminen parantaa merkittävästi energiatehokkuutta ja vähentää päästöjä, mutta se ei yksin riitä ratkaisemaan hiilineutraaliutta kaikilla vaikeasti päästövähennettävillä sektoreilla, kuten korkeaa lämpötilaa vaativissa teollisissa prosesseissa. Rakennukset ja teollisuus, jotka ovat kytkeytyneet maakaasuverkkoihin, voivat osittain siirtyä biometaanin tai synteettisten kaasujen käyttöön. Maailmanlaajuisesti kaukolämpöjärjestelmät ovat siirtymässä polttoainepohjaisista ratkaisuista kohti integroitua lähestymistapaa, joka yhdistää aurinkolämmön, geotermisen energian, lämpöpumput ja hukkalämmön hyödyntämisen. Suurten lämmitystarpeiden maissa, kuten Suomessa, bioenergia säilyy keskeisenä osana kaukolämpöä erityisesti talven kulutushuippujen kattamisessa. Lisäksi yhteistuotantolaitokset voivat hyödyntää bioenergiaa sähköntuotannossa tarjoten samalla välttämätöntä säätö- ja tasapainotuskapasiteettia vaihtelevan uusiutuvan energiantuotannon tueksi (ks. luku 7.1.1 teknologioista).



5.5 Hiilen viisas hallinta

Tässä luvussa keskitytään hiilen hallinnan kestävyysnäkökulmiin, kun taas luvussa 7.2.2 tarkastellaan hiileen liittyviä teknologisia ratkaisuja. Suomessa maankäytön muutoksilla voidaan vaikuttaa hiilen tehokkaaseen hallintaan. Metsien ja muiden biomassapohjaisten resurssien muuntaminen energiaksi tai biopolttoaineiksi ja kemikaaleiksi vapauttaa biogeenistä CO₂:ta, joka voi olla osa uusiutuvaa hiilen kiertoa, jos hiilidioksidia otetaan talteen ja hyödynnetään (CCU). Nykyaikaiset yhteiskunnat ovat vahvasti riippuvaisia fossiilipohjaisista tuotteista, ja ilman kestäviä vaihtoehtoja näille välttämättömille materiaaleille ilmastomuutoksen hillintä on vaikeaa erityisesti vaikeasti päästövähennettävillä sektoreilla. CCU yhdistetään usein vähähiilisen vedyn (H₂) tuotantoon, jossa valmistetaan näitä vaihtoehtoisia tuotteita. Vähähiilistä vetyä ja siitä johdettuja tuotteita kutsutaan usein PowertoX (PtX) -tuotteiksi. Toinen toteuttamiskelpoinen tapa vähentää nettopäästöjä on hyödyntää teknisiä hiilinieluja, kuten hiilidioksidin talteenottoa ja varastointia (CCS), tai vahvistaa luonnollisia nieluja, kuten metsiä. Tässä luvussa esitetään keskeiset havainnot ja politiikan kannalta olennaiset johtopäätökset ilman yksityiskohtaista kuvausta käytetyistä laskentamenetelmistä. Skenaariot perustuvat hiilitase- ja hiilinielulaskentaan, jotka ovat hiljattain uudistuneet ja voivat tarkentua edelleen uuden tiedon myötä.

Jotta hiiltä voidaan hallita viisaasti, on tärkeää ymmärtää keskeinen käsitteistö.

- **Hiilidioksidin poisto** (*carbon dioxide removal, CDR*) kattaa menetelmät, joilla hiilidioksidia poistetaan suoraan ilmakehästä ja sidotaan pitkäaikaisiin varastoihin, jolloin saavutetaan nettopositiivisten päästöjen sijaan nettonegatiivisia päästöjä. Menetelmiin kuuluvat biologiset (esim. metsitys), teknologiset, geologiset ja meriin perustuvat ratkaisut, ja niillä voidaan kompensoida jäljelle jääviä päästöjä sekä saavuttaa nettopositiivisia ilmastotavoitteita.
- **Hiilidioksidin talteenotto ja hyödyntäminen** (*carbon capture and utilization, CCU*) tarkoittaa hiilidioksidin talteenottoa pistelähteistä tai ilmakehästä ja ohjaamista tuotannolliseen käyttöön pysyvän varastoinnin sijaan (Mertens ym., 2023). CCU-ratkaisuja ovat esimerkiksi mineralisointi rakennusmateriaaleiksi, synteettiset polttoaineet, polymeerit ja kemianteollisuuden väli tuotteet. CCU:n ilmastovaikutus vaihtelee huomattavasti toteutustavan mukaan.
- **Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi** (*carbon capture and storage, CCS*) tarkoittaa hiilidioksidin talteenottoa pistelähteistä, kuten voimalaitoksista tai teollisuuslaitoksista, ja sen varastointia geologisiin muodostumiin (esim. ehtyneisiin esiintymiin tai suolavesimuodostumiin). Toisin kuin CDR, CCS ei poista ilmakehän hiilidioksidia, vaan sen rooli on estää uusien päästöjen syntyminen estämällä väkevöityneiden teollisten hiilidioksidivirtojen vapautuminen ilmakehään.

EU:ssa kukin jäsenvaltio vastaa itse niistä teknologisista ratkaisuista, joilla fossiiliset päästöt vähennetään nollaan, ja kantaa näin myös kansallisten toimien kustannukset. Sen sijaan hiilenhallinnan kustannusten jakamisesta EUtasolla ei ole vielä sovittu. Osa maista, kuten Tanska ja Ruotsi, ovat käynnistäneet CCStoimia kansallisella rahoituksella, mutta EULaaajuista rahoitusmallia ei ole toistaiseksi hyväksytty. EU:n LULUCF-sektorin (maankäyttö, maankäytön muutos ja metsätalous) velvoitteet on jaettu jäsenmaille historiallisten arvojen perusteella. Tällä hetkellä merkittävä haaste on, että huomattava osa jäsenvaltioista ei mittaa LULUCFpäästöjään riittävän tarkasti vaan tukeutuu hiilivarastolaskentaan (kgCO₂ekv/ha).

Suomen metsät ovat olleet hiilinieluja koko ajanjakson 1990–2024, ja metsien vuotuinen kasvu on ylittänyt sadan miljoonan kuutiometrin rajan. Nielun vahvuus on kuitenkin heikentynyt merkittävästi viime vuosina (Luke, 2025). Suomen Ilmastopaneeli (Seppälä ym. 2026) tarkasteli eri hakkuuskenaarioita biodiversiteetin, hiilinielun ja päästövähennystavoitteiden näkökulmista. Arvion mukaan alhaisin tarkasteltu hakkuutaso, 60 miljoonaa kuutiometriä vuodessa, ja mahdollisesti hieman tätä korkeampi mahdollistavat sekä nykyisten ilmastotavoitteiden saavuttamisen että luonnon monimuotoisuuden kannalta tärkeiden metsärakenteiden lisääntymisen. Hakkuutaso 70 miljoonaa kuutiometriä vuodessa pitää metsät selkeänä hiilinieluna, mutta se ei riitä EU:n vuoden 2030 maankäyttösektorin tavoitteeseen eikä Suomen vuoden 2035 hiilineutraaliustavoitteeseen. Jos hakkuutasoja ei alenneta samalla, kun suojelualueita laajennetaan, 70 miljoonan kuutiometrin taso lisää painetta talousmetsiin ja heikentää hiilinielun pitkän aikavälin kehitystä. Samalla noin 60 miljoonan kuutiometrin vuotuisen hakkuutason tukemat myönteiset biodiversiteettitrendit pysähtyvät tai kääntyvät laskuun. Hakkuutason nostaminen 80 miljoonaan kuutiometriin vuodessa olisi ristiriidassa sekä ilmasto että biodiversiteettitavoitteiden kanssa lyhyellä aikavälillä ja heikentäisi niiden saavuttamista pitkällä aikavälillä. (Seppälä ym., 2026.)

Toisessa Suomen Ilmastopaneelin raportissa (Kujanpää ym., 2023) korostetaan, että teknologiset hiilinielut (bioenergiaCCS eli BECCS) voivat tukea Suomen ilmastotavoitteita vuoden 2030 jälkeen, mutta ne eivät voi korvata tai viivästyttää muita ilmastotoimia erityisesti, koska Suomi on jo jäämässä jälkeen EU:n vuoden 2030 tavoitteista taakanjako ja maankäyttösektoreilla. Vahvistettuja toimia tarvitaan myös vuoden 2035 hiilineutraaliustavoitteen saavuttamiseksi. Ilmastopaneelin mukaan tavoitteen saavuttamiseen voitaisiin vaikuttaa tuottamalla 5–6 megatonnia negatiivisia päästöjä. Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi Suomen kahden tai kolmen suurimman biogeenisen päästölähteen, pääasiassa sellu, paperi ja biotuotetehtaiden, yhteydessä voisi tuottaa noin viisi megatonnia teknisiä hiilinieluja. Tämän toteuttaminen edellyttäisi arviolta noin 600–700 miljoonan euron vuosittaista rahoitusta, jos valtio kattaa kaikki talteenoton, paineistuksen, kuljetuksen ja varastoinnin kustannukset.

PtX-tuotteet voivat vähentää päästöjä korvaamalla fossiilipohjaisia vaihtoehtoja ja siten vähentää fossiiliriippuvuutta. Fossiilisten tuotteiden korvaaminen CCU-ratkaisuilla voi tuottaa suuremman ilmastomuutoksen hillintäpotentiaalin kuin CCS, mutta vaikutus riippuu käytetystä energijakaumasta (Krogh ym., 2024). Sillman ym. (2024) toteuttivat meta-analyysin useista PtX-poluista ja vertasivat niiden päästövähennyspotentiaalia. Tarkasteluun sisältyy myös PtX-polkuja, jotka eivät perustu CCU:hun. Tulosten mukaan vedyn käyttö teräksen valmistuksessa tuottaa suurimman ilmastohyödyn, seuraavina ammoniakkin tuotanto, vedyn suora käyttö sekä biokaasun jalostaminen (ks. taulukko 5.2). Myös proteiinin tuottaminen Power-to-Food-polun avulla tarjoaa merkittävän päästövähennyspotentiaalin erityisesti verrattuna lihantuotantoon, mutta sen vaikutus riippuu siitä, minkä tuotteen se korvaa. Sen sijaan polttoaineiden tai muovien valmistus vedystä ja CO₂:sta tuottaa tyypillisesti pienemmän hyödyn, koska CO₂:n talteenotto ja prosessointi ovat energiantensiivisiä. Tästä huolimatta kaikki vaihtoehdot, jotka perustuvat ydinvoimaan tai uusiutuvaan sähköön, voivat tuottaa merkittäviä päästövähennyksiä, kun

ne korvaavat tavanomaisia fossiilipohjaisia tuotteita. Käytetyn sähkön tuotantotapa on ratkaiseva: jos vety tuotetaan uusiutuvalla sähköllä tai ydinvoimalla, korvausvaikutukset ovat suuria, mutta jos sähkö tuotetaan fossiilisilla polttoaineilla, hyödyt voivat

kadota. Yhteenvetona voidaan todeta, että uusiutuvaan sähköön perustuvat PtX-tuotteet voivat tarjota ympäristön kannalta kestäviä vaihtoehtoja fossiilisille tuotteille, mutta ilmastohyöty riippuu olennaisesti siitä, mitä tuotetaan ja mitä sillä korvataan.

Taulukko 5.2. Useiden PowertoXpolkujen päästövähennyspotentiaali. Vety tuotetaan veden elektrolyysillä uusiutuvaa energiaa tai ydinenergiaa käyttäen (mukaillen Sillman ym., 2024).

PtX-arvoketju	Vertailutuotteet	Päästövähennys MIN, MAX [kg _{CO2-eq} /kg _{H2}]	Päästövähennys MEAN [kg _{CO2-eq} /kg _{H2}]
Sähköstä vedyksi	H ₂ SMR:sta; kivihiilen kaasutuksesta	5.68–24.96	9.61; 22.96
Sähköstä metaaniksi	Maakaasu	1.28–6.8	3.91
Biokaasun jalostus	Maakaasu	9.52–15.35	12.43
Sähköstä metanoliksi	Metanoli maakaasusta tai kivihiilestä	Ei päästövähennys-potentiaalia – 22.88	3.33; 8.92
Sähköstä dieseliksi	Diesel	1.76–30.93	9.75
Sähköstä bensiiniksi	Bensiini	2.06–6.71	5.69
Sähköstä lentopoltto-aineeksi	Lentopolttoaine	4.55–16,62	8.41
Sähköstä muoveiksi	Polypropeeni petrokemian tehtaasta	Ei päästövähennys-potentiaalia –7.02	2.46
Sähköstä ammoniakiksi	Ammoniakki maakaasusta	4.09–15.14	11.33
Sähköstä teräkseksi	Masuuni-happi-konvertteri-prosessi	21.4–38.96	31.97
Sähköstä ruoaksi	Kasviproteiinit; muut mikrobiproteiinit	Ei päästövähennys-potentiaalia –347.52	*

6. OSAAMINEN JA KOULUTUS

Kirjoittajat: Johanna Naukkarinen, Miika Marttila, Minna Havukainen ja Hanna Paulomäki

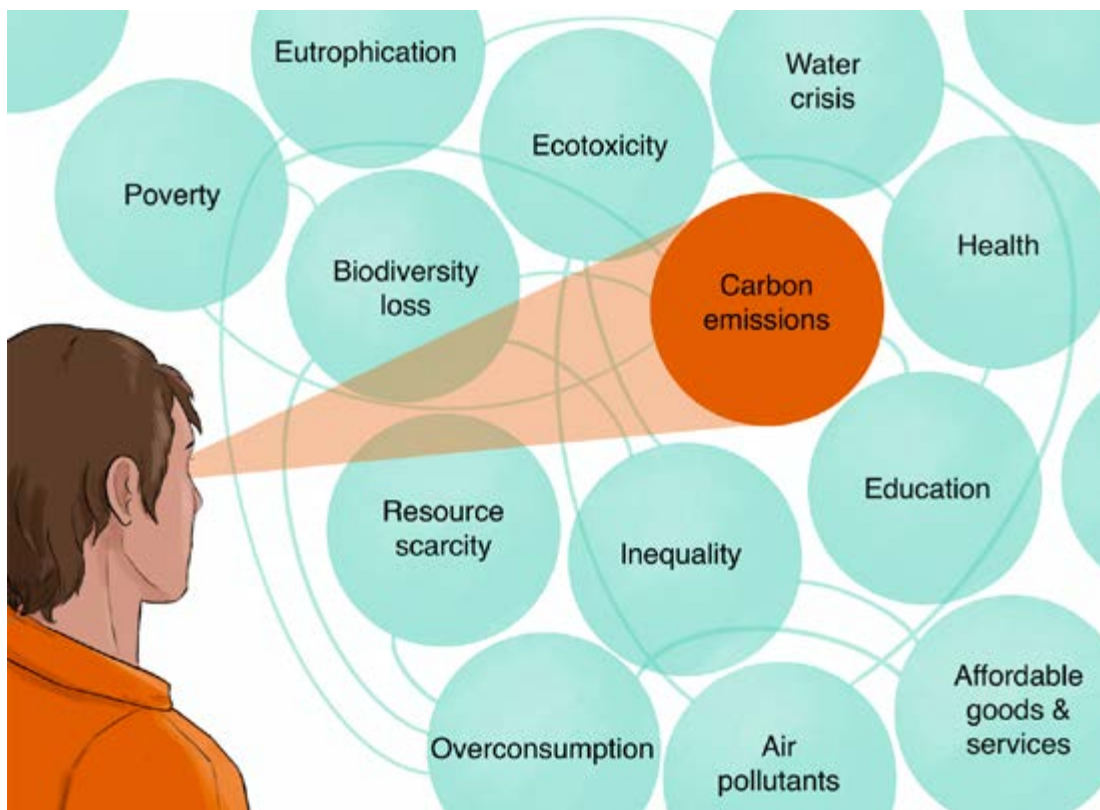
6.1 Kestävä energiamurros vaatii uutta osaamista

Energiamurros edellyttää monipuolista osaamista ja useiden eri toimijoiden yhteistyötä, jotta kestävä energiajärjestelmä voidaan toteuttaa. Tämä haastaa insinöörikoulutusta kahdella keskeisellä tavalla. Ensiksi pitää luoda ymmärrys siitä, millaisia kestävät energiajärjestelmät ovat tulevaisuudessa eli miten järjestelmät toimivat planetaarisissa rajoissa ja luovat hyvinvointia kaikille yhteiskunnan tasolle. Toiseksi tarvitaan osaamista energiajärjestelmien suunnitteluun, käyttöön ja turvaamiseen ääriolosuhteissa samalla, kun luonnon monimuotoisuus ja sosiaalinen kestävyys integroidaan osaksi energiasuunnittelua. Teollisuuden sidosryhmissä nämä tunnistetaan merkittäviksi osaamista ja koulutusta koskeviksi puutteiksi, sillä niitä tarvitaan tukemaan energiamurrosta (Paulomäki & Järvinen, 2025).

Uusiutuva energia ja sähköistyminen lisäävät kysynnän vaihtelua, joten insinöörien on valmistauduttava toimimaan dynaamisesti muuttuvissa järjestelmissä ja hallitsemaan monimutkaisia kokonaisuuksia sekä tekemään kompromisseja. Heidän on tämän lisäksi ymmärrettävä ja osattava navigoida poliittisten, taloudellisten, yhteiskunnallisten, teknologisten ja ympäristöä koskevien haasteiden keskellä. Lisäksi monimutkainen sääntely, vaihtelevat energian hinnat ja nopea teknologinen kehitys vaikuttavat kestävien energiajärjestelmien suunnitteluun. Uudet osaamistarpeet edellyttävät sekä teknistä osaamista että muita taitoja, kuten viestintää, vuorovaikutusta ja tiimityöskentelyä. Energia-alan koulutuksen tulee valmistaa asian-

tuntijoita tarkastelemaan samanaikaisesti ekologisia, sosiaalisia ja taloudellisia tavoitteita ja välttämään niin sanottua hiilitunne-

linäköä (kuva 6.1), jossa päästöjen vähentämistä edistetään luonnon tai ihmisoikeuksien kustannuksella (Paulomäki & Järvinen, 2025).



Kuva 6.1 Hiilitunnelinäkö (carbon tunnel vision) (Paulomäki & Järvinen, 2025).

Tekijänoikeudet: Maija Karala.

Uudenlaista teknistä osaamista tarvitaan erityisesti sähköverkon joustavuuden, energiavarastoinnin sekä vaihtelevan uusiutuvan energiantuotannon integroinnissa energiajärjestelmään. Edellytyksenä kokonaisvaltaiselle energiasuunnittelulle on ympäristölukutaito, kestävän kaivostoiminnan tunteminen, elinkaari vaikutusten ymmärtäminen sekä luonnon monimuotoisuuteen liittyvä osaaminen. Teollisuuden keskeiset sidosryhmät korostavat, että koulutuksen ja osaamisen tulee kehittää sekä teknisiä valmiuksia että laajempaa ymmärrystä kestävydestä, ekologisista vaikutuksista ja sosiaalisista kysymyksistä. Näin voidaan kouluttaa työvoimaa, joka kykenee suunnittelemaan kestäviä, resiliентtejä ja yhteiskunnallisesti vastuullisia

energiajärjestelmiä planeetan rajoissa. (Paulomäki & Järvinen, 2025.) Insinööriliitto TEKin tilaamassa selvityksessä (TEK, 2022) saatiin samansuuntaisia tuloksia, joiden mukaan vihreä siirtymä lisää tarvetta tiimityö- ja vuorovaikutustaidoille sekä mukautuvalle ja jatkuvalla oppimiselle. Insinöörikoulutuksen matemaattistekninen ydinosaamisen säilyy ja toimii pohjana kaikelle muulle.

6.2. Energialukutaito, digitaalinen oppiminen ja uusi kestävä liiketoiminta

Teknologisen kehityksen lisäksi koulutus on lisännyt merkitystään energiamurroksessa viime aikoina, mikä avaa uusia mahdollisuuksia

sia uudistaa energiajärjestelmiä (Sovacool, 2019; Michel, 2020). Yksi energiakoulutuksen tärkeistä tavoitteista on vahvistaa insinöörikoulutuksessa energialukutaitoa (*energy literacy*). Energialukutaito tarkoittaa kykyä hahmottaa, miten energia toimii luonnontieteellisestä näkökulmasta sekä osana yhteiskunnallisia rakenteita ja prosesseja. McCaffrey (2015) määrittelee energialukutaitoisen henkilön sellaiseksi, joka pystyy

- a. tunnistamaan erilaisten energiajärjestelmien keskeiset toimintaperiaatteet (kuten fossiiliset polttoaineet, ydinvoima, vesivoima, aurinkoenergia, biomassa ja geoterminen energia)
- b. selittämään eri energiamuotojen alkuperän sekä niiden tuotanto ja kuljetusprosessit
- c. arvioimaan energialähteiden ja niiden käytön sosiaalisia ja ympäristövaikutuksia
- d. tunnistamaan luotettavan energiaan liittyvän tiedon
- e. jäsentämään ja tulkitsemaan energian roolia yhteiskunnassa.

Vuosien 2010–2024 aikana kiinnitettiin huomiota maailmanlaajuisesti kasvavaan osamispulaan ammattilaisista, jotka kykenevät edistämään uusiutuvien energiajärjestelmien käyttöönottoa. Tämän ennustetaan kasvavan entisestään tulevina vuosina (Ram ym., 2022). Tällä hetkellä näyttää siltä, että muutokset korkeakoulukentällä eivät ole riittäviä nopean globaalin uusiutuvan energian kasvun kanssa. Monissa yliopisto-opinnoissa painottuvat edelleen kivihiili ja öljypohjaiset energiajärjestelmät, joten yliopistot eivät kouluta riittävää määrää puhtaan energian asiantuntijoita. Tämä on tilanne monissa kehittyvissä maissa, joissa koulutuksen uudistamisviive voi hidastaa energiamurrosta merkittävästi (Vakulchuk & Overland, 2024). Maiden, jotka pyrkivät vauhdittamaan energiamurrosta, tulisi siksi keskittää investointeja korkeakoulutukseen sen sijaan, että panostetaan taloudellisesti ainoastaan teollisuuden edistämiseen (Gui & MacGill, 2018).

Energiateknologioihin keskittyvä koulutustarjonta on kasvussa monissa maissa. Viimeisimmän kymmenen vuoden aikana suomalainen koulutuksen ennakointi on korostanut uusiutuvien energialähteiden, energiavarastoinnin, hajautetun tuotannon ja älykkäiden energiajärjestelmien merkitystä (Leveälahti ym., 2019). Globaalisti tarkasteltuna viimeaikainen painopiste on ollut etenkin aurinkosähköteknologioissa. Näiden koulutusohjelmien tavoitteena on lisätä tietoisuutta uusiutuvan energian hyödyistä ja ympäristönsuojelun merkityksestä (Senthil, 2022). Uudet oppimisympäristöt, kuten virtuaaliset laboratoriot, ovat lisänneet opiskelijoiden keskuudessa uusiutuvaan energiaan liittyvää innostusta, ymmärrystä ja käytännön osaamista. Digitaaliset oppimisympäristöt tarjoavat vuorovaikutteisia ja helposti saatavutettavia alustoja, joilla opiskelijat tutkivat kokeellisen oppimisen avulla uusiutuvia energiajärjestelmiä ja mikroverkkoja (Guo ym., 2022).

Yliopistojen, kansalaisyhteiskunnan ja yritysten välistä yhteistyötä tulee vahvistaa, jotta suuren mittakaavan uusiutuvan energian ratkaisujen käyttöönotossa syntyy vuorovaikutusta paikallisyhteisöjen kanssa ja jotta voidaan kehittää kestävää liiketoimintaa, joka tukee ilmastonmuutoksen hillintää. Tämä yhteistyö edistää myös uusien yritysten syntymistä uusiutuvan energian sektoreilla sekä kannustaa teollisuutta kehittämään tehokkaampia energianhallintakäytäntöjä (HerasSaizarbitoria ym., 2018; GarridoYserte & GalloRivera, 2020). Uusien yritysten ja tuotantoprosessien kehittämisen ohella koulutus mahdollistaa energiayhteisöjen leviämisen, sekä sähköverkon ulkopuolisten ratkaisujen (offgrid) sekä uusien organisaatio- ja liiketoimintamallien kehittämisen, jotka vahvistavat kansalaisten toimijuutta ja luovat edellytyksiä energiaalan uusille sosiaalisille ja teknologisille innovaatioille (Gibellato ym., 2023).



6.3. Kestävyyden ja monimuotoisuuden edistäminen korkeakouluissa Suomessa

Suomessa Opetushallituksen virallisissa opetussuunnitelma ja koulutuslinjauksissa korostetaan opetuksessa vastuuta ympäristöstä, hyvinvoinnista ja kestävästä tulevaisuudesta (OPH, 2023). Energiamurroksen hallinnassa tulee ymmärtää kestävyysperiaatteet ja toimia niiden mukaisesti erityisesti ilmastokriisin, energiankäytön ja talouskasvun välisten kytkösten vuoksi (Leveälahti ym., 2019).

Korkeakoulujen tehtävänä on kouluttaa tulevaisuuden asiantuntijoita, jotka pystyvät arvioimaan kriittisesti energiamurroksen toivottavaa suuntaa ja hallitsemaan sen monimutkaisia prosesseja, sen sijaan, että keskittyttäisiin ainoastaan uusien teknologioiden omaksumiseen (Leveälahti ym., 2019; OPH, 2023). Koulutusta tulisi kehittää poikkitieteellisesti ja alojen välisesti siten, että se tarjoaa laajaalaisen ymmärryksen kestävästä sekä osaamisista, joita eri toimialoilla tarvitaan (OPH, 2023). Kokonaisuutena nämä linjaukset viittaavat siihen, että täyttääkseen energiaalan muuttuvat tarpeet opetusohjelmiin tarvitaan sekä uutta sisältöä että uusia tapoja jäsentää ja integroida oppimista eri tieteenaloihin.

Tällä hetkellä kestävyysopetuksen yleistymistä insinöörikoulutuksessa hidastaa se, että koulutuksesta puuttuvat selkeä ja systemaattinen ohjaus sekä yhteiset edistymisen seuranta ja raportointimenetelmät (Routaharju, 2025). Insinöörikoulutuksen kehittäminen vaatii tällaista ohjausta ja menetelmiä, jotta tulevaisuuden asiantuntijat saavat parhaat mahdolliset valmiudet toimia energiamurroksen edistäjinä. Naukkarisen ja Jouhkimon (2021) tutkimuksen mukaan nuorempien ikäluokkien koulutuksessa tarvitaan opetusmalleja, jotka yhdistävät tieteen, teknologian, insinöörیتieteiden, taiteen ja

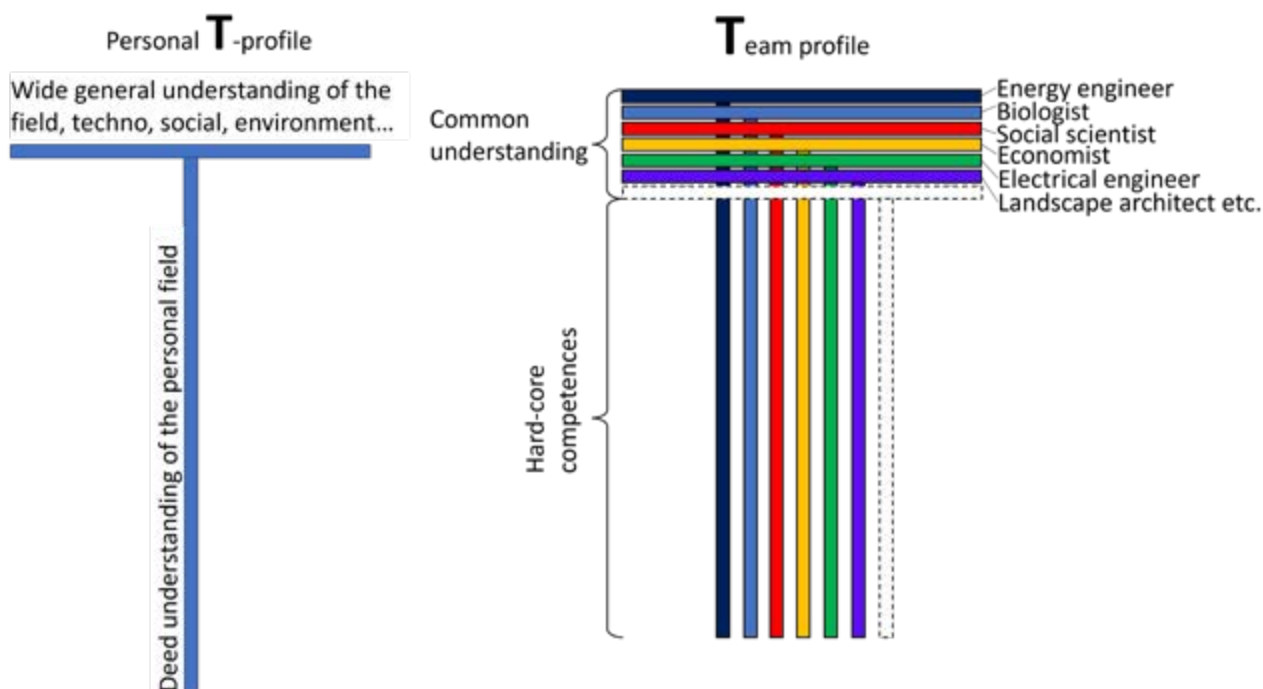
matematiikan (STEAM) osaalueita, jotta kokonaisvaltainen kestävyysymmärrys kasvaa. Tällöin kestävyteen liittyviä eri asioita voidaan käsitellä samanaikaisesti (Naukkarinen & Jouhkimo, 2021).

Näitä malleja kehitettäessä on kiinnitettävä erityistä huomiota kaikkien oppilasryhmien tavoittamiseen. Esimerkiksi sukupuoli ja koulutussuuntautuneisuus vaikuttavat oppilaiden kestävyttä koskeviin käsityksiin ja asenteisiin. Tämä näkyy esimerkiksi siinä, että kestävyysopetus vetoaa erityisesti akateemisesti suuntautuneisiin tyttöihin, kun taas niiden vaikutus ammatillisesti suuntautuneisiin poikiin jää vähäiseksi. (Naukkarinen & Jouhkimo, 2021.)

6.4. Monialainen osaaminen, asiantuntijatiimit ja nykykoulutuksen haasteet

Energiamurros ja sen mukanaan tuomat laajemmat yhteiskunnalliset muutokset muokkaavat osaamistarpeita. Vahvan teknisen asiantuntemuksen lisäksi tarvitaan yhä enemmän laajaalaisia eiteknisiä taitoja, kuten viestintä ja yhteistyötaitoja. Tämä korostaa monialaisten asiantuntijatiimien merkitystä, ja niissä insinöörit työskentelevät yhdessä esimerkiksi taloustieteilijöiden, biologien ja yhteiskuntatieteilijöiden kanssa kehittääkseen kokonaisuutena kestäviä ja toimivia energiaratkaisuja.

Jokaiselta tiimin jäseneltä edellytetään niin sanottua Tprofiilia (ks. kuva 6.2), joka tarkoittaa syvällistä osaamista omalta erikoisalalta yhdistettynä laajaalaiseen ymmärrykseen energiajärjestelmäkokonaisuudesta. Tällainen yhdistelmä mahdollistaa kollektiivisen osaamisen, jonka avulla voidaan vastata monimutkaisiin teknisiin, ympäristöä koskeviin ja yhteiskunnallisiin haasteisiin. (Paulomäki & Järvinen, 2025.)



Kuva 6.2 Yksittäisen tiiminjäsenen osaamisprofiili sekä uusiutuvan energian "unelmatiimin" (dream team) osaamisprofiili (Paulomäki & Järvinen, 2025)

Siirtymä kestäviin energiajärjestelmiin edellyttää korkean osaamistason työvoimaa. Globaalilla tasolla noin 36 prosenttia energiaalan työpaikoista luokitellaan korkean osaamistason tehtäviksi, jotka edellyttävät tyypillisesti korkeakoulututkintoa, kuten kandidaatin tutkintoa tai sitä korkeampaa koulutusta. Lisäksi noin 51 prosenttia työpaikoista kuuluu keskitason osaamislukkaan eli ammatillisen tai teknisen koulutustason osaamiseen. Monet tärkeistä osaamisvajeista, kuten sähköasentajien ja hitsaajien puute, sijoittuvat juuri tähän ryhmään. Vain noin 13 prosenttia energiaalan työvoimasta luokitellaan matalan osaamistason tehtäviin, jotka koostuvat pääosin toisteisista manuaalisista työtehtävistä. (IEA, 2025d.)

Energia-ala on säilyttänyt vetovoimansa sekä nuorten että aikuisten keskuudessa ja houkuttelee opiskelujen pariin erityisesti henkilöitä, jotka haluavat päivittää osaamistaan (Vipunen, 2026). Suomen Opetushallituksen (OPH, 2023) arvioiden mukaan energiaalalla korkeasti koulutettujen määrä tulee kuitenkin lähitulevaisuudessa jäämään hieman

alle tarvittavan määrän. Suomen kokonais-tavoitteena on, että 50 prosenttia ikäluokasta siirtyisi korkeakoulutukseen, mutta tämän tavoitteen saavuttamisessa ei ole viime vuosina edistytty. Tällä hetkellä 25–34-vuotiaista suomalaisista 39 prosenttia on suorittanut korkeakoulututkinnon, mikä jää selvästi OECDmaiden keskiarvon (48 %) alapuolelle. (OPH, 2023.)

Vaikka suuri osa globaalista energiaalan koulutuksesta keskittyy edelleen fossiilisiin toimialoihin, puhtaan energian sektorit hyödyntävät jo nyt merkittävästi fossiilisten alojen työvoimaa (IEA, 2025d). Suomessa mahdollisuudet siirtää työvoimaa muilta toimialoilta energiaalalle ovat kuitenkin vähäiset, joten nuoria tulee kouluttaa suoraan alalle. Räättälöityjä koulutussisältöjä voidaan kehittää esimerkiksi luomalla energiaalan yritysten ja oppilaitosten välisiä kumppanuuksia, jotta koulutus vastaisi paremmin alan osaamistarpeita. Julkisen ja yksityisen sektorin yhteistyö on välttämätöntä, jotta koulutus voidaan sovittaa yhteen nopeasti muuttuvien osaamisvaatimusten kanssa. (IEA, 2025d.)

7. ENERGIATEKNOLOGIAT

7.1 Energialähteet

Tässä luvussa tarkastellaan keskeisiä primäärienergian lähteitä ja energiateknologioita eli bioenergiaa, ydinenergiaa, tuuli- ja aurinkoenergiaa, lämpöpumpputeknologioita sekä biopohjaisten ja synteettisten polttoaineiden kehitystä, energiatehokkuutta ja lisääntyvää sähköistymistä. Luvuissa käydään läpi eri energialähteiden merkitystä energijärjestelmässä, teknologian kehitystä ja tulevaisuuden potentiaalia globaalisti ja Suomessa. Luku päivittää aiempien selonteiden kuvauksia energiateknologioista.

7.1.1 Bioenergia

Kirjoittajat: Tapio Ranta, Svetlana Proskurina, Katja Kuparinen, Falah Alobaid ja Esa Vakkilainen

Suomi on Euroopan viidenneksi suurin bioenergian kuluttaja, ja bioenergian osuus maan energijärjestelmässä on erittäin korkea. Vuonna 2022 bioenergia kattoi 76 prosenttia Suomen uusiutuvan energian tuotannosta ja 32 prosenttia loppuenergiankulutuksesta (Bioenergia ry, 2026). Harva asutus ja laajat metsävarat asukasta kohden tekevät kiinteän biomassan hyödyntämisestä Suomelle merkittävän kotimaisen energialähteen. Noin 90 prosenttia Suomen bioenergiasta perustuu kiinteään biomassaansa, pääosin metsäteollisuuden sivutuotteisiin.

Energian kokonaistarjonta maailmassa vuonna 2023 oli 622 EJ, josta fossiilisten polttoaineiden osuus oli yli 80 prosenttia. Uusiutuvan energian tuotanto kasvoi 92 EJ:een, josta bioenergian osuus oli 56 EJ eli noin yhdeksän prosenttia kokonaistarjonnasta. Bioenergia perustuu pääosin kiinteään biomassaansa, jolla tuotetaan sähköä, lämpöä ja liikennepolttoaineita. Vuonna 2023 bioenergialla tuotettiin 697 TWh sähköä maailmanlaajuisesti, ja sen osuus uusiutuvan lämmön

tuotannosta oli noin 73 prosenttia. Nestemäisten biopolttoaineiden kulutus oli 4,73 EJ, ja käytetyimmät polttoaineet olivat etanoli ja biodiesel. Bioenergiaan perustuva asennettu kapasiteetti vuonna 2024 oli yhteensä 151 GW, ja kasvua edistivät erityisesti Aasia ja Eurooppa. (Global Bioenergy Statistics Report, 2025.)

Metsäteollisuuden sivutuotteita ja paikallisia sivuvirtoja hyödyntävä sähkön ja lämmön yhteistuotanto (CHP) säilytti vahvan aseman erityisesti Pohjoismaissa ja Baltiassa, Keski- ja Itä-Euroopassa sekä Pohjois-Amerikassa ja Aasiassa. Näillä alueilla on merkittävää sellu-, paperi- tai sahateollisuutta ja siten hyödynnettäviä sivuvirtoja. Bioenergiasektorin tehokkuuden, päästöjen hallinnan ja kaukolämpö- ja aluelämpöverkkojen integroinnin arvioidaan kehittyvän lähivuosina. Tuontibiomassaa paljon käyttävät suuret lauhdesähkölaitokset vähentyvät, ellei niitä varusteta hiilidioksidin talteenotolla ja varastointiteknologioilla (CCS) tai hiilidioksidin hyödyntämisratkaisuilla (CCU).

CCS ja CCUteknologiat on kehitetty vähentämään teollisten prosessien ja sähköntuotannon hiilidioksidipäästöjä. CCS-ratkaisuissa hiilidioksidi otetaan talteen ja kuljetetaan turvallisiin geologisiin varastoihin, jolloin sen vapautuminen ilmakehään estyy. CCU:ssa hiilidioksidi otetaan talteen ja muunnetaan hyödyllisiksi tuotteiksi, kuten polttoaineiksi, kemikaaleiksi tai rakennusmateriaaleiksi. Viimeisimmän viiden vuoden aikana CCS ja CCUteknologiat ovat edistyneet asteittain. Useita suuria CCS-hankkeita on otettu käyttöön Pohjois-Amerikassa, Euroopassa ja Lähiidässä, mikä on parantanut talteenoton tehokkuutta ja alentanut kustannuksia. CCU-ratkaisut ovat kehittyneet erityisesti pilotti ja demonstraatiovaiheissa varsinkin synteettisten polttoaineiden ja kemikaalien tuotannossa, mutta niiden laajamittainen

käyttöönotto on toistaiseksi jäänyt CCS:ää vähäisemmäksi taloudellisten ja laajentumiseen liittyvien haasteiden takia. (IEA, 2026b.)

Bioenergian yhdistäminen hiilidioksidin talteenottoon ja varastointiin (BECCS) on teknologia, jonka avulla voidaan saavuttaa negatiiviset päästöt. BECCS-ratkaisussa biomassapohjaisessa sähkön- ja lämmöntuotannossa tai teollisissa prosesseissa syntyvä hiilidioksidi otetaan talteen ja varastoidaan geologisiin muodostumiin, jolloin se ei vapaudu ilmakehään. Koska biomassassa sitoo hiilidioksidia kasvaessaan ja energiantuotannossa syntyvä hiilidioksidi otetaan talteen ja varastoidaan, BECCS voi johtaa negatiivisiin päästöihin. Tämän vuoksi teknologia voi olla merkittävä tekijä ilmastonmuutoksen hillinnässä. Tällä hetkellä BECCS on kuitenkin pääosin pilotti ja demonstraatiovaiheessa, ja vain muutamia laitoksia on toiminnassa maailmanlaajuisesti. Biogeenisen hiilidioksidin yhdistäminen vihreään vetyyn epolttoaineiden tuotannossa herättää myös kasvavaa kiinnostusta erityisesti lentoliikenteen ja merenkulun sektoreilla. Tämä kehitys yhdistää bioenergian ja synteettisten polttoaineiden tuotantoa.

Lannan, jätevesilietteen, elintarvikejätteen sekä maatalous ja elintarviketeollisuuden sivuvirtojen mädätys muodostaa tällä hetkellä vielä suhteellisen pienen mutta nopeasti kasvavan bioenergian osaalueen. Kasvu on ollut erityisen voimakasta Euroopassa, Kiinassa, Intiassa ja Pohjois-Amerikassa. (IEA, 2025e.) Keskeinen kehityssuunta on biokaasun jalostaminen biometaaniksi, jota voidaan syöttää kaasuputkistoihin ja käyttää liikennepolttoaineena, powerogasratkaisuihin tai teollisuuden raakaaineena. Biokaasu ja biometaanit ovat erityisen lupaavia ratkaisuja maatalousvaltaisilla alueilla, sillä ne vähentävät metaanipäästöjä ja edistävät kiertotaloutta.

Edistyneet termokemialliset muuntoteknologiat, kuten kaasutus, pyrolyysi ja hydrotermien nesteytys (HTL), ovat edelleen pääosin demonstraatio tai varhaisen kaupallisen vaiheen teknologioita. Kaasutus ja nopea pyrolyysi ovat esimerkkejä korkeasta teknologiasta, ja useita kaupallisia laitoksia on jo

toiminnassa eri puolilla maailmaa. HTL puolestaan etenee pilottivaiheesta kohti varhaista kaupallista käyttöönottoa. (IEA Bioenergy, 2023.) Tällä hetkellä monet eurooppalaiset ja kansainväliset hankkeet edistävät näiden teknologioiden integrointia ja tuotteiden jatkojalostusta polttoaineiksi ja kemikaaleiksi, mikä edistää niiden asteittaista siirtymistä kokeellisista ratkaisuista teollisiin sovelluksiin.

Nestemäiset biopolttoaineet muodostavat noin 4–5 EJ maailmanlaajuisesta loppuenergiakulutuksesta eli noin 11 prosenttia bioenergian kokonaiskäytöstä. Niitä hyödynnetään pääasiassa tieliikenteessä Yhdysvalloissa, Brasiliassa ja EU:ssa. (IEA, 2025a.) Seuraavan 10–15 vuoden aikana perinteisten biopolttoaineiden odotetaan säilyvän merkittävinä polttoaineina autoliikenteessä erityisesti alueilla, joilla on paljon monipolttoaineita käyttäviä autoja (flexfuel) tai joissa on tiukat biopolttoaineiden sekoitevelvoitteet. Pitkällä aikavälillä bensiini ja dieselsekoitteiden kysynnän arvioidaan kuitenkin tasaantuvan tai laskevan. Edistyneet biopolttoaineet, kuten selluloosapohjainen etanoli, Fischer-Tropsch-polttoaineet, alcoholtjetratkaisut sekä jäteöljyihin perustuvat HEFAPolttoaineet, kasvavat voimakkaasti vuoteen 2050 saakka vahvan politiikkaohjauksen tukemana. Biopolttoaineiden painopisteen odotetaan siirtyvän vähitellen tieliikenteestä lentoliikenteeseen (Sustainable Aviation Fuel, SAF) ja merenkulkuun. SAFsekoitevelvoitteiden yleistyessä myös elintarviketalojen raaka-aineiden käyttö lisääntyy.

Bioenergia, erityisesti metsään perustuva biomassassa, säilyy keskeisenä osana Suomen lämmityssektoria fossiilisten polttoaineiden käytön vähentämisen aikana. Suomi jatkaa modernien bioenergiatilojen hankkeiden, kuten kaasutus- ja pyrolyysitekniikoiden sekä BECCS-ratkaisujen, kehittämistä saavuttaakseen vuoden 2035 hiilineutraaliustavoitteet.

7.1.2 Ydinenergia

Kirjoittajat: Heikki Suikkanen, Juhani Hyvärinen ja Roosa Talala

Ydinenergia on monipuolinen, ilmastoystävällinen ja resurssitehokas energialähde, jota voidaan hyödyntää useisiin tarkoituksiin ja eri kokoluokissa. Ydinreaktorit tuottavat lämpöä, jota voidaan käyttää sellaisenaan asuin- tai teollisuuslämmityksessä tai muuntaa sähköksi, liike-energiaksi tai energiankantajiksi, kuten vedyksi. Joitakin erikoistuneita reaktoreita käytetään myös radioisotooppien tuotantoon teollisiin ja lääketieteellisiin tarkoituksiin. Ydinreaktorin lämpöteho on noin 15–4 500 MW ja sähköteho 5–1 600 MWe. Ydinvoimalaitos voi sisältää useita reaktoreita. Maailmanlaajuisesti käytössä on yli 400 sähköntuotantoon tarkoitettua ydinreaktoria (IAEA, n.d.), ja ydinenergia kattaa noin yhdeksän prosenttia maailman sähköntuotannosta (IEA, 2025f).

Perinteisesti ydinreaktorit on suunniteltu perusvoimatuotantoon, joka suosii suurta yksikkökokoja taloudellisuuden parantamiseksi. Tämän kehityssuunnan huipentumana EU:ssa voidaan pitää 1 600 MWe:n EPR-reaktoria, jollainen on käytössä Olkiluodossa Suomessa, käyttöönotossa Flamanvillessä Ranskassa sekä rakenteilla kahden reaktorin voimin Hinkley Point C:ssä Isossa-Britanniassa. Kaikissa näissä hankkeissa on tapahtunut viivästyksiä ja kustannusten ylityksiä. Kustannustehokkaammaksi vaihtoehdoksi kehitetään pienydinreaktoreita (SMR), joiden etuina ovat sarjatuotanto ja nopea käyttöönotto.

Euroopassa on suunnitteilla useita merkittäviä ydinvoiman uudisrakennushankkeita, joissa tavoitteena on ottaa käyttöön sekä perinteisiä suuria reaktoreita että pienydinreaktoreita. Esimerkiksi Ranskaan on suunniteltu kuusi EPR2-reaktoria (World Nuclear News, 2026a), Puolaan kolme AP1000-reaktoria (World Nuclear News, 2026b) ja Tšekkiin kaksi APR1000-reaktoria (World Nuclear News, 2025a). Myös Ruotsi on ilmoittanut merkittävistä ydinvoiman uudisrakentamissuunnitelmista (World Nuclear News, 2026c). Näiden maiden lisäksi useat muut valtiot

suunnittelevat aktiivisesti pienydinreaktoreiden käyttöönottoa. Euroopassa myös kehitetään SMR-teknologiaa, esimerkkinä ranskalainen Nuward-pienreaktori (World Nuclear News, 2025b). Uudisrakennusohjelmille on yhteistä jonkinlainen valtion tukimekanismi.

Uuden ydinvoimakapasiteetin lisäksi kehitystä edistetään pidentämällä nykyisten laitosten käyttöikää. Käyttöiän jatkamista suunnitellaan noin 60 prosentille EU:ssa sijaitsevista reaktoreista. Erityisesti Yhdysvalloissa ydinvoimakapasiteetin merkittävä kasvattamisperuste on datakeskusten määrän lisääntyminen, sillä keskuksat tarvitsevat suuria määriä vakaata ja luotettavaa sähköä. Tämä on johtanut jopa suljettujen ydinvoimalaitosten uudelleenkäynnistämiseen (World Nuclear News, 2024) sekä käytössä olevien laitosten merkittäviin käyttöiän pidennyksiin.

Vuonna 2025 ydinvoiman osuus Suomen sähköntuotannosta oli noin 40 prosenttia (Energiateollisuus, n.d.), mikä tekee siitä maan merkittävimmän yksittäisen sähköntuotantomuodon. Ydinvoima tuottaa pääosin vakaata perusvoimaa, mutta nykyisin, kun järjestelmässä on merkittävä määrä vaihtelevaa tuotantoa, myös ydinvoiman tuotantoa säädetään tarvittaessa. Vaikka nykyinen poliittinen ilmapiiri ja yleinen mielipide suhtautuvat ydinvoimaan myönteisesti (Energiateollisuus, 2025b), uuden ydinvoimakapasiteetin rakentamista ilman tukimekanismeja pidetään haastavana, kuten Fortumin tuore selvitys tuo esille (Fortum, 2025). Sama näkemys esitetään myös työ- ja elinkeinoministeriön tilaamassa tutkimuksessa, jossa nykyisten reaktoreiden käyttöiän pidennyksiä ja tehonkorotuksia pidetään kannattavimpana vaihtoehtona. Seuraavaksi parhaana ratkaisuna nähdään pienydinreaktorit joko pelkässä lämmöntuotannossa tai sähkön ja lämmön yhteistuotannossa. (Valtioneuvosto, 2026a.) Kuten muissakin ikääntyvän ydinvoimakan-
nan maissa, myös Suomessa edistetään käyttöiän pidennyksiä. Loviisan ydinvoimalaitokselle on jo myönnetty jatkolupa vuoteen 2050 asti (Fortum, n.d.), ja Olkiluoto 1- ja 2-laitosten käyttöiän jatkamista vuoteen 2058 saakka harkitaan (Yle, 2025).



Suomessa kehitetään myös uutta ydinteknologiaa. Steady Energy -yritys kehittää kaukolämpöverkkojen tarpeisiin suunniteltua reaktoriteknologiaa, jossa yksikkökooko on 50 lämpömegawattia. Kehitystyö on edennyt ilman ydinpolttoainetta toimivan pilottilaitoksen rakentamiseen, ja sen tarkoituksena on varmentaa suunnitteluratkaisujen toiminta ja luoda toimitusketjuja (World Nuclear News, 2026d). Tulevaisuudessa uusia innovaatioita voi syntyä myös yhdistämällä ydinteknologian

kehitys Suomen vahvaan laivanrakennusosaamiseen. Suomalainen startup-yritys SEATOM on esittänyt, että merenkulun hiilidioksidipäästöjä voitaisiin vähentää ydinkäyttöisellä propulsioteknologialla (SEATOM Technologies, n.d.). Tällä hetkellä Suomessa päivitetään ydinenergialakia ja turvallisuusmääräyksiä, jotta ne vastaisivat viimeaikaisia teknologisia edistysaskeleita ja uusia käyttöskenaarioita. Uudistettu lainsäädäntö astuu voimaan vuoden 2027 alussa. (Valtioneuvosto, 2026b).

7.1.3 Tuulivoima

Kirjoittajat: Katja Hynynen, Petteri Laaksonen ja Olli Pyrhönen

Tuulivoimakapasiteetti on kasvanut voimakkaasti viimeisimmän kymmenen vuoden aikana, ja tuulivoima on noussut yhdeksi Suomen suurimmista sähköntuotantomuodoista. Vuonna 2025 Suomeen asennettiin 158 uutta tuulivoimalaa, joiden yhteenlaskettu teho oli 1 023 MW. Tämän seurauksena Suomen tuulivoimakapasiteetti nousi noin 9 433 MW:iin. Vuonna 2025 tuulivoiman vuosituotanto oli noin 22 TWh, mikä vastasi 26,1 prosenttia Suomen sähkönkulutuksesta.

Tuulivoiman nopea kasvu on ollut pitkälti teknologisen kehityksen ansiota. Tuulivoimalat ovat nykyään huomattavasti suurempia ja tehokkaampia kuin aiemmin. Suomeen asennettujen maatuulivoimaloiden nimellisteho on kasvanut tasaisesti, ja uusissa hankkeissa käytetään tyypillisesti 6–8 MW:n voimaloita. Myös roottorien halkaisijat ja tornikorkeudet ovat kasvaneet merkittävästi. Vuonna 2025 asennettujen voimaloiden keskimääräinen roottorihalkaisija oli lähes 170 metriä ja napakorkeus noin 160 metriä. Suuremmat roottorit ja korkeammat tornit mahdollistavat voimakkaampien ja tasaisempien tuulien hyödyntämisen metsäisilläkin alueilla, mikä parantaa kapasiteettikerrointa ja mahdollistaa taloudellisesti kannattavan tuulivoimatuotannon koko Suomessa.

Tuulivoiman kasvu lisää jouston tarvetta sähköjärjestelmässä sen sääriippuvuuden vuoksi. Sähköntuotannon ja kulutuksen tasapainon ylläpitäminen edellyttää riittävää tuotannon ja kulutuksen joustoa, reserviratkaisuja, siirtokapasiteettia sekä energianvarastointiratkaisuja.

Yksi keskeinen haaste liittyy tuulivoimatuotannon alueelliseen keskittymiseen. Suuri osa Suomen asennetusta tuulivoimakapasiteetista on keskittynyt Länsi ja PohjoisSuomeen, missä tuuliolosuhteet olivat edullisemmat ensimmäisen sukupolven kaupallisille tuulivoimaloille ja sähkönsiirtoyhteydet olivat helposti saatavilla.

Suomi on laaja maa, joten tuuliolosuhteiden ajallinen vaihtelu eri puolilla maata on huomattavaa. Tuulivoimapuistojen keskittyminen tietyille alueille johtaa tuotannon korreloituneisiin vaihteluihin. Maantieteellisesti tasapainoisempi tuulivoiman sijoittelu tasaisi valtakunnallista tuotantoa, parantaisi järjestelmän kokonaistoimivuutta ja vähentäisi sähkömarkkinoiden hintavaihtelua.

Nykyaikaiset tuulivoimalat ovat vähentäneet tuuliolosuhteisiin liittyviä alueellisia eroja, sillä ne yltyvät korkeammalle, missä tuuliolosuhteet ovat yleisesti hyvät koko maassa. Tämä on tehnyt tuulivoimatuotannosta taloudellisesti kannattavaa myös perinteisesti suotuisimpien alueiden ulkopuolella. Tuulivoiman rakentaminen ItäSuomessa on kuitenkin toistaiseksi ollut vähäistä sotilaalliseen tutkajärjestelmään liittyvien rajoitteiden vuoksi. Viime vuosina on selvitetty useita poliittisia ja teknisiä ratkaisuja tuulivoimainvestointien mahdollistamiseksi myös maan itäosissa.

Tulevaisuudessa tuulivoimalla odotetaan olevan myös keskeinen osa uusien energiankantajien tuotannossa. Suomessa on parhaillaan suunnitteilla useita suuria hankkeita, joissa tuulivoimatuotanto yhdistetään vedyn tuotantoon elektrolyysin avulla. Tällaiset Power-to-X-ratkaisut voivat lisätä sähköjärjestelmän joustavuutta, kun osa tuotannosta muunnetaan vedyksi tai muiksi synteettisiksi polttoaineiksi. Tämä parantaa uusiutuvan sähkön hyödyntämistä myös sellaisilla sektoreilla, joita on vaikea sähköistää suoraan.

Toinen nouseva kehityssuunta on tuulivoiman entistä tiiviimpi integrointi muihin uusiutuviin energialähteisiin. Hybridiratkaisut, joissa tuulivoimaa yhdistetään aurinkosähköön tai vedyn tuotantoon, voivat tehostaa verkkoliitäntöjen käyttöä ja tasata uusiutuvien energialaitosten kokonaistuotantoa. Tämä kehitys tukee tuulivoiman siirtymistä yksittäisestä sähköntuotantoteknologiasta osaksi laajemmin integroitua ja joustavaa energiajärjestelmää.

7.1.4 Aurinkovoima

Kirjoittajat: Altti Meriläinen,
Leo Gardemeister ja Antti Kosonen

Aurinkosähkön maailmanlaajuinen kumulatiivinen asennettu kapasiteetti saavutti ensimmäistä kertaa yhden terawattiin (TWp) rajan maaliskuussa 2022. Vuoden 2024 loppuun mennessä kapasiteetti oli kasvanut jo noin 2,2 TWp:iin. Aurinkosähkökapasiteetin nopea kasvu vaikuttaa merkittävästi aurinkosähköjärjestelmien hintatasoon. Pitkän aikavälin oppimiskäyrän perusteella järjestelmien hinta on laskenut keskimäärin aina noin 20 prosenttia, kun asennettu kapasiteetti on kaksinkertaistunut 1970luvulta lähtien. 2000-luvun lopulta lähtien hintojen laskuvauhti on kiihtynyt jopa noin 40 prosenttia kapasiteetin kaksinkertaistuessa, mikä kuvastaa puolijohdeteollisuudelle tyypillistä kehitystä. (ITRPV, 2024.)

Aurinkosähkömoduulien kehitys on ollut huomattavaa moduulitehokkuuden nopean kasvun ansiosta. Vuonna 2015 tyypillinen aurinkopaneeli tuotti noin 250 wattipiikkiä (Wp), vuonna 2022 noin 360 Wp ja vuonna 2026 noin 450 Wp samalla pinta-alalla. Aurinkosähkömoduulien kehitystä voidaan seurata esimerkiksi Clean Energy Review-verkkosivustolta. Kehitystä tapahtuu myös aurinkoinverttereissä, joissa hyödynnetään yhä enemmän piikarbidipohjaista (SiC) tehoelektronikkaa. Tehotiheyden kasvun ansiosta noin 400 kW:n aurinkoinvertterissä voidaan jo saavuttaa noin 0,25 kg/kW:n painotehosuhde, mikä on noin sadasosa kolmen vuosikymmenen takaisesta (PV Magazine, 2023).

Suomen sähköverkkoon liitetty aurinkosähkökapasiteetti kasvoi vuodesta 2019 lähtien aluksi noin 100 MW vuodessa, mutta kasvu kiihtyi selvästi vuonna 2022. Energiaviraston (2025) mukaan aurinkosähkön tuotantokapasiteetti Suomessa oli vuoden 2024 lopussa noin 1 247 MWp, mikä merkitsee yli 240 MW:n eli 24 prosentin lisäystä vuoteen 2023 verrattuna. Vuoden 2025 lopussa asennettu kapasiteetti oli jo 1 512 MW (Fingrid, n.d.). Aurinkosähkön osuus Suomen sähköntuotannosta on noussut noin 1,4 prosenttiin, ja osuuden



ennustetaan kasvavan edelleen. Fingrid (2023) arvioi, että Suomen aurinkosähkökapasiteetti voi nousta jopa 7 GWp:iin vuoteen 2030 mennessä.

Suomessa aurinkosähkön tuotanto on kuitenkin edelleen vähäistä verrattuna Euroopan johtaviin aurinkosähkömaihin. Esimerkiksi Alankomaissa aurinkosähkökapasiteetti asukasta kohden oli vuoden 2022 lopussa noin yhdeksänkertainen Suomeen verrattuna (IEA, 2022a). Vaikka kotimainen aurinkosähkökapasiteetti on vielä vähäistä, Euroopan laajamittainen aurinkosähkön tuotanto on vaikuttanut myös Suomen sähkömarkkinoihin. Tämä on näkynyt erityisesti edullisena iltapäiväsähköinä.

Toisin kuin aiempina vuosina, sähkön hinta on Suomessa ollut useaan otteeseen negatiivinen iltpäivisin pois lukien poikkeuksellinen tarjousvirhe perjantaina 24. marraskuuta 2023, jolloin sähkön hinta laski alle -500 e/MWh kymmenen tunnin ajaksi. Suomen ennätysalhainen tuntihinta saavutettiin sunnuntaina 16. heinäkuuta 2023 kello 15–16, jolloin veroton tukkusähkön hinta laski alle -60 e/MWh (-6 snt/kWh). Alankomaissa on nähty jopa -400 e/MWh:n sähkön hintoja (PZEM, 2023).

Suomessa on nyt suunnitteilla monia yksittäisiä aurinkovoimapuistoja, joiden kapasiteetti on useita satoja megawatteja. Teollisen mittakaavan aurinkovoimalat sijoitetaan kustannussyistä siirtoverkon läheisyyteen. Maahan asennettavat järjestelmät tarvitsevat riittävän laajoja maa-alueita, joille on taloudellisesti kannattavaa rakentaa.

Yksiakselliset seurantajärjestelmät yleistyvät suurissa aurinkovoimalahankkeissa. Ne seuraavat auringon liikettä jatkuvasti, jolloin tuotantoa voi siirtää enemmän aamu- ja iltatunneille.

Tällöin sähkön markkinahinta on yleensä korkeampi. Fasihin (2025) mukaan yksiaksellinen seuranta voi kasvattaa tuotantoa noin 20–30 prosentilla. Investointikustannukset ovat noin kymmenen prosenttia suuremmat kuin perinteisessä kiinteäkulmaisessa järjestelmässä. Tuotantoa voidaan kasvattaa edelleen kaksipuolisten aurinkosähkömoduulien avulla, joiden markkinaosuus ylitti 90 prosenttia vuonna 2025 (Keiner ym., 2025).

Maa-alueiden vuokraaminen aurinkovoimakäyttöön voi tuoda kunnille ja maanomistajille merkittäviä vuokratuloja, mutta teollisen mittakaavan voimalahankkeet herättävät myös keskustelua lähialueiden asukkaiden keskuudessa. Teollisten aurinkovoimaloiden kannattavuus riippuu suoraan sähkön markkinahinnasta, kun taas rakennuksiin integroitujen järjestelmien taloudellinen kannattavuus kytkeytyy sähkön kokonaishintaan. Vuonna 2023 korkojen nousu, inflaatio ja sähkön hinnan lasku heikensivät monien yksityishenkilöiden halukkuutta investoida aurinkosähköjärjestelmiin.

Integroitujen aurinkosähköjärjestelmien yleistymisen on nostanut esiin kysymyksiä asennusten turvallisuudesta ja määräystenmukaisuudesta. Kysynnän nopea kasvu on johtanut pulaan osaavista asentajista. Turvallisuus ja kemikaaliviraston (2023) mukaan merkittävässä osassa aurinkosähköasennuksia havaittiin puutteita tai selkeitä virheitä. Toinen merkittävä asia on järjestelmien paloturvallisuus, jota varten Suomen pelastuslaitosten verkosto on laatinut erilliset ohjeet (Pelastuslaitokset, 2023). Lisäksi aurinkosähköjärjestelmiä suunniteltaessa ja toteutettaessa on huomioitava vakuutusyhtiöiden mahdolliset ohjeistukset ja vaatimukset.



7.1.5 Lämpöpumput (ja geoterminen energia)

Kirjoittajat: Antti Uusitalo ja Teemu Turunen-Saaresti

Lämpöpumppujen avulla lämpöä voidaan tuottaa sähköisesti, fossiilisten polttoaineiden käyttöä vähentää ja päästöjen määrää pienentää. Kansainvälisen energiajärjestön (IEA) arvion mukaan lämpöpumput voisivat vähentää hiilidioksidipäästöjä maailmanlaajuisesti vähintään 500 miljoonaa tonnia vuoteen 2030 mennessä. (IEA, 2022b.) Yksi lämpöpumputeknologian merkittävimmistä eduista on sen kyky hyödyntää erilaisia matalalämpöisiä lämmönlähteitä, joita on teknisesti vaikea tai taloudellisesti kannattamatonta hyödyntää muilla teknologioilla. Näitä potentiaalisia lämmönlähteitä ovat muun muassa maaperän lämpö, ulkoilman lämpö sekä erilaiset matalaarvoiset hukkalämpövirrat. Lämpöpumppujen käyttö parantaa siten paikallisten energialähteiden hyödyntämistä sekä lisää omavaraisuutta ja energianhuoltovarmuutta vähentämällä tuontienergian tarvetta. Lisäksi lämpöpumppujen merkittävä etu on niiden soveltuvuus sekä lämmitykseen että jäähdytykseen.

Lämpöpumppuja käytetään jo laajasti rakennusten lämmityksessä. Vuonna 2021 lämpöpumput tuottivat maailmanlaajuisesti noin kymmenen prosenttia rakennusten lämmitysenergiasta, ja niiden määrä kasvaa edelleen voimakkaasti, kun niillä korvataan muita lämmitysmuotoja ja energialähteitä. (IEA, 2022b.) Pohjoismaissa lämpöpumppuja käytetään selvästi enemmän verrattuna globaaliin keskitasoon, ja alueella on maailman suurin lämpöpumppujen asennusmäärä kotitaloutta kohden (EHPA, 2025). Norjassa noin 60 prosenttia rakennuksista on varustettu lämpöpumpulla, kun taas Suomessa ja Ruotsissa vastaava osuus ylittää 40 prosentin. Euroopassa lämpöpumppumarkkinat kasvoivat voimakkaasti yli vuosikymmenen ajan ja saavuttivat myyntiennätyksen vuonna 2022, jonka jälkeen myynti on viime aikoina hieman laskenut huippuvuodesta. Vuonna 2024 Euroopassa myytiin 2,3 miljoonaa lämpöpumppua, ja markkinatiedot kattavat 16 EUMAata sekä Norjan, Sveitsin ja Ison Britannian (EHPA, 2025). Suomessa vuonna 2025 asennettiin noin 112 000 uutta lämpöpumppua, jotka olivat pääosin ilmailma, ilmavesi ja maalämpöpumppuja. Määrä kasvoi noin kymmenen prosenttia vuoteen 2024 verrattuna (SULPU, 2026).



Sekä pien että suuritehoisia lämpöpumpputeknologioita on kehitetty jatkuvasti. Kehityksen myötä laitteissa käytetään ympäristöystävällisempiä kylmäaineita ja järjestelmien ja komponenttien suorituskyky on parantunut. Lisäksi kehittyneiden ohjausratkaisujen avulla saadaan energiansäästöjä. Sähkön hintojen suurissa vaihteluissa lämpöpumpuja voidaan hyödyntää sähkön kysyntäjouston välineinä. Tällä hetkellä lämpöpumppu ja kylmälaitteistosektorilla on käynnissä merkittävä siirtymä kohti luonnollisten kylmäaineiden, kuten hiilidioksidin, ammoniakkin ja erilaisten hiilivetyjen, käyttöä. Siirtymää tukevat uudet rajoitukset ja lainsäädäntö synteettisten kylmäaineiden käytölle. Päivitetty EU:n Fkaasuasetus tuli voimaan vuonna 2024, ja se rajoittaa sekä poistaa vaihteittain käytöstä fluorattuja kylmäaineita, joilla on suuri ilmastolämmityspotentiaali. Lisäksi EU:ssa on käynnissä lainsäädäntöprosessi, jonka tavoitteena on rajoittaa laajaa joukkoa PFASyhdisteiksi luokiteltuja fluorattuja aineita tai sellaisia aineita, joiden hajoamistuotteet muodostavat PFASyhdisteitä mukaan lukien useat yleisesti käytetyt synteettiset kylmäaineet.

Kiinnostus lämpöpumppujen hyödyntämiseen on kasvanut myös teollisissa prosesseissa ja muissa suurissa järjestelmissä, kuten kaukolämpöverkoissa. Vuonna 2016 tehdyn arvion mukaan lämpöpumput voisivat kattaa taloudellisesti kannattavasti 75 TWh EU:n teollisesta lämmöntuotannosta, kun taas tekninen potentiaali on huomattavasti suurempi, noin 480 TWh (Wolf & Blesl, 2016). Lämpö-

pumpputeknologia on kehittynyt jatkuvasti, ja nykyinen potentiaali on todennäköisesti tätä arviota suurempi. Pohjoismaissa on jo useita esimerkkejä suurten lämpöpumppujen käytöstä kaukolämpöjärjestelmissä. Näissä ratkaisuissa hyödynnetään matalalämpöisiä lämmönlähteitä, kuten jätevesien lämpöä tai datakeskusten ja teollisten prosessien hukkalämpöä, ja lämpötila nostetaan lämpöpumpuilla kaukolämpöverkkojen vaatimaan tasoon (80–100 °C).

Esimerkkinä voidaan mainita Helsingin Katri Valan lämpöpumppulaitos, joka tuottaa 160 MW lämpöä ja 100 MW jäähdytystä kaukolämpö ja jäähdytysverkkoihin. Toinen esimerkki on Tanskan Esbjergissä sijaitseva lämpöpumppulaitos, jonka lämmöntuotantokapasiteetti on 50 MW ja jossa kylmäaineena käytetään hiilidioksidia. (MAN Energy Solutions, n.d.) Tällä hetkellä yksi keskeisistä suurten lämpöpumppujärjestelmien teknisistä kehityssuunnista on suurempien lämpötilanousujen ja korkeampien menolämpötilojen saavuttaminen. Nykyaikaiset kaupalliset korkean lämpötilan lämpöpumput pystyvät jo tuottamaan 120–150 °C:n lämpötiloja, mikä mahdollistaa paitsi kuuman veden myös matalapainehöyryn tuottamisen teollisiin prosesseihin. (Wolf & Blesl, 2016.) Korkean lämpötilan lämpöpumput yhdistettynä mekaaniseen höyryn puristukseen (MVR) mahdollistavat prosessihöyryn tuottamisen entistä korkeammissa lämpötiloissa ja voivat korvata fossiilisia polttoaineita käyttävät kattilat monissa teollisissa prosesseissa (Klute ym., 2024).

7.2 Energiajärjestelmien ratkaisut

Tässä luvussa tarkastellaan keskeisiä teknologisia ratkaisupolkuja, joita fossiilisesta energiasta irtautuminen edellyttää. Painopiste on vetyratkaisuissa, hiilen hallinnassa, energiavarastoinnissa sekä energiansäästöissä ja energiatehokkuudessa. Luvussa kuvataan, miten vähäpäästöinen vety voi tukea teollisuuden murrosta ja mahdollistaa uusia arvoketjuja. Hiilidioksidin talteenotto, hyödyntäminen ja poistaminen ovat tärkeitä päästöjen hallinnassa eri sektoreilla. Luvussa esitellään myös nopeasti kehittyviä energiavarastointiteknologioita, joilla voidaan tasapainottaa tuotantoa ja kulutusta, varmistaa sähköverkon vakaus sekä mahdollistaa uusiutuvan energian laaja integraatio. Luvussa painotetaan myös energiansäästö ja energiatehokkuustoimia, joilla voidaan vähentää kokonaiskysyntää. Nämä asiat havainnollistavat mahdollisuuksia ja haasteita, joita liittyy joustavan, fossiilivapaan ja turvallisen yhteiskunnan rakentamiseen.

7.2.1 Vetyratkaisut

Kirjoittajat: Tero Tynjälä ja Pertti Kauranen

Vähäpäästöisen vedyn merkityksen odotetaan kasvavan tulevaisuuden energiajärjestelmässä. Vety ei ole energialähde vaan energiankantaja. Arvioiden mukaan sen suora käyttö muodostaa vain pienen osan kokonaiskulutuksesta. Vedyn muita käyttökohteita ovat erilaiset Power-to-X (PtX)-tuotteet, kuten kemikaalit, muovit ja liimat, joita tuotetaan nykyisin fossiilisesta öljystä tai maakaasusta. Monet vedyn nykyisistä käyttäjistä, kuten biopolttoaineiden, lannoitteiden ja vetyperoksidin tuottajat, suunnittelevat siirtymistä harmaasta (maakaasupohjaisesta) vedystä vihreään vetyyn. Mikäli vetyä sekoitetaan maakaasuun tai biokaasuun, se voi korvata maakaasua myös teollisessa lämmöntuotannossa sekä sähköntuotannossa polttokennoihin tai kaasuturbiineihin perustuvissa ratkaisuissa. Myös puhtaaseen tai lähes puhtaaseen vedynpolttoon perustuvat kaasuturbiinit ja polttomoottorit ovat tutkimus- ja pilottivaiheessa. Fossiilivapaa teräksentuotanto vedyn avulla (pelkistys)

edellyttää suuria vetymääriä. Esimerkiksi Raahen terästehdas tarvitsisi arviolta noin 1 GW:n elektrolyyserikapasiteetin, jos se siirtyisi hiilestä vedyn käyttöön veden elektrolyysillä tuotetun vedyn avulla.

Vähäpäästöistä vetyä voidaan tuottaa vähäpäästöisellä sähköllä (vihreä vety), biomassasta kaasutuksen avulla tai fossiilisista polttoaineista (hiili/maakaasu) yhdistettynä hiilidioksidin talteenottoon ja varastointiin (CCS, sininen vety). Globaalisti vähäpäästöisen vedyn tuotannolla on vahva poliittinen tahtotila, mutta käyttöönotto ei etene riittävän nopeasti 1,5 °C:n skenaarioiden edellyttämällä tavalla.

IRENA:n 1,5 °C:n skenaariossa maailmanlaajuiset vähäpäästöisen vedyn tuotantotavoitteet vuodelle 2030 ja 2050 ovat vastaavasti 125 Mt ja 523 Mt (IRENA, 2024b). Euroopan komission arvion mukaan Eurooppa tarvitsee vuoteen 2030 mennessä 500–550 TWh uutta uusiutuvan sähkön kapasiteettia RePowerEU-ohjelman tavoitteiden saavuttamiseksi: 10 Mt kotimaista vihreän vedyn tuotantoa ja lisäksi 10 Mt uusiutuvan vedyn tuontia (EC, 2022).

Suomessa vetyä on toistaiseksi tuotettu pääasiassa maakaasusta höyryreformoinnilla. Maakaasun saatavuuden heikkeneminen ja hinnan nousu ovat vauhdittaneet siirtymää vedyn tuotantoon veden elektrolyysin avulla. Elektrolyysi kuluttaa runsaasti sähköä (noin 50 MWh/tH₂), ja puhtaan vedyn tuotanto edellyttää kohtuuhintaista, hiilivapaata sähköä.

Nopeasti kasvava tuulivoimatuotanto ja uusi ydinvoimalaitos ovat parantaneet puhtaan vedyn tuotantomahdollisuuksia Suomessa. Fingrid on arvioinut, että Suomen tuulivoimatuotanto voi nousta 60 TWh:iin vuonna 2030, ja realistinen tuotantopotentiaali on tästä moninkertainen (Fingrid, 2024b). Suomella on mahdollisuus nousta merkittäväksi energiantuottajaksi EU-alueella, ja uusiutuvan energian lisääminen on Suomessa selvästi yksinkertaisempaa kuin Keski-Euroopassa, jossa huomattavasti suurempi osa maatalasta on jo valjastettu tuuli- ja aurinkovoimalle ja sähköntuotanto perustuu edelleen

laajasti kivihiileen ja maakaasuun. Mikäli Suomi tuottaisi kymmenen prosenttia EU:n vuoden 2030 uusiutuvan vedyn tuotantovoitteen eli yhden miljoonan tonnin verran vetyä, tarvittaisiin noin 50 TWh sähköä ja noin 8 GW elektrolyyserikapasiteetti käyttöajasta ja järjestelmän hyötysuhteesta riippuen.

Tähän mennessä Suomen suurimman vihreän vedyn tuotantolaitoksen on rakentanut P2X Solutions Harjavaltaan. Laitoksen elektrolyyserikapasiteetti on 20 MW, ja se aloitti toimintansa vuoden 2025 alussa. Elektrolyyserikapasiteetin kasvattaminen 8 GW:iin edellyttäisi vuosikymmenen loppuun mennessä noin 400 vastaavan kokoluokan investointia, mikä tarkoittaa, että vetyratkaisuja on skaalattava nopeasti. P2X Solutions suunnittelee kapasiteetin kasvattamista rakentamalla seuraavaksi 40 MW laitoksen Joensuuhun ja 100 MW laitoksen Ouluun. Vihreän vedyn investointeja on suunnitteluvaiheessa useita, mutta vain harvalla on vahvistettu investointipäätös. Suurimmat suunnitteilla olevat hankkeet ovat PlugPowerin Kokkolaan ja Kristiinankaupunkiin kaavailemat 1 GW:n laitokset, joiden tarkoituksena on tuottaa vetyä ammoniakkiin ja vihreän teräksen tuotantoon.

Vedyn tuotannon lisäksi on kehitettävä vedyn varastointia ja jakeluinfrastruktuureja. Gasgrid on esitellyt Suomen kansallisen vetiverkon kehittämissuunnitelmia. Suunnittelu ja ympäristövaikutusten arviointi käynnistyivät vuonna 2025, ja ensimmäisen reittisuunnitelman arvioidaan valmistuvan vuonna 2027. Reittiluonnos julkaistiin vuonna 2025, ja siinä putkilinja kulkisi länsirannikkoa Tornio–Turku–Naantali-akselilla ja sieltä edelleen etelärannikolle Inkooseen ja Porvooseen sekä mahdollisesti Itä-Suomeen asti.

Vetyä käytetään harvoin sellaisenaan, vaan yleensä sitä käytetään johdannaisiin, kuten metaaniin ja metanoliin, joita on helpompi varastoida ja kuljettaa. Metaani ja metanoli soveltuvat nykyisessä muodossaan suoraan tai lähes suoraan moniin polttomoottoreihin, ja metanolilla voidaan vähentää merkittävästi merenkulun päästöjä. Vedystä tuotettu e-metanoli voidaan jatkojalostaa edelleen erilaisiksi polttoaineiksi ja kemikaaleiksi,

kuten lentopolttoaineeksi, bensiiniksi sekä muoveiksi ja muiksi materiaaleiksi, joita valmistetaan nykyisin fossiilisista raaka-aineista. Kemiaalliset prosessit edellyttävät usein tasaista käyttöä, ja tämän varmistamiseksi tarvitaan joko vetyputkistoja tai vetysäiliöitä, jotta suurille kemiallisille prosesseille voidaan taata keskeytymätön vedyn saanti. Laajamittaisia maanalaisia luolavarastoja pidetään usein taloudellisimpana tulevaisuuden ratkaisuna, kun vedyn tuotanto tapahtuu yhä vaihtelevammassa toimintaympäristössä.

Vedyn lisäksi kemiallinen synteesi tarvitsee hiililähteen. Se voi olla esimerkiksi biomassan käytöstä syntyvistä savukaasuista erotettua hiilidioksidia, biomassan kaasutuksella tuotettua synteetikaasua tai suoraan ilmakehästä talteen otettua hiilidioksidia. Hiilen kierrosta ja sen hallinnasta kerrotaan tarkemmin seuraavassa alaluvussa.

7.2.2 Hiilen hallinta

Kirjoittajat: Hannu Karjunen ja Tero Tynjälä

Hiilen hallinnalla viitataan erilaisiin teknologiaratkaisuihin ja käytäntöihin, joiden avulla ihmistoiminnasta aiheutuvia hiilidioksidipäästöjä voidaan vähentää ja hallita. Näihin ratkaisuihin voi sisältyä sekä luonnon prosesseihin perustuvia että teknologisia menetelmiä. Näille yhteistä on se, että hiili itsessään on prosessin aktiivinen osa, mikä erottaa ne muista ilmastomuutoksen hillintätoimista, kuten energiatehokkuuden parantamisesta tai fossiilisten polttoaineiden korvaamisesta uusiutuvilla energialähteillä.

Hiilenhallinnan toimenpiteet voidaan jäsentää kolmeen pääluokkaan:

1. hiilidioksidin talteenotto päästölähteistä ja pysyvä varastointi maaperään (CCS)
2. hiilidioksidin talteenotto ja hyödyntäminen fossiilisen hiilen korvaamiseksi (CCU)
3. hiilidioksidin poisto (*carbon dioxide removal, CDR*), jossa tavoitteena on poistaa jo ilmakehään päässyttä hiilidioksidia ja varastoida se pysyvästi (EC, 2024).

Nämä eri polut hyödyntävät osittain samoja teknologioita ja infrastruktuureja, mutta niiden ilmastovaikutukset voivat poiketa merkittävästi toisistaan riippuen hiilen lähteestä (fossiilinen, biogeeninen, ilmakehästä talteen otettu) sekä käyttötarkoituksesta (lyhytaikainen käyttö, pitkäaikainen varastointi tai pysyvä poisto hiilen kierrosta).

Vuonna 2025 maailmanlaajuinen hiilidioksidin talteenottokapasiteetti oli noin 64 miljoonaa tonnia vuodessa, mikä vastaa noin 25 prosentin kasvua edellisvuodesta. Valtaosa nykyisestä kapasiteetista liittyy maakaasun tuotantoon. Kehityshankkeet painottuvat erityisesti Pohjois-Amerikkaan ja Eurooppaan. Norjassa sijaitseva Brevikin CCS-laitos avattiin virallisesti kesäkuussa 2025, ja se edustaa merkittävää edistysaskelta CCS-teknologialle maailman suurimpana sementtitehtaaseen integroituna hiilidioksidin talteenottolaitoksena. Muita merkittäviä eurooppalaisia talteenottohankkeita ovat Hafslund Oslo Celsio-jätteenpolttolaitos, BECCS Stockholm -sähkötuotantoyksikkö sekä Isossa-Britanniassa sijaitseva Net Zero Teesside Power -hanke.

Suomessa hiilidioksidin talteenottoa on viime aikoina testattu Metsä Groupin Rauman selutehtaalla liikkuvan koeyksikön avulla. Maailmanlaajuisesti sellutehtaiden savukaasuja hyödyntäviä demonstraatiohankkeita on ollut vain muutamia erityisesti Kanadassa, Yhdysvalloissa ja Japanissa.

Euroopassa yksi keskeisimmistä hiilenhallinnan kehitystä ohjaavista tekijöistä on NetZero Industry Act, joka velvoittaa varastoimaan geologisesti 50 miljoonaa tonnia hiilidioksidia vuodessa vuoteen 2030 mennessä. Lisäksi merenkulun sisällyttäminen EU:n päästökauppajärjestelmään (ETS) sekä muut päästökaupan uudistukset lisäävät sekä CCU että CCS-ratkaisujen kysyntää. Uudistettu ETS II laajentaa päästökaupan koskemaan myös liikenne ja rakennussektoreita vuosina 2027 tai 2028.

Vapaaehtoinen hiilenpoiston sertifiointikehys (*Carbon Removal Certification Framework, CRCF*) sekä siihen liittyvät delegoidut säädökset määrittelevät sertifiointimenetelmiä tek-

nologioille, kuten bioenergiaan yhdistetylle hiilidioksidin talteenotolle ja varastoinnille (BECCS), hiiliviljelylle sekä hiilen varastoinnille tuotteisiin. Tällä hetkellä näitä hiilen-sidontasertifikaatteja ei kuitenkaan voida hyödyntää EU:n päästökauppajärjestelmässä, mikä rajoittaa CRCF-kehiksen käytännön merkitystä toistaiseksi.

Keskeisimpiä CDR-teknologioita eli teknologisia hiilinieluja ovat bioenergiaan yhdistetty hiilidioksidin talteenotto ja varastointi (BECCS), suora hiilidioksidin talteenotto ilmasta (DACCS), metsitys ja uudelleenmetsitys sekä hiilen sitominen karbonaatteihin, puutuotteisiin, maaperään, biohiileen tai muihin pitkäikäisiin materiaaleihin.

7.2.3 Energiavarastot

Kirjoittajat: Pertti Kauranen, Aki Grönman ja Jukka Lassila

Sähköenergiaa voidaan varastoida mekaanisena, kemiallisena, sähkömagneettisena tai lämpöenergiana. Energiavarastoilla on lukuisia käyttökohteita, kuten kulutuselektronikka, sähköajoneuvot, teollinen varakapasiteetti, sähköverkon vakauttaminen sekä uusiutuvan energian varastointi. Varastointitarve voi olla lyhytaikaista, esimerkiksi sähköverkon tasapainottamista sekunneista tunteihin, tai pitkäaikaista, kuten aurinkoenergian varastointia päivästä yöhön tai kausivarastointia kesästä talveen. Sähkön varastointimarkkinoita hallitsevat tällä hetkellä kaksi teknologiaa: litiumioniakut ja pumppuvoimalaitokset (pumppuvesivarastot).

Litiumioniakkujen kehitystä ohjaa erityisesti autoteollisuuden tarve sähköajoneuvojen akuista. Litiumioniakkujen vuosituotanto on vain muutamassa vuodessa kaksinkertaistunut noin 2 000 GWh:iin, ja sen ennustetaan nousevan 4 000 GWh:iin vuoteen 2030 mennessä. Tämä vastaisi noin 50 miljoonan sähköajoneuvon vuosittaista akkutarvetta. Sähköverkkoon liitettyjen energiavarastojen osuuden arvioidaan pysyvän noin kymmenessä prosentissa sähköajoneuvoakkujen markkinasta. Akkumarkkinoiden kasvua rajoittavat ennen kaikkea raaka-aineiden



saatavuus sekä riittämättömät investoinnit raaka-ainetuotantoon. Litiumioniakkujen lisäksi erityisesti kiinalaiset yritykset investoivat natriumioniakkuteknologiaan. Sen suorituskyky on hieman heikempi, mutta raaka-ainepohja on laajempi. Natriumioniakkuteknologiaa skaalataan parhaillaan massatuotantoon, ja se on jo alkanut näkyä myös energiavarastomarkkinoilla.

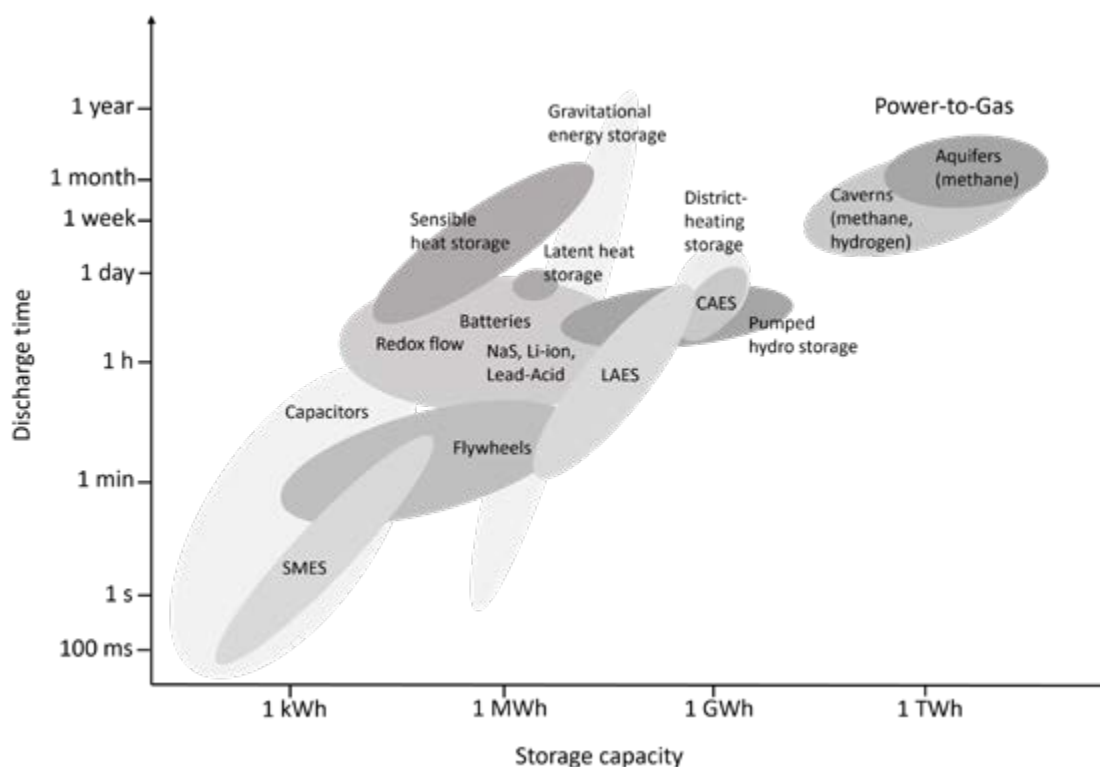
Vuonna 2025 maailmanlaajuisesti asennettiin yli 100 GW uusia akkuenergiavarastoja (BESS), mikä lähes kaksinkertaisti asennetun kapasiteetin 267 GW:iin ja 610 GWh:iin. Akkuvarastot ovat ohittaneet pumppuvesivarastot tärkeimpänä verkkomittakaavan energiavarastoteknologiana. Akkuvarastot soveltuvat pääasiassa lyhytaikaiseen varastointiin, kun taas pumppuvesivarastot voivat varastoida energiaa useiden päivien ajan. Maailmanlaajuisesti pumppuvesivarastoja on käytössä lähes 200 GW, mutta uutta kapasiteettia asennettiin vuonna 2025 vain noin 8 GW. Teknologian käyttöönottoa rajoittavat sopivien sijaintipaikkojen puute, korkeat kustannukset sekä ympäristökysymykset. Suomessa Kemijärven kaupunki hylkäsi hiljattain Kemijoki Oy:n 550 MW:n pumppuvoimalahankkeen ympäristösyistä.

Muita varastointiteknologioita, kuten paineilmaenergian varastointia, painovoimaan perustuvia mekaanisia ratkaisuja, nesteytys- ja kryogeenisiä varastointimenetelmiä sekä vanadiinivirtausakkuja, käytetään toistaiseksi vielä vähän.

Litiumioniakkujen käyttö mitoitetaan nykyisin tyypillisesti 0,5–4,0 tunnin varastointikapasiteetin mukaan. Näin akkujärjestelmiä voidaan hyödyntää sähköverkon säätö- ja reservimarkkinoilla, niiden avulla voidaan tasata kulutushuippuja ja ne voivat toimia lyhytaikaisina energiavarastoina ja varavoimana. Suomen suurin akkuenergiavarasto, jonka teho on 90 MW, on rakennettu Olkiluodon ydinvoimalaitoksen yhteyteen tukemaan sähköverkkoa laitoksen alas- ja ylösajotilanteissa. Litiumakkuja ja superkondensaattoreita hyödynnetään myös vesivoiman rinnalla säätö- ja reservimarkkinoilla, mikä vähentää vesivoimalaitosten huoltotarvetta.

Maaailmanlaajuisesti aurinkosähkön yhteydessä käytettävät litiumioniakut on tyypillisesti mitoitettu neljän tunnin varastointiin, jolloin ne kattavat tuotannon keskipäivältä iltapäivän kulutushuippuun. Kausivarastointiin soveltuvat parhaiten vety ja vedyn poh-

jalta tuotetut synteettiset polttoaineet, mutta nämä teknologiat ovat vielä pitkälti pilottivaiheessa ja niiden hyötysuhde on suhteellisen alhainen. Kuva 7.1 esittää yleiskuvan eri varastointiteknologioista luokiteltuna varastointikapasiteetin ja purkuajan mukaan.



Kuva 7.1. 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).

Energiavarastoinnin taloudellisuus riippuu hankintakustannusten lisäksi olennaisesti siitä, kuinka usein varasto ladataan ja puretaan. Tämä tekee lyhytaikaisista varastointijärjestelmistä taloudellisesti kannattavampia. Kausivarastot, joita ladataan vain muutamia kertoja vuodessa, eivät nykyisessä energiainfrastruktuurissa ole taloudellisesti kannattavia. Monet kunnat investoivat kuitenkin kausiluonteisiin kuuman veden lämpövarastoihin, joita rakennetaan kallioon tai terässäiliöihin.

Näiden ratkaisujen kannattavuuteen vaikuttavat merkittävästi sähkön hinnan vaihtelut.

Mikäli sähköajoneuvoissa hyödynnettäisiin kaksisuuntaista latausta, joka mahdollistaisi akuston purkamisen takaisin sähköverkkoon, voitaisiin sähköverkolle tarjota merkittävää reservikapasiteettia. Tämän potentiaalin hyödyntäminen edellyttäisi kuitenkin uutta teknologiaa sekä ajoneuvoissa että latausasemissa, riittäviä taloudellisia kannustimia

sähköajoneuvojen omistajille sekä akkujen kestävyysparantamista, jotta lisääntynyt käyttö ei lyhentäisi akkujen käyttöikää merkittävästi.

7.2.4 Energiansäästö ja energiatehokkuus

Kirjoittajat: Jero Ahola ja Aki Grönman

Energian säästöllä tarkoitetaan toimenpiteitä, joilla vähennetään energiaa kuluttavien palveluiden käyttöä. Tämä voidaan usein toteuttaa ilman, että energian käyttäjän kokemaa palvelutasoa heikkenee. Käytännön esimerkkejä ovat älykkäästi ohjattu sisävalaistus, huoneilämpötilan säätö sekä hiilidioksidipitoisuuden perustuva ilmanvaihdon ohjaus. Energiatehokkuudella puolestaan tarkoitetaan energiapalveluiden tuottamiseen tarvittavan energiamäärän vähentämistä. Käsitteellisesti energian säästö ja energiatehokkuus eivät ota kantaa tuotettujen energiapalveluiden kokonaismäärään. Kokonaisenergiankulutus voi kasvaa, vaikka energiansäästötoimia toteutetaan ja energiatehokkuus paranee.

Energiajärjestelmän sähköistyminen ja digitalisoituminen edistävät yleisesti energiansäästöä ja energiatehokkuutta. Sähköistymisen myötä energiatehokkuus paranee erityisesti liikenteessä, lämmityksessä ja valaistuksessa, kun nykyisiä teknologioita korvataan energiatehokkaammilla ratkaisuilla. Esimerkkejä tästä ovat sähköajoneuvot, lämpöpumpit ja LED-valaistus. Teollisuudessa energiatehokkuutta voidaan edelleen parantaa lisäämällä taajuusmuuttajaohjattujen pumppujen, puhaltimien, tuulettimien ja kompressorien käyttöä. Energian säästön ja energiatehokkuuden rinnalle on noussut kysyntäjousto. Erityisesti tuuli- ja aurinkovoimaan perustuvassa sähköjärjestelmässä energian saatavuus ja hinta riippuvat voimakkaasti vallitsevista sääolosuhteista.

Suomessa energiansäästöä ja energiatehokkuutta ohjataan kansallisella tasolla EU:n energiatehokkuusdirektiivin mukaan, joka on pantu täytäntöön kansallisella energiatehokkuuslailla. Energiatehokkuutta ja energiansäästöä edistetään teollisuuden ja

kuntien kanssa solmituilla energiatehokkuussopimuksilla, jotka kattavat noin 60 prosenttia Suomen kokonaisenergiankulutuksesta. Sopimuksissa organisaatiot sitoutuvat raportoimaan ja kehittämään energiansäästöä ja energiatehokkuustoimiaan esimerkiksi omien taloudellisten ja ympäristötavoitteidensa mukaisesti. Kansallisella tasolla energiatehokkuuden ja energiansäästön koordinoinnista vastaa valtion omistama kestävä kehityksen yhtiö Motiva.

Euroopan unioni asettaa jäsenmailleen yhteiset energiatehokkuustavoitteet. Uusin energiatehokkuusdirektiivi (EU/2023/1791) yli kaksinkertaistaa vuosittaisen energiansäästövelvoitteensa. Suomi valmisteleekin kansallisen lainsäädäntönsä näiden tavoitteiden pohjalta (EC, 2023). Suomi viimeisteli toimensa kansallisissa energia ja ilmastosuunnitelmissa ja toimitti ne Euroopan komissiolle kesäkuussa 2024.

EU:n energiatehokkuusdirektiivi (EED) on kuitenkin kohdannut kritiikkiä ja myös suoraan Suomen työ ja elinkeinoministeriöltä. Suomen kannalta ongelmallisena pidetään muun muassa sitä, ettei direktiivi huomioi aiempia saavutuksia tai pohjoista sijaintia, loppuenergian kulutuksen sitomista kiinteisiin rajoihin sekä oikeudellisten keinojen rajallisuutta energiatehokkuuden edistämiseksi.

Suomi on pitkään toiminut energiatehokkuuden edelläkävijänä, vähentänyt merkittävästi energiankulutustaan ja toiminut alalla esimerkillisesti. Suomen saavutukset ovat usein ylittäneet monien muiden maiden toimet. EU:n sääntely ei kuitenkaan ota tätä lähtökohtaa huomioon, vaan asettaa vaatimuksia, jotka mahdollistavat ”saman lisäyksen lähtötasosta riippumatta”. Tyypillinen esimerkki on se, että suomalaisissa asuinrakennuksissa on käytetty kolminkertaisia ikkunoita jo pitkään. Näitä on vaikea enää parantaa, kun taas monissa Euroopan maissa ollaan vasta siirtymässä kaksinkertaisiin ikkunoihin. Saman energiansäästön saavuttaminen on Suomessa huomattavasti kalliimpaa. Erityisen ongelmallisena pidetään suomalaiseen rakennuskantaan kohdistuvia suuria energiatehokkuuden parannusvaatimuksia.



Vanhojen rakennusten uudelleenkäyttö tai säilyttäminen ei välttämättä edistä rakennuskannan kokonaisenergiankulutuksen vähentämistä. Valtion ja kuntien rakennusten osalta tilanne on erityisen haastava. Mikäli tavoitteena on rakentaa rakennuksia, joiden käyttöikä on sata vuotta, niiden purkaminen ja uudelleenrakentaminen 20 vuoden välein uusien energiatehokkuusmääräysten vuoksi on ongelmallista. Energiatehokkuuden näkökulmasta loppuenergian kulutuksen pakollinen vähentäminen näyttää lyhyellä aikavälillä myönteiseltä, ja EU onkin vähentänyt loppuenergian kulutustaan usean vuoden ajan. Pitkällä aikavälillä velvoite jatkuvaan loppuenergian kulutuksen vähentämiseen voi kuitenkin johtaa EU:ssa tavaratuotantoon liittyvän taloudellisen toiminnan supistumiseen ja tuonnin kasvuun.

Vaikka siirtyminen polttomoottoriautoista sähköautoihin ja rakennusten parempi eristäminen vähentävät loppuenergian kulutusta, vetytalous ei tee näin. Suomi tavoittelee merkittävää e-polttoaineiden tuotantoa hyödyntämällä edullista, fossiilitonta sähköä vedyn tuotantoon

sekä talteen otettua biogeenistä hiilidioksidia vientiin muihin EU-maihin. Tämän toiminnan arvioidaan voivan lisätä Suomen ulkomaankauppaa 4 000–9 000 miljoonalla eurolla vuoteen 2050 mennessä. Kaikki tämä vetytaluuteen liittyvä toiminta, vaikka sitä tuettaisiin EU-rahoituksella, kasvattaa loppuenergian kulutusta ja voi johtaa siihen, ettei Suomi saavuta sille asetettua loppuenergian kulutuksen vähennysvelvoitetta.

Teollisuus suhtautuu varauksellisesti energiatehokkuusinvestointeihin, sillä korvausinvestoinneilta edellytetään tyypillisesti 2–3 vuoden takaisinmaksuaikaa. Merkittäviä energiatehokkuushyötyjä voitaisiin usein saavuttaa investoinneilla, joiden teollinen takaisinmaksuaika on 5–9 vuotta. Suomen teollisuuden energiatehokkuutta olisi helppo parantaa merkittävästi tarjoamalla esimerkiksi 30 prosentin investointitukia teollisille hankkeille, mutta nykyinen teollisuuspolitiikka estää tämän. Sen sijaan esimerkiksi suurten tukien myöntäminen kauppojen energiatehokkuuden parantamiseen aurinkopaneeleja asentamalla on sallittua.

LÄHTEET

Amineh, M. P., & Yang, G. [2025]. *China's geopolitical economy of energy security: A theoretical and conceptual exploration* [Preprint].

Amnesty International. (2016). "This is what we die for": Human rights abuses in the Democratic Republic of the Congo power the global trade in cobalt. <https://www.amnesty.org/en/wp-content/uploads/2021/05/AFR6231832016ENGLISH.pdf>

Apajalahti, E.-L., & Galvao Lyra, M. (2025). Societal impacts of wind energy projects. In M. Järvinen & H. Paulomäki (Eds.), *Renewable energy engineering within planetary boundaries*.

Apajalahti, E.-L., & Matschoss, K. (2021). *Yhteisöenergiaa kaupunkiin: Merihaan merilämpövoimahanke* [CROSSOVER 2/2021]. Aalto University.

Apajalahti, E.-L., Ruggiero, S., Lukkarinen, J., & Laakso, S. (2023). Exploring tensions in urban energy communities. In M. M. Sokotowski & A. Visvizi (Eds.), *Routledge handbook of energy communities and smart cities*, 27–40. Routledge.

Arias, A., Feijoo, G., & Moreira, M. T. (2023). Advancing the European energy transition based on environmental, economic and social justice. *Sustainable Production and Consumption*, 43, 77–93. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.10.013>

Barth, J., Victoria, M., Brown, T., & Schlachtberger, D. (2026). *Assessing the gap between decarbonisation targets and technology deployment in Europe and the United States*. Energy Policy.

Bioenergy Association of Finland. (2026). <https://www.bioenergia.fi/en/>

Biresselioglu, M. E., Demir, M. H., Solak, B., Savas, Z. F., Kollmann, A., & Kirchler, B. (2024). Empowering energy citizenship: Exploring dimensions and drivers in citizen engagement during the energy transition. *Energy Reports*, 11, 1894–1909. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.01.123>

Breyer, C., Jacobson, M. Z., Diesendorf, M., Teske, S., Clack, C. T. M., Owen, A., Hennicke, P., Hainsch, K., Riepin, I., & Brown, T. (2023). *Proposing a 1.0 °C climate target for a safer future*. PLOS Climate, 2(9), e0000234. <https://doi.org/10.1371/journal.pclm.0000234>

Breyer, C., Lopez, G., Bogdanov, D., & Laaksonen, P. (2024). The role of electricity-based hydrogen in the emerging power-to-X economy. *International Journal of Hydrogen Energy*, 49(D), 351–359. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.08.170>

Brisbois, M. C., & Cantoni, R. (2025). Coping with decarbonisation: An inventory of strategies from resistance to transformation. *Global Environmental Change*, 90, 102968. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2025.102968>

Burke, M., Hsiang, S., & Miguel, E. (2015). Global non-linear effect of temperature on economic production. *Nature*, 527, 235–239. <https://doi.org/10.1038/nature15725>

Carrara, S., Bobba, S., Blagoeva, D., Alves Dias, P., Cavalli, A., Georgitzikis, K., Grohol, M., Kuzovleva, O., Latunussa, C., Mathieux, F., Pennington, D., Pinedo Pascua, I., & Sala, S. (2023). *Supply chain analysis and material demand forecast in strategic technologies and sectors in the EU* [JRC Science for Policy Report]. European Commission.

Cheung, A. (2026). Global climate policy and the shifting dynamics of energy transitions. *International Energy Policy Review*.

Climate Action Tracker. (2009). <https://climateactiontracker.org/about/>

COP21. (2015). *Paris climate conference*. <https://www.cop21paris.org/about/cop21>

COP30. (2025). *Belém climate conference*. <https://cop30.br/en>

Creutzig, F., Ravindranath, N. H., Berndes, G., Bolwig, S., Bright, R. M., Cherubini, F., Chum, H., Corbera, E., Daigneault, A., Faaij, A., Haberl, H., Heath, G. A., Lucon, O., Plevin, R., Popp, A., Robledo-Abad, C., Rose, S. K., Smith, P., Strömman, A. H., & Masera, O. (2015). Bioenergy and climate change mitigation: An assessment. *GCB Bioenergy*, 7(5), 916–944. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12205>

Dahl Larsen, M. A., & Drews, M. (2019). Water use in electricity generation for water–energy nexus analyses. *Science of the Total Environment*, 651, 2044–2058. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.045>

Dall-Orsoletta, A., Sovacool, B. K., Axsen, J., & Bazilian, M. (2022). A systematic review of social innovation and community energy transitions. *Energy Research & Social Science*, 88, 102625. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2022.102625>

Dashti, M., Sahin, H., Sacchi, R., Rocco, M., & Breyer, C. (2025). Prospective life cycle assessment of baseload hydrogen. *Sustainable Production and Consumption*, 61, 209–230. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2025.10.017>

Devine-Wright, P. (2012). Energy citizenship: psychological aspects of evolution in sustainable energy technologies. In *Governing technology for sustainability* (pp. 63-86). Routledge.

Di Blasio, G., Agarwal, A. K., Belgiorno, G., & Shukla, P. C. (2022). Introduction to clean fuels for mobility. In G. Di Blasio, A. K. Agarwal, G. Belgiorno, & P. C. Shukla (Eds.), *Clean fuels for mobility*. Springer.
<https://doi.org/10.1007/978-981-16-8747-1>

Diez-Cañamero, B., & Mendoza, J. M. F. (2023). Circular economy performance and carbon footprint of wind turbine blade waste management alternatives. *Waste Management*, 164, 94–105.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.03.041>

DNV. (2026). *The likely effects of the Iran war on the global energy transition*.
<https://www.dnv.com/energy-transition-outlook>

EC. (2020). Financing the green transition: The European green deal investment plan and just transition mechanism. https://ec.europa.eu/regional_policy/en/newsroom/news/2020/01/14-01-2020-financing-the-green-transition-the-european-green-deal-investment-plan-and-just-transition-mechanism

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.

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

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

Eerola, T. (2024). The origin, evolution and impacts of the mining-sceptical movement in Finland. *The Extractive Industries and Society*, 19, 101486. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2024.101486>

EHPA. (2025). European Heat Pump Market and Statistics Report 2025. Brussels: European Heat Pump Association.

Emissions Gap Report. (2025). *Off target: Continued collective inaction puts global temperature goal at risk*. United Nations Environment Programme. <https://doi.org/10.59117/20.500.11822/48854>

Energiateollisuus. (2025). Energiavuosi 2025, Sähkö. <https://energia.fi/tilastot/sahkotilastot/>

Energiateollisuus. (2026). Ydinvoiman suosio on säilynyt vahvana. <https://energia.fi/tiedotteet/energia-asenteet-2025/>

Energiavirasto. (2025). Aurinkosähkön tuotantokapasiteetti kasvoi 24 % vuonna 2024. <https://energiavirasto.fi>

Energiavirasto. (2026). Määräys sähkönjakelupalvelutuotteiden maksukomponenttien määräytymisperusteista 2340/000002/2025. <https://energiavirasto.fi> Euronews. (2026). IEA: Global economy faces "major, major threat" because of Iran war. <https://www.euronews.com>

EU. (2018/2001). Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi (EU) 2018/2001, annettu 11 päivänä joulukuuta 2018, uusiutuvista lähteistä peräisin olevan energian käytön edistämisestä (uudelleenlaadittu). <http://data.europa.eu/eli/dir/2018/2001/oj>

EU. (2019/944). Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi (EU) 2019/944, annettu 5 päivänä kesäkuuta 2019, sähkön sisämarkkinoita koskevista yhteisistä säännöistä ja direktiivin 2012/27/EU muuttamisesta (uudelleenlaadittu). <http://data.europa.eu/eli/dir/2019/944/oj>

EU. (2023/2413). Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi (EU) 2023/2413, direktiivin (EU) 2018/2001, asetuksen (EU) 2018/1999 ja direktiivin 98/70/EY muuttamisesta uusiutuvista lähteistä peräisin olevan energian käytön edistämisen osalta sekä neuvoston direktiivin (EU) 2015/652 kumoamisesta. <http://data.europa.eu/eli/dir/2023/2413/oj>

EU. (2024). The Draghi report: A competitiveness strategy for Europe. https://commission.europa.eu/topics/competitiveness/draghi-report_en

EU. (2024/1252). Euroopan parlamentin ja neuvoston asetukset (EU) 2024/1252 puitteiden vahvistamisesta kriittisten raaka-aineiden turvatun ja kestävästi tarjonnan varmistamiseksi ja asetusten (EU) N:o 168/2013, (EU) 2018/858, (EU) 2018/1724 ja (EU) 2019/1020 muuttamisesta. <http://data.europa.eu/eli/reg/2024/1252/oj>

Eurostat. (2022). Energy consumption in households. <https://ec.europa.eu/eurostat>

Fasihi, M. (2025). *Global techno-economic potential of power-to-X technologies for sustainable fuels, chemicals, and food supply* (Doctoral dissertation, LUT University). <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-412-221-4>

Akkuteollisuus. (2025). <https://akkuteollisuus.fi/en/>

Fingrid. (2023). Sähköjärjestelmävisio 2023. <https://www.fingrid.fi/en/grid/development/electricity-system-vision-2025/electricity-system-vision-2023/>

- Fingrid Oyj. (2024a). *Tehoreservi 2024*. <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/tehoreservi/maksut/tehoreservi-2024/>
- Fingrid. (2024b). *Sähkön tuotannon ja kulutuksen kehitysnäkymät Q1 2024*. <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/kehittaminen/sahkon-tuotannon-ja-kulutuksen-kehitysnakymat/sahkon-tuotannon-ja-kulutuksen-kehitysnakymat-q1-2024/>
- Fingrid. (n.d.). *Aurinkovoiman tuotanto*. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinainformaatio/aurinkovoima/>
- Fortum. (2025). *Fortum sai päätökseen selvityksensä uuden ydinvoiman edellytyksistä – jatkaa ydinvoiman kehittämistä tulevaisuuden vaihtoehtona*. <https://www.fortum.com/fi/media/2025/03/fortum-sai-paatokseen-selvityksensa-uuden-ydinvoiman-edellytyksista-jatkaa-ydinvoiman-kehittamista-tulevaisuuden-vaihtoehtona>
- Fortum. (n.d.). *Loviisan ydinvoimalaitoksen käyttöön jatko*. <https://www.fortum.com/fi/tietoa-meista/energiantuotanto/voimalaitoksemme/loviisan-voimalaitos/loviisan-ydinvoimalaitoksen-kayttoian-jatko>
- Fraccascia, L., Yazdanpanah, V., van Capelleveen, G., & Yazan, D. M. (2021). Energy-based industrial symbiosis: A literature review. *Environment, Development and Sustainability*, 23, 4791–4825. <https://doi.org/10.1007/s10668-020-00840-9>
- Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE. (2025). *Photovoltaics report*. <https://www.ise.fraunhofer.de>
- Gan, Y., Ng, C., Elgowainy, A., & Marcinkoski, J. (2024). Considering embodied greenhouse gas emissions of nuclear and renewable power plants. *Environmental Science & Technology*, 58(42), 18654–18662. <https://doi.org/10.1021/acs.est.4cXXXX>
- Garrido-Yserte, R., & Gallo-Rivera, M. T. (2020). The potential role of stakeholders in the energy efficiency of higher education institutions. *Sustainability*, 12(21), 8908. <https://doi.org/10.3390/su12218908>
- GBF (2022). Convention on Biological Diversity. COP15: Final text of Kunming-Montreal global biodiversity framework. <https://www.cbd.int/article/cop15-final-text-kunming-montreal-gbf-221222>
- Georgescu, L. P., Fortea, C., Antohi, V. M., Gavrilescu, M., & Gavrilescu, D. (2025). Drivers of the circular economy in the European Union. *Environmental Sciences Europe*, 37(1), Article 119. <https://doi.org/10.1186/s12302-025-01119-4>
- Gibellato, S., Ballestra, L. V., Fiano, F., Graziano, D., & Gregori, G. L. (2023). The impact of education on the energy trilemma index. *Applied Energy*, 330, 120352. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120352>
- Gibon, T., & Hahn Menacho, Á. (2023). Parametric life cycle assessment of nuclear power. *Environmental Science & Technology*, 57(38), 14194–14205. <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c03190>
- Giuntoli, J., Agostini, A., Edwards, R., & Marelli, L. (2017). *Solid and gaseous bioenergy pathways: Input values and GHG emissions*.
- Global Bioenergy Statistics Report. (2025). World Bioenergy Association. <https://www.worldbioenergy.org>
- Gorroño-Albizu, L., Sperling, K., & Djørup, S. (2019). The past, present and future of community energy in Denmark. *Energy Research & Social Science*, 57, 101231. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2019.101231>
- Gui, E. M., & MacGill, I. (2018). Typology of future clean energy communities. *Energy Research & Social Science*, 35, 94–107. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2017.10.019>
- Guo, L., Abdul, N. M. M., Vengalil, M., Wang, K., & Santuzzi, A. (2022). Engaging renewable energy education. *IEEE Access*, 10, 60972–60984. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3180262>
- Haakana, J., Haapaniemi, J., Lamminpää, A., Lassila, J., Viiliäinen, S., & Vähäsaari, M. (2025). Effects of extreme spot market prices. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 19(1), e70114. <https://doi.org/10.1049/gtd.2.70114>
- Habib, K., Hamelin, L., & Wenzel, H. (2016). A dynamic perspective of geopolitical supply risk. *Journal of Cleaner Production*, 133, 850–858. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.118>
- Han, X., Chang, H., Wang, C., Zhang, L., Liu, G., & Chen, W. (2023). Life-cycle greenhouse gas emissions of waste incineration: A systematic review. *Journal of Cleaner Production*, 398, 136635. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136635>
- Hansen, J., Sato, M., Kharecha, P., Beerling, D., Berner, R., Masson-Delmotte, V., Pagani, M., Raymo, M., Royer, D. L., & Zachos, J. C. (2008). Target atmospheric CO₂: Where should humanity aim? *The Open Atmospheric Science Journal*, 2, 217–231. <https://doi.org/10.2174/1874282300802010217>
- Heras-Saizarbitoria, I., Sáez, L., Allur, E., & Morandeira, J. (2018). The emergence of renewable energy cooperatives in Spain: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 94, 1036–1043. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.06.049>
- HM Government. (2026). *Global biodiversity loss, ecosystem collapse and national security: A national security assessment*. <https://www.gov.uk>

- Huang, Y. (2016). Understanding China's Belt and Road Initiative: Motivation, framework and assessment. *China Economic Review*, 40, 314–321. <https://doi.org/10.1016/j.chieco.2016.07.007>
- Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. (2019). *Global assessment report on biodiversity and ecosystem services*.
- IAEA. (n.d.). *PRIS database*. International Atomic Energy Agency. <https://pris.iaea.org/PRIs/Home.aspx>
- IEA. (2022a). Snapshot of Global PV Markets 2022. <https://iea-pvps.org/snapshot-reports/snapshot-2022/>
- IEA. (2022b). 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). *Critical minerals market review 2023*. <https://www.iea.org/reports/critical-minerals-market-review-2023>
- IEA. (2023b). *Global water consumption in the energy sector dataset*. <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-water-consumption-in-the-energy-sector-by-fuel-and-power-generation-type-in-the-net-zero-scenario-2021-and-2030>
- IEA. (2025a). *World energy outlook 2025*. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2025>
- IEA. (2025b). *World Energy Investment 2025*. <https://www.iea.org/reports/world-energy-investment-2025>
- IEA. (2025c). *Global EV outlook 2025*. <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2025>
- IEA. (2025d). *World Energy Employment 2025*. <https://www.iea.org/reports/world-energy-employment-2025>
- IEA. (2025e). *Outlook for biogas and biomethane. A global geospatial assessment*. <https://www.iea.org/reports/outlook-for-biogas-and-biomethane>
- IEA. (2025f). *The path to a new era for nuclear energy*, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/the-path-to-a-new-era-for-nuclear-energy>
- IEA. (2026a). *State of energy policy 2026*. IEA, Paris. <https://www.iea.org/reports/state-of-energy-policy-2026>
- IEA. (2026b). *Carbon capture, utilisation and storage*. <https://www.iea.org/energy-system/carbon-capture-utilisation-and-storage>
- IEA Bioenergy. (2023). *Commercial status of direct thermochemical liquefaction technologies*.
- IEA Bioenergy. (2024). *Country report: Finland 2024*.
- IRENA. (2024a). *Geopolitics of the energy transition: Energy security*.
- IRENA. (2024b). *Green hydrogen strategy. A guide to design*. <https://www.irena.org/Publications/2024/Jul/Green-hydrogen-strategy-A-guide-to-design>
- IRENA. (2025a). *Record-breaking annual growth in renewable power capacity*. <https://www.irena.org>
- IRENA. (2025b). *Renewable power generation costs in 2024*.
- IRENA. (2026). *Renewable capacity statistics 2026*.
- ITRPV (2024) International Technology Roadmap for Photovoltaics (ITRPV). VDMA industry network. Available at: <https://www.vdma.eu/en/international-technology-roadmap-photovoltaic>
- Jenkins, K., Sovacool, B. K., & McCauley, D. (2012). *Humanizing sociotechnical transitions through energy justice*.
- Jimenez Iturriza, J., Matschoss, K., & Heiskanen, E. (2019). *Collective energy practices in Europe: Results from the ECHOES project*. ECHOES Project.
- Järvinen, M., Paulomäki, H., Oksanen, E., & Syri, S. (2025). A sustainable path for renewable energy technologies. In M. Järvinen & H. Paulomäki (Eds.), *Designing renewable energy systems within planetary boundaries*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-69856-9_2
- Kadiyala, A., Kommalapati, R., & Huque, Z. (2016). Life cycle greenhouse gas emissions from hydroelectricity. *Sustainability*, 8(6), 539. <https://doi.org/10.3390/su8060539>
- Kajoskoski, T., Matschoss, K., Heiskanen, E., & Laakso, S. (2025). Recent developments in energy poverty research in Europe. *Energy Strategy Reviews*, 61, 101855. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2025.101855>
- Keiner, D., Ram, M., Barbosa, L. S. N. S., Bogdanov, D., & Breyer, C. (2025). *Impact of bifacial solar photovoltaics on future power systems*.
- Khalili, S., Lopez, G., & Breyer, C. (2025). Role and trends of flexibility options. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 212, 115383. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115383>

- Kian, H., Galimova, T., & Breyer, C. (2026). Maritime defossilisation review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 234, 116895. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2026.116895>
- Klute, S., Budt, M., van Beek, M., & Doetsch, C. (2024). Steam generating heat pumps—Overview, classification, economics, and basic modeling principles. *Energy Conversion and Management*, 299, 117882.
- Krogh, A., Junginger, M., Shen, L., Grue, J., & Pedersen, T. H. (2024). Climate impacts of bioenergy technologies. *Science of the Total Environment*, 940, 173660. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173660>
- Kujanpää, L., Koponen, K., Linjala, O., Savolainen, I., & Vakkilainen, E. (2023). *Technological carbon sinks in Finland. Suomen ilmastopaneeli.*
- Kumar, S., Darshna, A., & Ranjan, D. (2023). Integration of green energy and circular economy. *Heliyon*, 9, e21091. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e21091>
- Kunak. (2025). *Energy production pollution: Environmental and health impacts.*
- Lee, M., Keller, A. A., Chiang, P.-C., Den, W., Wang, H., Hou, C.-H., Wu, J., & Yan, J. (2017). Water–energy nexus for urban systems: A review. *Applied Energy*, 205, 589–601. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.08.002>
- Leino, J. (2024). Justice in mining transitions in Finland. *The Extractive Industries and Society*, 19, 101501. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2024.101501>
- Lennon, B., Dunphy, N. P., & Sanvicente, E. (2019). Community acceptability and energy transition. *Energy, Sustainability and Society*, 9(1), 1–18. <https://doi.org/10.1186/s13705-019-0218-8>
- Leveälähti, S., Nieminen, J., Hanhijoki, I., Halonen, M., Kämäräinen, P., Nyyssölä, K., & Pätäri, J. (2019). *Osaaminen 2035: Osaamistarpeet ja osaamistarpeet tulevaisuudessa.. Opetushallitus.*
- Li, X., Meng, F., Dunbar, A., Xiao, Y., Wang, Y., & Chen, G. (2025). Reducing environmental impacts of photovoltaic systems: A life cycle assessment perspective. *RSC Sustainability*, 3(5), 2286–2300. <https://doi.org/10.1039/D4SU00234A>
- Liljenfeldt, J. & Slätmo, E. & Gamez, D.H.B. & Odai, M. (2025). When EU goes local: An analysis of the alignment between EU and national energy policies and the needs of local energy initiatives. *Energy Policy*, Elsevier, vol. 205(C). <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2025.114681>
- Lohrmann, A., Farfan, J., Caldera, U., Breyer, C., & Fasihi, M. (2019). Water use reduction in thermal power plants: Impacts of alternative cooling technologies on cost and performance. *Nature Energy*, 4, 1040–1048. <https://doi.org/10.1038/s41560-019-0501-4>
- Lopez, G., Pourjamal, Y., & Breyer, C. (2025). Analysis of IEA World Energy Outlook. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 212, 115371. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115371>
- Lovering, J., Swain, M., Blomqvist, L., & Hernandez, R. R. (2022). Land-use intensity of electricity production. *PLOS ONE*, 17(7), e0270155. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0270155>
- LUKE. (2025). Kasvihuonekaasuinventaarion ennakkotiedot 2023. Luonnonvarakeskus. <https://www.luke.fi/fi/uutiset/kasvihuonekaasuinventaarion-ennakkotiedot-2023-metsat-ovat-kaantyneet-paastolahteeksi-koska-puuston-nielu-ei-ena-riita-kattamaan-metsien-maaperan-paastoja>.
- LUT Energiaselonteko. (2024). *LUT-yliopiston Energiaselonteko 2024 - Varma, kestävä ja kohtuuhintainen energia.* <https://www.lut.fi/en/news/how-produce-sustainable-energy-future-lut-university-published-new-energy-outlook>
- MAN Energy Solutions (n.d.) Esbjerg Heat pump, webpage. <https://www.man-es.com/discover/esbjerg-heat-pump>
- McCaffrey, M. S. (2015). *Climate Smart & Energy WISE.*
- Mendonça, M., Lacey, S., & Hvelplund, F. (2018). Stability and transparency in renewable energy policy. *Renewable energy*, 429–457. Routledge.
- Mertens, J., Breyer, C., & Arning, K. (2023). Carbon capture and utilization. *Joule*, 7, 442–449. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2023.01.005>
- Michel, H. (2020). *Knowledge transfer and capacity building in energy transitions.*
- Mihailova, D., Schubert, I., Martinez-Cruz, A. L., Bigerna, S., Bollino, C. A., & Micheli, S. (2022). Preferences for positive energy districts: A stated choice experiment. *Energy Policy*, 163, 112824. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.112824>
- Ministry of Economic Affairs and Employment. (2023). *Hydrogen strategy for Finland.*
- Mirletz, H., Hieslmair, H., Ovaitt, S., Barnes, T., & Heath, G. (2023). Concerns about photovoltaic module toxicity. *Nature Physics*, 19, 1376–1378. <https://doi.org/10.1038/s41567-023-02230-0>

- Mühlbauer, A., Keiner, D., Gerhards, C., Caldera, U., Sterner, M., & Breyer, C. (2025). Assessment of technologies and economics for carbon dioxide removal from a portfolio perspective. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 141, 104297. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2024.104297>
- Murphy, F., Devlin, G., & McDonnell, K. (2015). Environmental impacts of peat electricity generation. *Sustainability*, 7(6), 6376–6393. <https://doi.org/10.3390/su7066376>
- Naukkarinen, J., & Jouhkimo, L. (2021). Integrated education for sustainability. *Sustainability*, 13(22), 12486. <https://doi.org/10.3390/su132212486>
- Nobre, C., Encalada, A., Anderson, E. et al. (2021). *Science Panel for the Amazon (2021). Executive Summary of the Amazon Assessment Report 2021*. New York, NY: United Nations Sustainable Development Solutions Network. [https://eng-ar21.sp-amazon.org/220717_SPA%20Executive%20Summary%202021%20\(English\).pdf](https://eng-ar21.sp-amazon.org/220717_SPA%20Executive%20Summary%202021%20(English).pdf)
- Numminen, S., Kajoskoski, T., Kaltampanidis, Y., & Jalas, M. (2024). Energy vulnerability in Finland. *Energy and Buildings*, 310, 114082. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114082>
- Opetushallitus. (2023). *Laaja-alainen osaaminen 2030-luvulla*.
- Overland, I. (2015). Future petroleum geopolitics. *Handbook of clean energy systems*.
- Paolini, V., Petracchini, F., Segreto, M., Tomassetti, L., Naja, N., & Cecinato, A. (2018). Environmental impact of biogas: A short review of current knowledge. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 53(10), 899–906. <https://doi.org/10.1080/10934529.2018.1459076>
- Paulomäki, H., & Järvinen, M. (2025). Sustainable energy systems introduction. *Designing renewable energy systems*. Springer.
- Paulomäki, H., Järvinen, M., & Apajalahti, E.-L. (2026). *Land use requirements of wind-based hydrogen production*. Energy, Society and Sustainability. Forthcoming.
- Pelastuslaitokset (2023). Aurinkosähköjärjestelmien paloturvallisuusoheje. Available at https://pelastuslaitokset.fi/sites/default/files/2023-01/Aurinkos%C3%A4hk%C3%B6j%C3%A4rjestelmien_paloturvallisuusoheje_S_18012023.pdf
- Planetary Health Check (2025). Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK), Potsdam, Germany. <https://www.planetaryhealthcheck.org/>
- Planete Energies. (2025). *Energy and water nexus*.
- 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. Marktrapport. 31 May 2023. <https://www.pzem.nl/en/nieuws-en-marktinformatie/difference-in-production-costs-between-gas-and-coal-fired-power-plants-is-increasing/>
- Ram, M., Osorio-Aravena, J. C., Aghahosseini, A., Bogdanov, D., Gulagi, A., Oyewo, A. S., Child, M., Farfan, J., & Breyer, C. (2022). Job creation during the global energy transition towards 100% renewable power system by 2050. *Energy*, 238, 121690. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121690>
- Re, B., Henttonen, K., Piispanen, V. V., & Lehtimäki, H. (2023). Circular entrepreneurship. *Routledge handbook of catalysts for a sustainable circular economy*. Routledge.
- ur Rehman A, Sanjari MJ, Elavarasan RM, Jamal T. (2026). Sustainability-aligned pathways for energy transition: A review of low-carbon energy network solutions. Vol. 226, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier Ltd; 2026. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116428>
- Remme, D., Sareen, S., Haarstad, H., & Rommetveit, K. (2023). Electric vehicle value chains. *The afterlives of extraction*. Brill.
- Richardson, K., Steffen, W., Lucht, W., Bendtsen, J., Cornell, S.E., Donges, J.F., et al. Earth beyond six of nine planetary boundaries. *Science Advances*, 2023(9). https://doi.org/10.1126/SCIADV.ADH2458/SUPPL_FILE/SCIADV.ADH2458_SM.PDF
- Rockström, J., Gupta, J., Qin, D., Lade, S. J., Abrams, J. F., Andersen, L. S., Armstrong McKay, D. I., Bai, X., Bala, G., Bunn, S. E., Ciobanu, D., DeClerck, F., Ebi, K. L., Gifford, L., Gordon, C., Hasan, S., Kanie, N., Lenton, T. M., Loriani, S., ... Zheng, J. (2023). Safe and just Earth system boundaries. *Nature*, 619, 102–111. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06083-8>
- Routaharju, L. (2025). *Engineering education for sustainable development* (Doctoral dissertation).
- Ruggiero, S., Dankowska, A., Apajalahti, E.-L., & Husu, H.-M. (2026). *Social impacts of community energy*.
- Salmi, J., & Honkapuro, S. (2025). *Capacity remuneration mechanism in Finland*.
- Satymov, R., Bogdanov, D., Galimova, T., & Breyer, C. (2025). Nordic energy transition pathways. *Energy*, 319, 134888. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.134888>

- Scheffran, J. (2023). Limits to the Anthropocene. *Frontiers in Political Science*, 5, 1190610. <https://doi.org/10.3389/fpos.2023.1190610>
- Schwanitz, V. J., Wierling, A., Zeiß, J. P., Bout, C., & Ruggiero, S. (2023). Citizen-led energy initiatives: financing and business models for decentralized renewable energy systems. *Scientific Reports*, 13, Article 28504. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-28504-4>
- Seppälä, J., Heinonen, T., Kalliokoski, T., Mäkipää, R., & Ollikainen, M. (2026). *Forest harvesting and climate scenarios in Finland*. Suomen ilmastopaneeli.
- Senthil, R. (2022). Innovations in solar energy education. *Acta Innovations*, 42, 27–49.
- Siddi, M. (2021). *The geopolitics of the energy transition*. Ulkopoliittinen instituutti.
- Sillman, J., Havukainen, J., Vainikka, P., & Horttanainen, M. (2024). Hydrogen in power-to-X pathways: techno-economic and environmental assessment. *Applied Energy*, 359, 122772. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.122772>
- Similä, J., & Wallen, H. (2023). Mining law and justice in Finland. *Arctic Review of Law and Politics*, 14.
- Sorsa, M. (2025). *Energiayhteisöjen kasvun hidasteet suomalaisessa taloyhtiöasumisessa*. Opinnäytetyö. XAMK Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu.
- Sovacool, B. K. (2019). *Visions of energy futures*. Routledge.
- Sovacool, B. K., Martiskainen, M., Hook, A., & Baker, L. (2019). Decarbonization and energy justice. *Climatic Change*, 155(4), 581–619. <https://doi.org/10.1007/s10584-019-02521-7>
- SULPU. (2026). Lämpöpumppujen myynti palasi kasvu-uralle – kasvua noin 10 % vuonna 2025. Helsinki: Suomen Lämpöpumppuyhdistys SULPU ry.
- Suomen Uusiutuvat. (2019). *PPA, pitkäaikaiset sähkönostosopimukset -infopaketti*. <https://suomenuusiutuvat.fi/ppa-pitkaaikaiset-sahkonostosopimukset-infopaketti/>
- Turvallisuus- ja kemikaalivirasto. (2023). Vastuullisuusraportti 2023. <https://tukes.fi/vastuullisuusraportti-2023>
- Tilastokeskus. (2024). *Electricity production and consumption statistics*. <https://stat.fi>
- TEK. (2022). *Graduate survey 2022*. <https://www.tek.fi/fi/tietoa-tekista/tutkimus/tek-tutkii-opiskelijat/tek-graduate-survey-2022>
- TEM. (2023). Hallitus hyväksyi periaatepäätöksen vedystä - Suomella edellytykset valmistaa 10 prosenttia EU:n vihreästä vedystä 2030. Tiedote. <https://valtioneuvosto.fi/-/1410877/hallitus-hyvakysyi-periaatepaatoksen-vedysta-suomella-edellytykset-valmistaa-10-prosenttia-eu-n-vihreasta-vedysta-2030>
- Tiago, L., May, R., & Francesca, V. (2018). Wind energy impacts on biodiversity. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 23, 2007–2023.
- Tolvanen, A., Routavaara, H., Jokikokko, M., & Rana, P. (2023). Wildlife displacement from wind energy. *Biological Conservation*, 288, 110382.
- UNECE (2021). *Life Cycle Assessment of Electricity Generation Options*.
- UN. (2021). *Energy transition report*.
- Vakulchuk, R., Overland, I., & Scholten, D. (2020). Renewable energy geopolitics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 122, 109547.
- Vakulchuk, R., & Overland, I. (2024). Energy education and decarbonization failure. *Energy Research & Social Science*, 110, 103446.
- Valtioneuvosto (2021). Valtioneuvoston periaatepäätös 8.4.2021 kiertotalouden strategisesta ohjelmasta.
- Valtioneuvosto. (2026a). Ydinvoiman edistämismisselvitys kuvaa ydinvoiman lisäämisen tavat ja taloudellisuuden sekä arvioi edistämiskeinoja ja niiden vaikutuksia. <https://valtioneuvosto.fi/-/1410877/ydinvoiman-edistamisselvitys-kuvaa-ydinvoiman-lisaamisen-tavat-ja-taloudellisuuden-seka-arvioi-edistamiskeinoja-ja-niiden-vaikutuksia>
- Valtioneuvosto. (2026b). Ydinenergiain uudistus toisi ydinlaitossääntelyn nykypäivään ja sujuvoittaisi uusien ydinenergiainvestointien valmistelua. <https://valtioneuvosto.fi/-/1410877/ydinenergiain-uudistus-toisi-ydinlaitossaanntelyn-nykypaivaan-ja-sujuvoittaisi-uusien-ydinenergiainvestointien-valmistelua>
- Van Bommel, N., & Höffken, J. I. (2021). Energy justice within, between and beyond European community energy initiatives: A review. *Energy Research & Social Science*, 79, 102157.

- Vasström, M., Rudolph, D. P., Lysgård, H. K., & Clausen, L. T. (2024). Wind energy governance. *Norsk Geografisk Tidsskrift*, 78(3), 148–165.
- Vatankhah Ghadim, H., Haas, J., Breyer, C., Gils, H. C., Read, E. G., Xiao, M., & Peer, R. (2025). *Cost projections for solar PV, wind, and batteries*. Applied Energy.
- Vernay, A. L., Sebi, C., & Arroyo, F. (2023). Energy community business models. *Energy Policy*, 175.
- Veronesi, F., Huijbregts, M. A. J., Azevedo, L. B., Chaudhary, A., Cosme, N., de Baan, L., Dong, Y., Fantke, P., Hauschild, M. Z., Henderson, A. D., Joliet, O., Kounina, A., Laurent, A., Mutel, C. L., Núñez, M., Pfister, S., Roy, P.-O., Sala, S., Steinmann, Z. J. N., & van Zelm, R. (2022). LC-IMPACT: A regionalized life cycle damage assessment method including impacts on biodiversity (version 1). *Ecological Indicators*, 142, 109190. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109190>
- Vipunen. (2026). <https://vipunen.fi>
- Walker, G., & Devine-Wright, P. (2008). Community renewable energy. *Energy Policy*, 36, 497–500.
- Walker, G., Devine-Wright, P., Hunter, S., High, H., & Evans, B. (2010). Trust and community in renewable energy. *Energy Policy*, 38(6), 2655–2663.
- Wigell, M., Deschryvere, M., Fjäder, C., Pursiainen, C., & Jokela, J. (2022). *Europe facing geoeconomics: Assessing vulnerabilities and strategies in the global economy*. Prime Minister's Office of Finland.
- Wittmayer JM, Avelino F, Pel B, Campos I. (2021). Contributing to sustainable and just energy systems? The mainstreaming of renewable energy prosumerism within and across institutional logics. *Energy Policy*. 2021 Feb 1;149. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.112053>
- Wolf, S., & Blesl, M. (2016). Model-based quantification of the contribution of industrial heat pumps to the European climate change mitigation strategy. *ECEEE Ind. Summer Study Proc*, 477–488.
- World Nuclear News. (2024). *Constellation to restart Three Mile Island unit, powering Microsoft*. <https://www.world-nuclear-news.org/articles/constellation-to-restart-three-mile-island-unit-powering-microsoft>
- World Nuclear News. (2025a). *KHNP sets out plans for USD18.6bn Czech nuclear project*. <https://www.world-nuclear-news.org/articles/khnp-sets-out-plans-for-usd186bn-czech-nuclear-project>
- World Nuclear News. (2025b). *Second phase of Nuward review completed*. <https://www.world-nuclear-news.org/articles/second-phase-of-nuward-review-completed>
- World Nuclear News. (2026a). *Nuclear central in France's latest energy strategy*. <https://www.world-nuclear-news.org/articles/nuclear-central-in-frances-latest-energy-strategy>
- World Nuclear News. (2026b). *Application lodged for Poland's first nuclear power plant*. <https://www.world-nuclear-news.org/articles/application-lodged-for-polands-first-nuclear-power-plant>
- World Nuclear News. (2026c). *Sweden proposes steps to facilitate new nuclear projects*. <https://www.world-nuclear-news.org/articles/sweden-proposes-steps-to-facilitate-new-nuclear-projects>
- World Nuclear News. (2026d). *Construction of Steady Energy pilot plant begins*. <https://www.world-nuclear-news.org/articles/construction-of-steady-energy-pilot-plant-begins>
- WWF. *Living Planet Report 2024 – A System in Peril*. Gland, Switzerland: 2024.
- Wüstenhagen, R.; Wolsink, M.; Bürer, M.J. (2007). Social acceptance of renewable energy innovation: An introduction to the concept. *Energy Policy* 2007, 35, 2683–2691.
- Yle. (2025). Olkiluodon vanhojen voimaloiden käyttöikää voi jatkaa – ministeriö ei näe haitallisia vaikutuksia ympäristöön. <https://yle.fi/a/74-20155431>
- Zimm, C., Mintz-Woo, K., Brutschin, E., Fuso Nerini, F., Holz, C., Kartha, S., & Somanathan, E. (2024). Justice considerations in climate research. *Nature Climate Change*, 14(1), 22–30. <https://www.nature.com/articles/s41558-023-01869-0>

