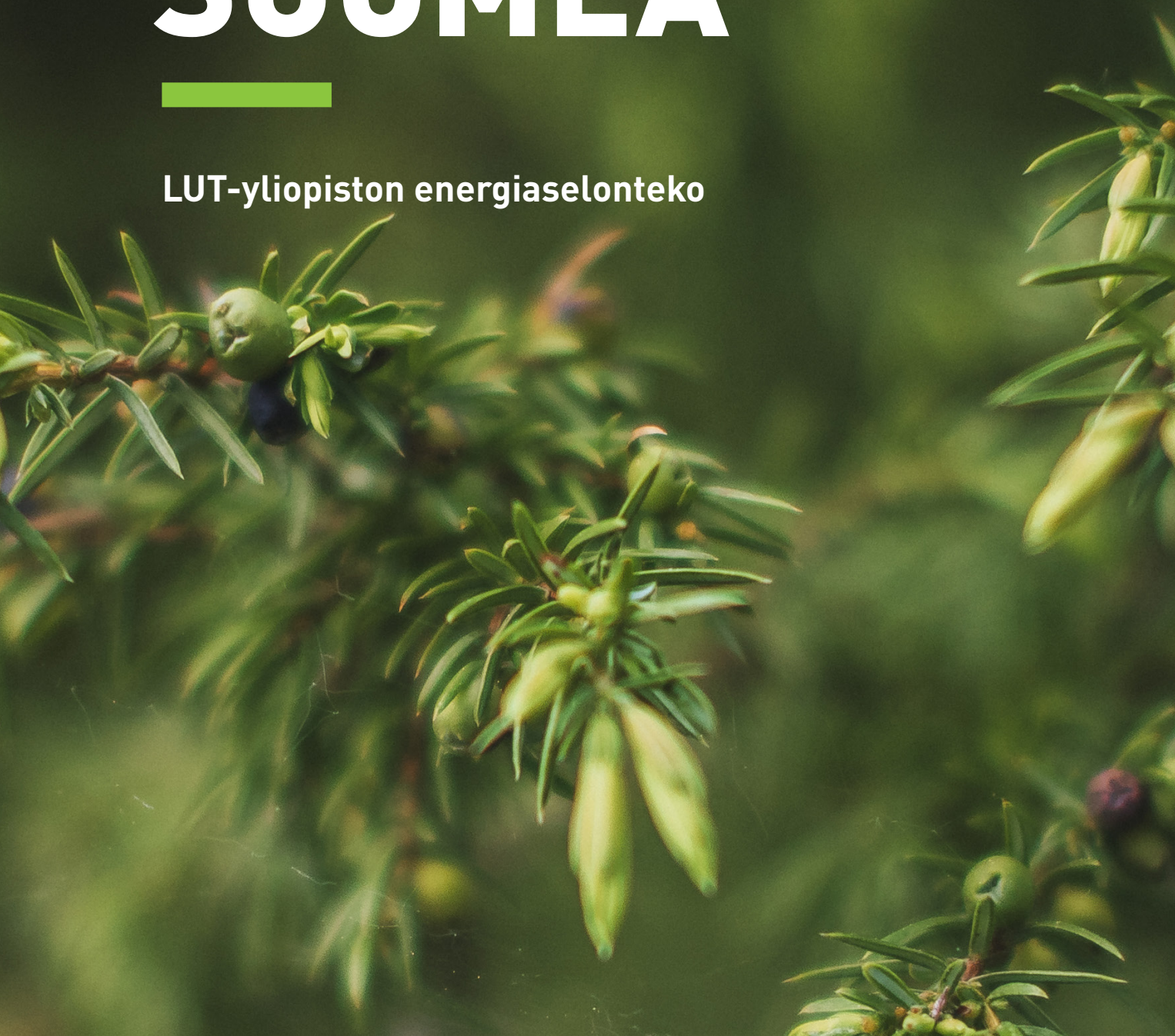


KOHTI HIILI- NEUTRAALIA SUOMEA

LUT-yliopiston energiaselonteko





KOHTI HIILI- NEUTRAALIA SUOMEA

LUT-yliopiston
energiaselonteko 5/2022

TEKSTIT:

Timo Hyppänen (toim.),
Jero Ahola, Eeva-Lotta Apajalahti,
Jouni Havukainen, Samuli Honkapuro,
Mika Horttanainen, Juhani Hyvärinen,
Juha Kaikko, Hannu Karjunen,
Pertti Kauranen, Petteri Laaksonen,
Jukka Lassila, Olli Pyrhönen, Tapio Ranta,
Jouni Ritvanen, Risto Soukka,
Teemu Turunen-Saaresti, Tero Tynjälä
ja Esa Vakkilainen.

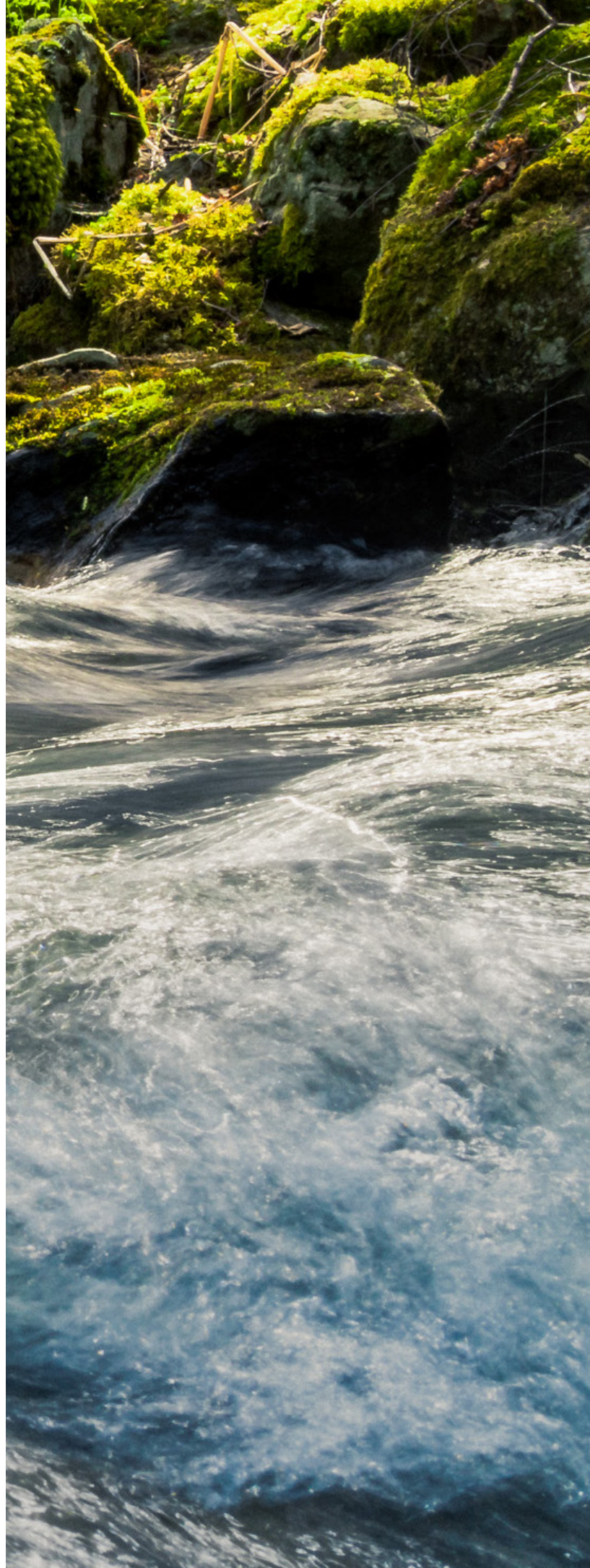
LISÄTIETOJA:

media@lut.fi
etunimi.sukunimi@lut.fi
lut.fi/energiaselonteko

Raportit ja selvitykset – Reports,
ISSN-L 2243-3384, ISSN 2243-3384
Järjestysnumero sarjassa: 117

Painettu julkaisu:
ISBN 978-952-335-829-4

Sähköinen julkaisu:
ISBN 978-952-335-830-0 (PDF)



SISÄLLYSLUETTELO

ALKUSANAT

Teksti Olli Pyrhönen7

TIIVISTELMÄ

Teksti Eeva-Lotta Apajalahti ja Timo Hyppänen8

1 JOHDANTO

Teksti Timo Hyppänen ja Eeva-Lotta Apajalahti10

2 NÄKEMYKSIÄ ENERGIAJÄRJESTELMÄN TULEVAISUUDESTA

Teksti Esa Vakkilainen ja Timo Hyppänen12

2.1 Kansainvälisiä näkemyksiä14

2.1.1 IPCC14

2.1.2 EU16

2.1.3 Pohjoismaat16

2.2 Kansallisia näkemyksiä17

3 ENERGIAJÄRJESTELMÄN VAIHTOEHDOT 19

3.1 Sähköntuotannon ilmastonmuutos- ja terveysvaikutukset

Teksti Jouni Havukainen ja Esa Vakkilainen20

3.2 Kustannukset

Teksti Timo Hyppänen ja Jouni Ritvanen21

3.3 Fossiilinen energia

Teksti Esa Vakkilainen24

3.3.1 Hiili24

3.3.2 Öljy25

3.3.3 Maakaasu25

3.3.4 Turve25

3.4 Biomassa

Teksti Tapio Ranta25

3.5 Ydinvoima	
Teksti Juhani Hyvärinen	26
3.6 Vesivoima	
Teksti Esa Vakkilainen	27
3.7 Tuulivoima	
Teksti Petteri Laaksonen	27
3.8 Aurinkoenergia	
Teksti Jero Ahola	28
3.9 Jätteen energiahyötykäyttö	
Teksti Mika Horttanainen	29
3.10 Geoterminen energia ja maalämpö	
Teksti Tero Tynjälä	30
3.11 Vetytalous	
Teksti Pertti Kauranen.....	30
3.12 Hiilidioksidin talteenotto, hyötykäyttö ja varastointi	
Teksti Jouni Ritvanen	31
3.13 Energiansäästö ja energiatehokkuus	
Teksti Jero Ahola ja Esa Vakkilainen	32
3.14 Kulutusjoustot	
Teksti Samuli Honkapuro ja Jukka Lassila	33
3.15 Energiavarastot	
Teksti Pertti Kauranen ja Teemu Turunen-Saaresti	33
3.16 Energiankantajien varastointi ja siirto	
Teksti Tero Tynjälä ja Hannu Karjunen	34
4 SUOMEN ENERGIAJÄRJESTELMÄ TULEVAISUUDESSA	36
4.1 Sähkö	
Teksti Esa Vakkilainen	38
4.2 Lämpö	
Teksti Juha Kaikko	39



4.3. Energiantuotannon ja -kulutuksen tasapaino	
Teksti Timo Hyppänen	40
4.4 Sektori-integraatio	
Teksti Tero Tynjälä	40
4.5 Infrastrukturi	
Teksti Tero Tynjälä ja Hannu Karjunen	41
4.6 Liikenne	
Teksti Teemu Turunen-Saaresti	42
4.7 Teollisuus	
Teksti Esa Vakkilainen	43
4.8 Energiamarkkinat	
Teksti Samuli Honkapuro, Jero Ahola ja Esa Vakkilainen	44
4.9. Investoinnit	
Teksti Petteri Laaksonen	44
4.10 Suomen energiajärjestelmän tulevaisuuden suunnat	45
4.10.1 Vaihtelevan uusiutuvan energian rooli	
Teksti Petteri Laaksonen	46
4.10.2 Ydinvoiman rooli	
Teksti Juhani Hyvärinen	47
4.10.3 Biomassan rooli	
Teksti Tapio Ranta	44
4.11 Suomalaisen hiilineutraaliusosaamisen vientimahdollisuudet	
Teksti Risto Soukka	48
YHTEENVETO	
Teksti Timo Hyppänen ja Eeva-Lotta Apajalahti	49
LÄHDELUETTELO	53

ALKUSANAT

NYKYINEN elämäntapamme ja hyvinvointimme ovat kehittyneet suotuisasti fossiilisilla energialähteillä tuotetun edullisen energian avulla. Viime vuosikymmeninä fossiilisen energian käytön haitat elinympäristöllemme ja maapallon ilmastolle ovat kuitenkin tulleet ilmeisiksi. Samalla on syntynyt tarve muuttaa energia-politiikan suuntaa kaikkialla maailmassa niin, että kasvihuonekaasupäästöjä vähennetään voimakkaasti. Myös Suomi pyrkii kohti hiilineutraalia yhteiskuntaa.

Uuteen energiatekniikkaan kohdistuu poliittisessa keskustelussa suuria toiveita. Erityisesti uusiutuvan energian teknologia ja tuotanto ovat kehittyneet odotuksia nopeammin. Kuitenkin valtaosa maapallon energiankäytöstä perustuu edelleen fossiilisiin energialähteisiin – öljyyn, maakaasuun ja kivihiiileen. Näiden korvaaminen hiilivapailla energialähteillä onkin valtava urakka, joka vaatii pitkän siirtymäajan ja massiivisen rahoituksen. Ilmasto- ja ympäristönäkökulmien lisäksi energijärjestelmän muutoksessa on huomioitava sen talousvaikutukset ja luotettavuus koko siirtymän ajan.

Yhteiskuntien energijärjestelmät rakentuvat sekä julkisista että yksityisistä investoinneista. Energijärjestelmä on yhteiskuntaa ylläpitävä järjestelmä, joka

ei voi kehittyä pelkästään markkinaehtoisesti. Poliittisia päätöksiä ja lainsäädäntöä tarvitaan, kun asetetaan tavoitteita ja reunaehtoja. Poliitikoilla on suuri vastuu energiatulevaisuudesta.

Energiajärjestelmä on monimutkainen ja teknisesti vaativa kokonaisuus. Uudet teknologiat ja sektori-integraatio teollisuuden eri toimintojen välillä mutkistavat kokonaisuutta edelleen. Toisinaan kokonaisuus jää energiapolitiisessa keskustelussa hahmottumatta, kun huomio kiinnittyy yksittäisten teknologioiden tarkasteluun eikä nähdä metsää puilta.

Tämä raportti pyrkii kuvaamaan erilaisia energiateknologioita sekä niiden käyttömahdollisuuksia ja haasteita osana Suomen tulevia energiaratkaisuja. Kerrontatapa on valittu siten, että asiasta saa riittävän käsityksen myös ilman energia-alan koulutusta. Raportin laatimiseen on osallistunut laaja joukko LUT-yliopiston energijärjestelmien tiedekunnan asiantuntijoita. Raportin tavoitteena ei ole ohjata teknologiaratkaisuja tiettyyn suuntaan vaan kertoa tosiasioita erilaisista ratkaisuista.

Toivomme raportin tukevan poliittista ja yhteiskunnallista keskustelua Suomen hiilineutraalin energiatulevaisuuden pohdinoissa.

TIIVISTELMÄ

SUOMI on sitoutunut tavoittelemaan hiilineutraalia energiajärjestelmää. Siirtyä sitä kohti on meneillään, sillä erilaisten vähähiilisten tuotantomuotojen osuudet ovat kasvaneet sekä esimerkiksi hiilen ja maakaasun osuudet energiantuotannosta ovat pienentyneet merkittävästi. Suomi on ollut perinteisesti vahvoilla uusiutuvan energian käytössä, koska puupohjaisten polttoaineiden osuus on ollut suuri. Silti merkittävä osa Suomen energiasta tuotetaan edelleen fossiilisilla energialähteillä.

Energiajärjestelmä on ollut kautta historian jatkuvassa kehityksessä. Viime aikoina ilmastomuutoksen hillitseminen on nostanut hiilineutraaliuden suurimmaksi yksittäiseksi tavoitteeksi energiajärjestelmän kehittämisessä, mikä vaikuttaa suuresti tähänhetkiseen päätöksentekoon. Hiilineutraaliuden lisäksi muutoksessa on otettava huomioon kaksi muuta erityisen tärkeää ja jatkuvaa yhteiskunnallista tavoitetta, jotka ovat energiajärjestelmän huolto- ja toimitusvarmuus sekä kustannustehokkuus.

Tulevaisuuden energiajärjestelmään vaikuttavat monet odotukset ja rinnakkaiset kehityssuunnat. Sellaisia ovat esimerkiksi uusien energialähteiden tulo markkinoille ja niiden integrointi järjestelmään, sähköistymisen eteneminen, energiateknologioiden kehitys ja kustannustehokkuuden muutokset, energiavarastoinnin merkityksen kasvu, hiilidioksidin talteenoton kehitys sekä vetytaloutta koskevat suunnitelmat. Mahdollisia kehityssuuntia on lukuisia, eivätkä ne poissulje toisiaan. Ne kuitenkin luovat energiajärjestelmään liittyvälle päätöksenteolle tieteelliseen tietoon pohjautuvia, kiireellisiä tiedontarpeita ja haasteita, sillä joudutaan tekemään päätöksiä, jotka luovat samanaikaisesti edellytyksiä useiden, osittain ristiin vaikuttavien tavoitteiden saavuttamiselle.

Tämä selonteko antaa selkeän ja laaja-alaisen kuvan Suomen energiajärjestelmän tilasta ja keskeisistä kehityssuunnista. Se tarjoaa lukijalle yleistajuista perustietoa erilaisista energiantuotantotavoista, energian varastoinnista, energiatehokkuudesta ja -säästöistä sekä energiajärjestelmän kokonaisuudesta, johon kuuluu myös järjestelmäintegraatio. Se pyrkii vastaamaan edellä mainittuihin tiedontarpeisiin sekä tuomaan esiin perustietoa erilaisista energiantuotantotavoista, energiajärjestelmän tämänhetkisestä

tilasta ja tulevista kehityssuunnista. Selonteko on tarkoitettu kaikille energiajärjestelmän kehityssuunnista kiinnostuneille, ja se pyrkii luomaan kokonaiskuvan energiajärjestelmän kehittämiseen liittyvistä tekijöistä. Selonteon kirjoittamiseen on osallistunut 19 oman alansa asiantuntijaa LUT-yliopiston energiajärjestelmien tiedekunnasta.

Selonteko alkaa lyhyellä yhteenvedolla julkisten organisaatioiden näkemyksistä, jotka koskevat energiajärjestelmien tulevaisuuden kehityssuuntia ja skenaarioita. Näistä keskeisimpinä tarkasteluun on valittu hallitustenvälisen ilmastomuutospaneelin IPCC:n, EU:n, Pohjoismaisen ministerineuvoston

energiatutkimusorganisaation (NER) sekä Suomen ilmasto- ja energiastrategian näkemyksiä ja skenaariolaskelmia. Näkemykset sisältävät samat energiajärjestelmiin liittyvät peruselementit, mutta ne pitävät osittain myös sisällään suuren määrän erilaisia tulevaisuusskenaarioita. Esimerkiksi IPCC:n tarkastelemissa arviointimalleissa on yli 2500 skenaariota.

Selonteossa tuodaan esiin perustietoa kaikkien Suomessa keskeisten energiantuotantotapojen teknologioista ja niiden ominaispiirteistä, joissa näkökulmina ovat tuotantotavan kestävyys sekä yhteiskunnan eri tarpeet. Tämän lisäksi tarkastellaan muun muassa



Selonteko on tarkoitettu kaikille energiajärjestelmän kehityssuunnista kiinnostuneille, ja se pyrkii luomaan kokonaiskuvan energiajärjestelmän kehittämiseen liittyvistä tekijöistä.

energiajärjestelmän kustannuksia, vetytaloutta, hiilidioksidin talteenottoa ja hyötykäyttöä, energian varastointia ja energiakantajia sekä energiatehokkuutta, energiansäästöä ja kulutusjoustoa. Tarkoituksena on antaa lukijalle mahdollisimman laaja perustietämys energiajärjestelmän keskeisimmistä teknologioista ja kehityksen kannalta merkittävimmistä osatekijöistä.

Eri energiatuotantomuotojen ja keskeisten teknologioiden esittelyn lisäksi selonteossa käydään läpi energiajärjestelmän kokonaisuutta ja erilaisia tulevaisuuden suuntien painotuksia. Tämänhetkistä energiajärjestelmän tilaa tarkastellaan erityisesti sähkön ja lämmön osalta, mutta lyhyesti myös teollisuuden ja liikenteen näkökulmista. Lisäksi käydään läpi kolmen tärkeimmän energiamuodon merkitystä ja roolia kansallisen energiajärjestelmän kehityksessä. Suomen energiajärjestelmän kehityksen tärkeimmät energiamuodot ovat vaihteleva uusiutuva energia, ydinvoima ja biomassa. Tämän lisäksi selonteossa kerrotaan järjestelmäintegraation kannalta tärkeistä kokonaisuuksista, kuten sektori-integraatiosta, järjestelmän inf-

rastruktuurista, energiemarkkinoiden toimivuudesta ja järjestelmätason investoinneista sekä Suomen hiilineutraalisuusosaamiseen liittyvistä vientimahdollisuuksista.

Suomen energiajärjestelmän kehittämisen keskeisimmät kysymykset liittyvät tällä hetkellä vaihtelevaan uusiutuvaan energiaan, erityisesti tuulivoimaan. Sillä on tärkeä rooli monien toimialojen energiankulutuksen muuttamisessa hiilineutraaliksi, ja sen määrä kasvaa lähivuosina merkittävästi. Kun tuulioloista riippuvan, vaihtelevan tuotannon osuus kasvaa, edellyttää toimintavarmuuden takaaminen merkittäviä rakenteellisia muutoksia ja järjestelmän kehittämistä, jotta tuotannon ja kulutuksen välinen tasapaino voidaan ylläpitää kaikissa olosuhteissa. Tärkeimpiä keinoja ovat eri aikajänteiden energiavarastot, sääoloista riippumattomat ja säädettävät energiantuotantomuodot, tehoreservit, kulutusjoustot ja eri sektorien välinen integraatio. Tässä selonteossa pyritään antamaan perustieto tämän kokonaisuuden hahmottamiseksi ja eri osatekijöiden ymmärtämiseksi.

1 JOHDANTO

VALTIONEUVOSTO on valmistellut hallitusohjelman mukaista Suomen ilmasto- ja energiastrategiaa vuodesta 2020 alkaen. Sen osana on tehty selvitys ilmasto- ja energiapolitiikan toimista ja vaikutuksista. Strategian taustalla vaikuttavat muun muassa EU:n vuodelle 2030 asettamat ilmasto- ja energiatavoitteet, hallitusohjelman *Hiili-neutraali Suomi 2035* -tavoite sekä tarve EU:lle toimittavista kansallisista energia- ja ilmastosuunnitelman (NECP) päivityksistä. Erityisesti ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi syntynyt energiamurros on olosuhteiden ja teknologian kehittyessä jatkuvassa muutoksessa. Siksi energiastrategiaa ja -järjestelmiä tulee kehittää myös tulevaisuuden hallitusohjelmissa. Samoin myös yhteiskunnan eri toimijoiden täytyy ottaa huomioon muutokset ja mahdollisuudet omissa energiasuunnitelmissaan ja mahdollisissa investoinneissaan.

Energiajärjestelmiin liittyvä vihreä siirtymä on keskeinen pilari Suomen kestävässä kasvun ohjelmassa. Sen tarkoituksena on sekä vauhdittaa päästöjen vähentämistä että tukea kansallisia hiilineutraalius- ja kiertotaloustavoitteita. Tavoitteena on myös nostaa energiajärjestelmiin liittyvän teknologian ja osaamisen tasoa Suomessa, edistää liiketoimintaa, parantaa energiatehokkuutta sekä nopeuttaa siirtymää fossiilittomaan liikenteeseen ja lämmitykseen. Esimerkkeinä ohjelman sisällöstä mainitaan muun muassa aurinkovoima, merituulivoima, biokaasu sekä hukkalämmön talteenottoa sisältävät hankkeet. Näiden lisäksi perinteiset energiantuotantomuodot ovat edelleen mukana energiajärjestelmässä. Ydinvoiman osuus on kasvussa, kun Olkiluodon uusi yksikkö tuottaa sähköä verkkoon. Fossiilisten polttoainien osuus on vähentymässä, mutta se on kuitenkin vielä merkittävä. Suomen kansallinen erityispiirre on suuri bioenergian määrä.


Energiajärjestelmä on kokonaisuudessaan hyvin monimutkainen ja pitää sisällään monenlaisia teknisiä elementtejä ja käsitteitä, joiden hahmottaminen ilman perin pohjaista paneutumista on vaikeaa. Lisäksi tilannetta monimutkistavat energiamuotojen tuotannon ja kulutuksen eritahtisuus sekä sitä tasoittavat tekijät, joilla voidaan tasata energiajärjestelmässä lisääntyvää tuotannon nopeaa vaihtelua. Energiajärjestelmiin liittyvistä tiedoista ja näkemyksistä sekä eri tilanteisiin sopivista ratkaisuista on monenlaisia tarpeita eri tasoilla.



Selonteossa kuvataan energiateknisiä ratkaisuja niistä näkökulmista, jotka liittyvät teknologioita koskevaan päätöksentekoon sekä Suomen ilmasto- ja energiastrategian tavoitteiden saavuttamiseen.

Yliopistojen tehtäviin kuuluu opetuksen ja tutkimuksen lisäksi yhteiskunnallinen vaikuttaminen. Tätä tehtävää toteuttaakseen LUT-yliopisto on tuottanut tämän energiaselonteon, jossa kerrotaan energiajärjestelmiin liittyvistä keskeisistä aiheista. Selonteon taustalla on joukko laajasti energiajärjestelmien eri aihepiireissä toimivia tutkijoita ja tutkimusryhmiä, jotka seuraavat, tutkivat ja kehittävät oman alansa teknisiä ratkaisuja tieteelliseen tietoon perustuen. Tässä selonteossa tutkijoiden tavoitteena on esittää oman osaamisalueensa käsitteitä, teknisiä vaihtoehtoja ja niiden ominaisuuksia yleistajuisella ja tiiviillä kuvauksella, jotta lukija voi muodostaa selkeän käsityksen yksittäisestä aiheesta tai kokonaisuudesta kohtuullisella paneutumisella. Selonteon rakenteen avulla voi myös paneutua johonkin aihepiiriin tarkemmin eri tieteenalojen asiantuntijoiden tuella, mikäli asian tärkeys sitä edellyttää.

Energiakysymykset asettuivat Euroopassa uuteen valoon Venäjän hyökättyä Ukrainaan helmikuussa 2022. Suomen energiajärjestelmän näkökulmasta Ukrainan sota ja Venäjää vastaan asetetut pakotteet vaikuttavat Venäjältä Suomeen tuotavaan öljyyn, maakaasuun ja kivihiileen, sähköön ja biopolttoaineisiin sekä Fennovoiman ydinvoimalahankkeeseen. Vielä on kuitenkin liian aikaista arvioida, miten tilanne muuttuu jo meillä olevaa energiamurrosta. On todennäköistä,



että Ukrainan sota nopeuttaa fossiilisista polttoaineista luopumista. Toisaalta sen seurauksena Eurooppaan on syntymässä merkittävä energiavaje, jonka vaikutukset tulevat ulottumaan eri muodoissaan myös Suomen energiajärjestelmään. Tilanne tuo lisähaasteita, mutta ehkä myös jossakin määrin uusia mahdollisuuksia. Tässä selonteossa ei ole kuitenkaan käsitelty Ukrainan sodan konkreettisia vaikutuksia Suomen energiajärjestelmään vaan on pitäydytty meneillään olevassa energiajärjestelmän murroksessa ja teknisissä vaihtoehdoissa, joilla pyritään saavuttamaan Suomen ilmasto- ja energiastrategian tavoitteet. Keinot fossiilisista polttoaineista luopumiseen ovat pitkälti samat Ukrainan sodasta huolimatta. Tästä johtuen selonteon sisältöä voidaan pitää pääosin toimintaympäristöstä riippumattomana energiateknisenä yleistietona, jossa tarkastellaan, mitä vaihtoehtoja Suomella on hiilineutraaliuden saavuttamiseksi.

Selonteossa on pyritty kuvaamaan energiateknisiä ratkaisuja sellaisista näkökulmista ja tarpeista, jotka liittyvät päätöksentekoon teknologiavaihtoehdoista sekä Suomen ilmasto- ja energiastrategian tavoitteisiin pyrkimiseen. Energiajärjestelmään liittyviä keskeisiä näkökulmia ovat muun muassa hiilineutraalius,

talous, teknologian taso, kestävyys, päästöt, huolto- ja toimitusvarmuus, omavaraisuus, turvallisuus, riskit, kansallinen vientipotentiaali sekä erilaiset sosiaaliset tekijät. Tarkastelukohteena on Suomen energiajärjestelmä, josta ovat mukana päästökauppasektori sekä lämpö ja liikenne. Selonteossa ei ole käsitelty maankäyttöä. Selvityksessä ei ole myöskään esitetty varsinaisia energiajärjestelmän tulevaisuusskenaarioita. Siten selonteossa ei ole yhtä selkeää aikajännettä, vaan se vaihtelee asiayhteyden mukaan nykytilanteesta vuoteen 2050.

Tämä selonteko on jaettu kolmeen päälukuun. Luvussa 2 esitetään lähinnä julkisten organisaatioiden näkemyksiä energiajärjestelmien kehityksestä niin kansallisella, pohjoismaisella, eurooppalaisella ja globaalilla tasolla. Luku 3 kuvaa hiilineutraaliuteen tähtäävän energiajärjestelmämuutoksen yksittäisiä elementtejä ja ominaisuuksia, joihin kuuluvat sähkön ja lämmön tuotantomuodot sekä muut energiajärjestelmän toiminnan ja kehittämisen kannalta tärkeät teknologiat. Luvussa 4 keskitytään energiajärjestelmän kokonaisuuteen ja järjestelmän toiminnan kannalta merkittävimpiin tekijöihin, kun siirrytään kohti hiilineutraaliutta.



2 NÄKEMYKSIÄ ENERGIAJÄRJESTELMÄN TULEVAISUUDESTA

Tässä luvussa esitellään erilaisia näkemyksiä energiajärjestelmän kehityksestä niin kansallisella, pohjoismaisella, eurooppalaisella kuin globaalilla tasolla.



Energiajärjestelmän tulevaisuuden skenaarioita ja näkymiä on eri tavalla rajattuina esitetty viime vuosina suunnaton määrä. Niissä on pääosin sisältönä samat tekniset peruselementit, mutta niiden painoarvot vaihtelevat merkittävästi eri skenaarioissa. Tulevaisuuden ratkaisuihin liittyy monenlaisia epävarmuuksia, ja niiden huomioon ottamiseksi moni skenaarioiden laatija onkin esittänyt useita vaihtoehtoisia etenemissuuntia. Tässä luvussa katsotaan lyhyesti tärkeimpiä energiajärjestelmien suuntiin liittyviä näkökohtia, joita julkiset organisaatiot ovat esittäneet.

2.1 Kansainvälisiä näkemyksiä

2.1.1 IPCC

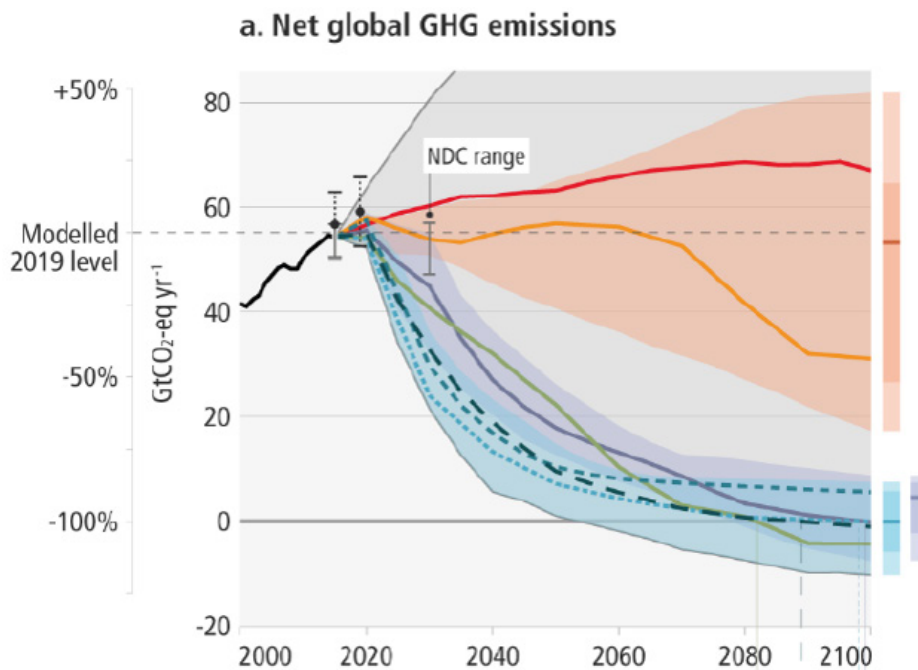
Hallitustenvälinen ilmastonmuutospaneeli IPCC on merkittävin kansainvälinen organisaatio, jossa johtavat asiantuntijat kokoavat ja arvioivat ilmastonmuutokseen liittyviä tietoja ja näkemyksiä. IPCC:n kuudennen arviointiraportin viimeisin eli kolmas osaraportti julkaistiin huhtikuussa 2022 päättäjille tarkoitetun yhteenvedon osalta (IPCC 2022). Samalla julkistettiin myös koko raportin luonnosversio.

Osaraportissa tarkastellaan, kuinka Pariisin sopimuksen tavoitteet voidaan saavuttaa eli kuinka maapallon keskilämpötilan nousu voidaan pitää selvästi alle kahdessa asteessa suhteessa esiteolliseen aikaan. Raportissa tarkastellaan myös

toimia, joilla lämpeneminen voidaan rajata alle 1,5 asteeseen. IPCC:n raportissa todetaan, että päästövähennysten pohjana olevien, kansallisten NDC-ohjelmien (Nationally Determined Contribution) toimenpiteet ovat nykyisellä tasollaan riittämättömiä ilmaston lämpenemisen rajoittamiseksi 1,5 asteeseen ja että ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi tarvitaan nopeita toimia. Tavoitteen saavuttaminen edellyttää, että kasvihuonekaasujen päästöhuippu saavutetaan viimeistään vuoteen 2025 mennessä ja että päästöjä saadaan vähennettyä 43 prosentilla vuoteen 2030 mennessä.

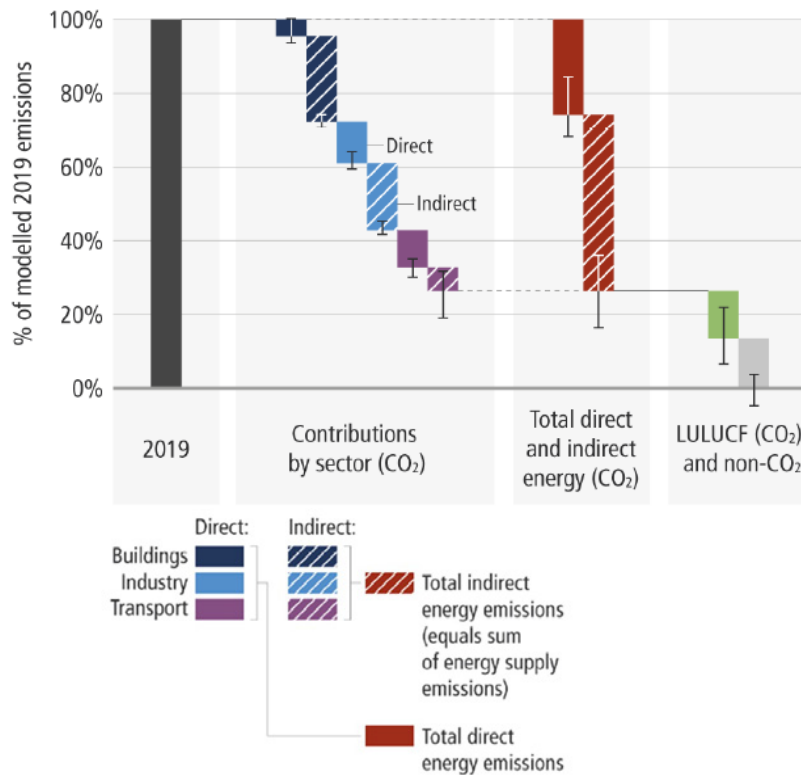
Teknisesti 1,5 asteen tavoitteen todetaan olevan edelleen mahdollista saavuttaa. Raportissa käsitellään ja esitellään yli 2 500 erilaista vaihtoehtoreittiä ja teknisten ratkaisujen yhdistelmää. Niiden joukossa on oma kategoriansa skenaarioille, joilla 1,5 asteen tavoitteeseen voidaan päästä. Kuvassa 1 esitellään eri skenaarioiden vaikutuksia päästöjen kehittymiseen tällä vuosisadalla. Tarve tehdä nopeita muutoksia nykyisiin kansallisiin ohjelmiin (kuvassa NDC range) on havaittavissa kuvasta selvästi.

Kuvassa 2 esitetään hiilineutraaliuuteen johtavien skenaarioiden keskimääräiset sektorikohtaiset osuudet päästöjen vähentämisessä. Vähennykset on jaettu kuvassa suoriin (direct) kulutuksen synnyttämiin päästöihin, jotka syntyvät käytetyistä polttoaineista, sekä epäsuoriin (indirect) päästöihin, jotka syntyvät teollisten prosessien sekä energiantuotannon, siirron ja jakelun yhteydessä.



Kuva 1. IPCC:n raportin skenaarioiden tuloksia päästöjen kehittymisestä tällä vuosisadalla (IPCC 2022). Sininen alue sisältää tulokset skenaarioille, jotka suurella todennäköisyydellä rajoittavat lämpenemisen 1,5 asteeseen. Oranssi alue kuvaa skenaarioita, jotka perustuvat COP26-kokoukseen vuoteen 2021 mennessä ilmoitettuihin kansallisten ohjelmien toimiin.

f. Contributions to reaching net zero GHG emissions (for all scenarios reaching net-zero GHGs)



Kuva 2. Hiilineutraaliuteen johtavien skenaarioiden keskimääräiset sektorikohtaiset osuudet päästöjen vähentämisessä (IPCC 2022).

Kasvihuonekaasujen vähentäminen tarkoittaa energiasektorille merkittäviä muutoksia. Hiilineutraaliin energijärjestelmään sisältyvät raportin mukaan nämä merkittävät osatekijät:

- » Fossiilisten polttoaineiden käytön olennainen vähentäminen niin sanotuissa unabated-tekniikoissa, joissa käytöstä syntyviä hiilidioksidipäästöjä ei poisteta ja varastoida niin sanotulla CCS-tekniikalla (Carbon Capture and Storage)
 - Sama muotoilu esitettiin myös COP26-kokouksen tuloksena.
 - Keskustelua on herättänyt kysymys siitä, pitäisikö tavoite laajentaa koskemaan myös voimalaitoksia, joiden hiilidioksidipäästöistä yli 90 prosenttia on tyypillisesti otettavissa talteen CCS-tekniikalla.
- » Päästöttömien teknologioiden käyttö sähköntuotannossa
- » Energijärjestelmän laaja sähköistäminen, mikä sisältää myös energian loppukäytön
- » Kestävien biopolttoaineiden sekä matalapäästöisen vedyn ja sen johdannaisen käyttö vaikeasti sähköistettävissä sovelluksissa
- » Energiansäästö ja energiatehokkuuden lisääminen
- » Energijärjestelmän toiminnallisen integraation parantaminen
- » Hiilidioksidin poisto ilmakehästä kompensationsa jäljelle jääville päästöille
 - Merkittävimpinä pidetään hiilidioksidin poistoa suoraan ilmakehästä sekä epäsuorasti biomassaan siirtyneen hiilidioksidin talteenottoa bioenergian tuotannossa syntyvästä kaasusta.

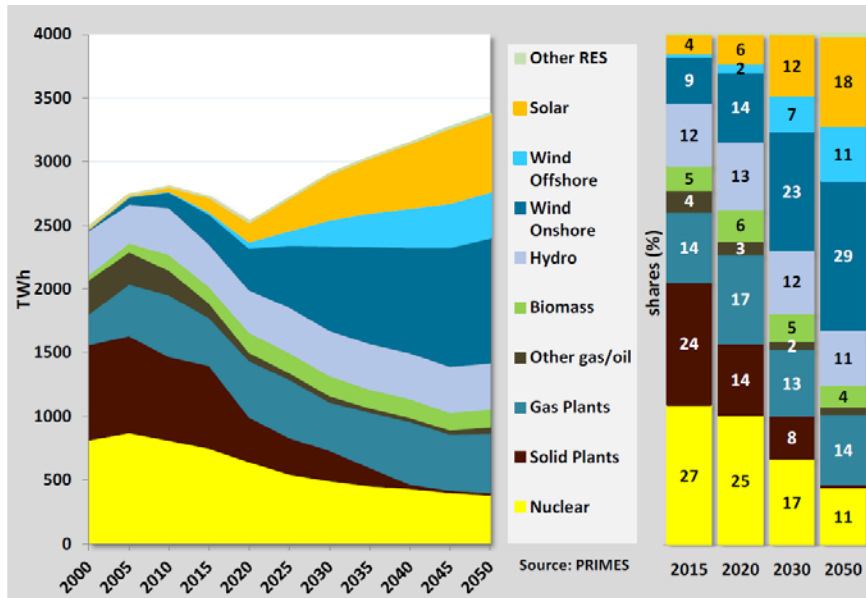
Lisäksi raportissa esitetään seuraavat energijärjestelmään liittyvät näkökohdat:

- » Tuuli- ja aurinkovoiman sekä energiavarojen hintojen lasku (esitetty kuvassa 10) on parantanut vähäpäästöisyys-taloudellista houkuttelevuutta.
- » Koko energijärjestelmää on haastavaa kattaa uusiutuvala energialla. Varsinkin suuri uusiutuvan energian osuus aiheuttaa haasteita, joiden ratkaisemiseen tarvitaan laaja joukko vaihtoehtoja. Näitä ovat muun muassa:
 - järjestelmien integrointi
 - kulutussektorien keskinäinen kytkentä
 - energiavarojen
 - älyverkot
 - kulutuksen hallinta
 - kestävä biopolttoaineet
 - elektrolyysiin perustuva vedyn tuotanto ja vedyn johdannaiset
 - muut muuttuvan energijärjestelmän edellyttämät teknologiat
- » Sellaisilla hiilidioksidin vähentämistekniikoilla, jotka ovat kustannuksiltaan alle sata dollaria yhtä hiilidioksiditonnia, voitaisiin vähentää globaalien päästöjen määrää vähintään puolella vuoden 2019 tasosta vuoteen 2030 mennessä.

2.1.2 EU

EU:n jäsenvaltiot ovat yhteisesti sitoutuneet hiilineutraaliuteen vuoteen 2050 mennessä. Osa jäsenvaltioista haluaa kuitenkin tiukempaa ja osa löyempää politiikkaa. EU on julkaissut "Green dealin" pohjaksi skenaarion vuonna 2021. On huomattava, ettei EU voi ohjata jäsenmaitaan, vaan tämä skenario toimii työkaluna. On myös todennäköistä, että fossiilisten polttoaineiden päästöalennamaa tiukennetaan tulevilla poliittisilla päätöksillä.

Raportin mukaan EU odottaa, että teollisuuden energiakäyttö sähköistyy, hiilen ja öljyn käyttö romahtaa, mutta että maakaasun käyttö pysyy merkittävänä (kuva 3). Tilanne muuttuu merkittävästi Ukrainan tilanteen kehittyessä ja EU:n luopuessa Venäjän tuottamasta energiasta.



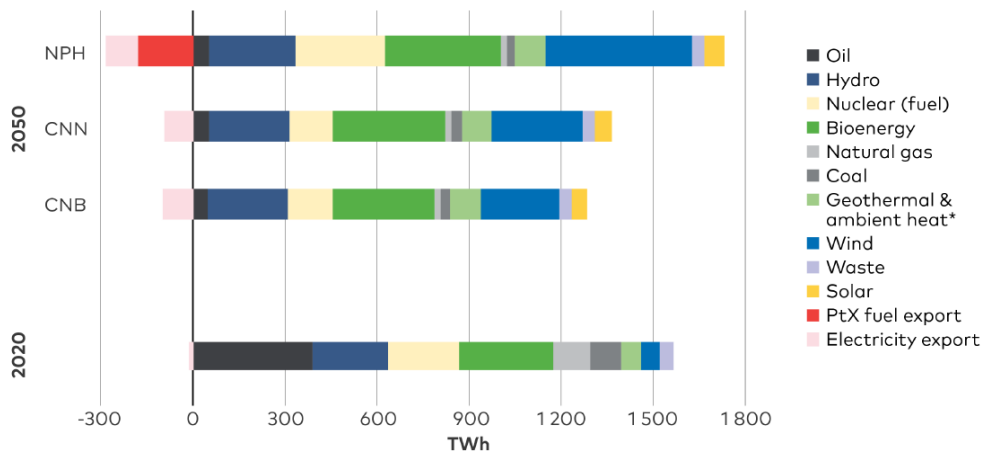
Kuva 3. Sähkön tuotanto laitoistyy (European Commission 2021).

2.1.3 Pohjoismaat

Nordic Energy Research (NER) teki Pohjoismaille vuonna 2021 ennusteen, jossa esitetään kolme eri skenaariota (Wråke ym. 2021). Mallinnuksesta vastasi VTT. Nopeimmin kasvaa tuulisähkön osuus (kuva 4).

Vesi-, ydin-, bio- ja tuulivoima ovat NERin mukaan tulevaisuuden merkittävimmät energianlähteet. Ennusteessa ennakoidaan, että sähköisestä polttoaineen tuotannosta (P2X) ja maalämmöstä (geoterminen lämpö) tulee uusia energianlähteitä.

Kaikkien skenaarioiden mukaan fossiilisten polttoaineiden käyttö energiantuotannossa on vuonna 2050 marginaalista.



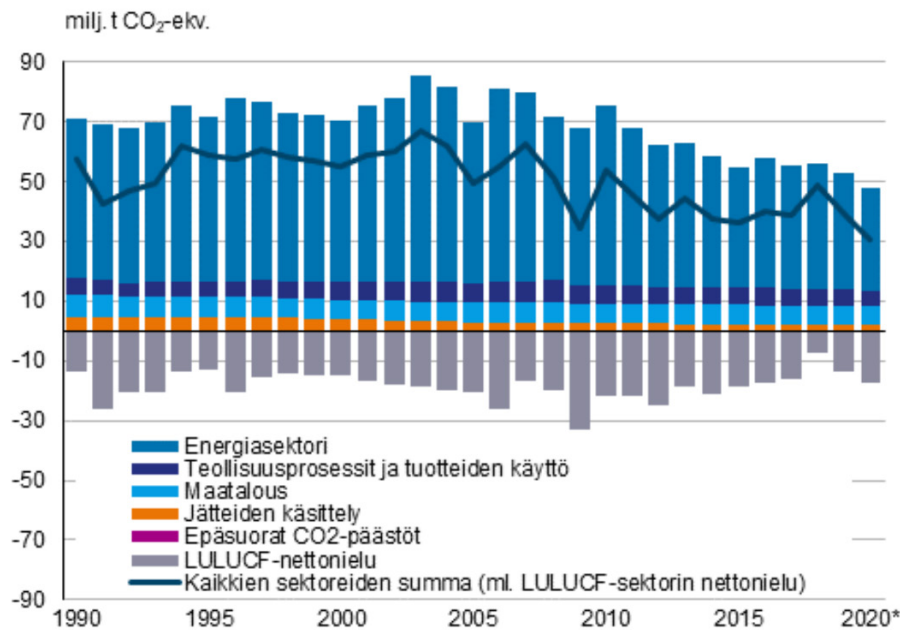
Kuva 4. Nordic Energy Research -skenaariot vuodelle 2050. Carbon Neutral Nordic (CNN), Nordic Powerhouse (NPH) Climate Neutral Behaviour (CNB) (Wråke ym. 2021).

2.2 Kansallisia näkemyksiä

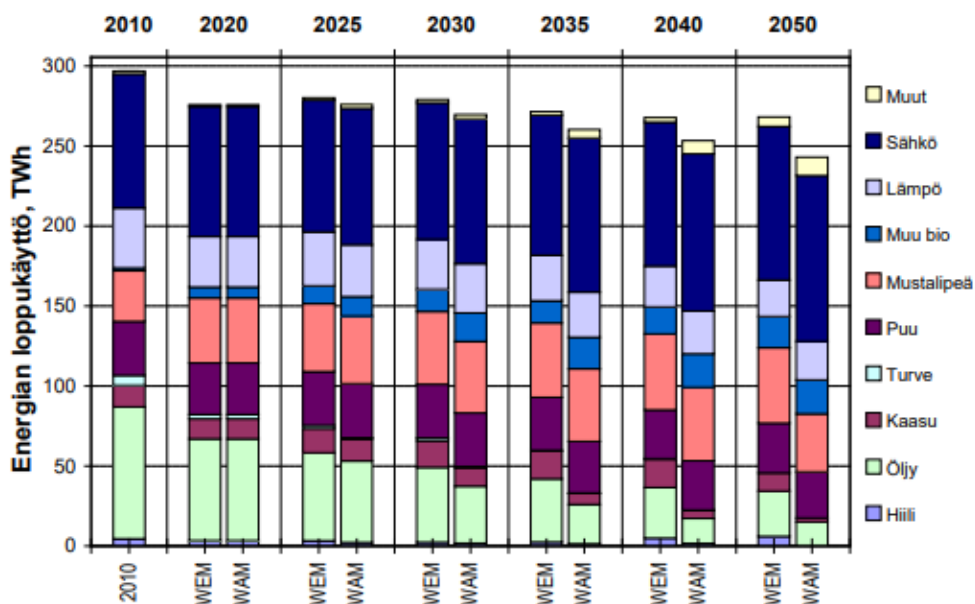
Suomen ilmasto- ja energiastrategian keskeisenä sisältönä ja tavoitteena on vähentää kasvihuonekaasupäästöjen määrää ja siirtyä kohti hiilineutraaliutta. Kuvassa 5 on esitetty Suomen kasvihuonekaasupäästöjen kehittyminen sektoreittain vuodesta 1990 alkaen. Kuvassa käytetty hiilidioksidiekvivalentti kuvaa hiilidioksidin lisäksi useiden muiden kasvihuonekaasujen lämmittävää vaikutusta ilmastoon, kun päästöjen määrä muutetaan vastaamaan hiilidioksidin laskennallista vaikutusta. Vuonna 2020 vuotuiset kokonaispäästöt ovat olleet 48,1 miljoonaa tonnia CO₂-ekv., josta valtaosa, 34,6 miljoonaa

tonnia CO₂-ekv, on peräisin energiasektorilta. Siten hiilineutraaliustavoitteen kannalta energiasektoriin ja energiajärjestelmään liittyvät kehityssuunnat ovat aivan keskeisiä.

Suomen ilmasto- ja energiastrategian osana on esitetty mallilaskelmat Suomen energiajärjestelmän ja kasvihuonekaasujen päästöjen kehityksestä. Laskelmat löytyvät niin sanotun Hiisi-hankkeen joulukuussa 2021 julkaistusta raportista, ja VTT on laatinut ne TIMES-energiajärjestelmä-



Kuva 5. Suomen kasvihuonekaasupäästöt ja -poistumat sektoreittain ja kaikkien sektoreiden summa (SVT 2021)



Kuva 6. Energian loppukäyttö skenaarioittain (Koljonen ym. 2022).

mallin perusteella. (Lehtilä ym. 2021) Analyysien pohjana on ollut kaksi skenaariota, WEM (With Existing Measures) ja WAM (With Additional Measures). WEM on nykyiseen toimintaympäristöön pohjautuva vertailuskenaario (poliittiset toimet ja päätökset 31.12.2019 asti), ja WAM-skenaario sisältää hahmotellut uudet politiikkatoimet ja ohjaukset. WAM-skenaarion voimakkaammilla toimilla ja ohjauksella pidetään mahdollisena saavuttaa hiilineutraalisuus asetetun tavoitteen mukaisesti vuonna 2035, mutta se edellyttää johdonmukaista ja pitkäjänteistä ilmasto- ja energiapolitiikkaa. Tämän lisäksi VTT (Koljonen ym. 2022) on julkaissut helmikuussa 2022 HIISI-jatkoselvityksen, jossa se esittää arviot hallituksen ilmasto- ja energiapolitiittisten päätösten riittävydestä, kun otetaan huomioon joukko hallituksen uusia ilmastokirjauksia syyskuulta 2021 (kuvat 6 ja 7).

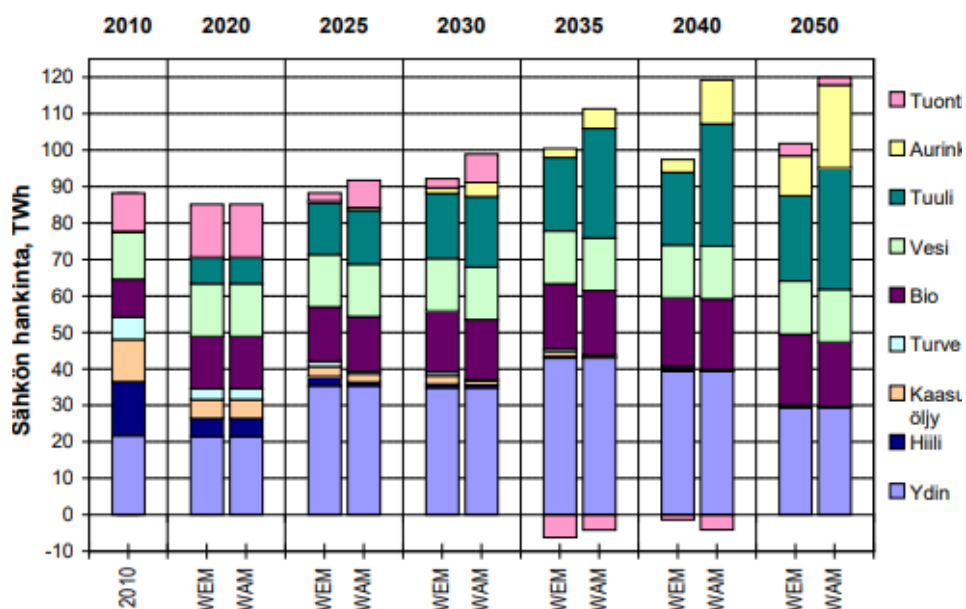
Suomen energiankulutuksen ennustetaan laskevan, kuten EU vaatii. Turpeen on oletettu poistuvan energiantuotannosta nopeasti ja hiilenkin vuoteen 2030 mennessä. Öljyn käytön odotetaan vähenevän kolmannekseen vuoteen 2050 mennessä, mutta maakaasun käytössä ei tapahdu isoja muutoksia. Puubiomassan ja mustalipeän käyttö kasvaa hieman, joitakin kymmeniä prosentteja. Tuulivoiman ja aurinkoenergian tuotanto moninkertaistuu. Uutena kasvaa lämpöpumppujen osuus.

Sähkön tuonti vähenee, kun Suomen oma tuotanto kasvaa. Ilman uusia päätöksiä ydinenergian tuotanto alkaa hiipua, kun laitoksia poistetaan käytöstä 2040- ja 2050 luvuilla. Vesi- ja biosähkön tuotanto pysynee suunnilleen ennallaan, kun taas tuuli- ja aurinkosähkön tuotanto kasvaa merkittävästi. Tuulivoimasta todetaan selvityksessä, että sen kilpailukyvyyn kehitys on viime vuosina ollut nopeaa ja että uusien voimalainvestointien kohdentumista Pohjoismaisilla markkinoilla on vaikea arvioida, minkä vuoksi myös tuloksiin sisältyy tältä

osin epävarmuutta. Pidemmällä aikavälillä teknologiaoletuksista on todettu ehkä merkittävämmäksi mahdollisuus hyödyntää hiilidioksidin talteenotto- ja varastointiteknologiaa (CCS) sekä niihin liittyvää negatiivisten päästöjen tuotantoa. WAM-skenaariossa ne voivat tulla käyttöön pääsääntöisesti vasta vuoden 2035 jälkeen.

Päästöoikeuden hinnan kehitys todetaan yhdeksi merkittävaksi epävarmuustekijäksi skenaarioiden laatimisessa. Päästöoikeuden hinnan on HIISI-hankkeen skenaarioissa oletettu nousevan lähivuosien tasosta (30–50 €/tCO₂) selvästi korkeammalle (100 €/tCO₂) vuonna 2050. Toisaalta päästöoikeuden hinta kävi tällä tasolla jo alkuvuonna 2022. Skenaariot perustuvat Euroopan komission mallinnuksen lähtöoletuksia koskeviin laskentaohjeisiin.

Valtioneuvosto on julkaissut maaliskuussa 2022 myös erillisen selvityksen vetytalouden mahdollisuuksista Suomessa (Sivill ym. 2022). Selvityksessä todetaan tarve varmistaa edellytykset teollisuuden vetytalousinvestoinneille ja vetyratkaisujen käyttöönotolle. Vetytalous nähdään myös mahdollisuutena suomalaiselle vientiteollisuudelle, mitä tukevat Suomen erityispiirteet, kuten vähähiilinen sähköntuotantokapasiteetti, suuri tuulivoiman lisärakennuspotentiaali ja vahva sähkön kantaverkko. Näitä erityispiirteitä voidaan hyödyntää vedyn ja sähköpolttoaineiden tuotannossa sekä kotimaan kysyntää että vientiä varten. Lisäksi Suomessa on suuri metsäteollisuus, jolla on merkittävä potentiaali hiilineutraalin hiilidioksidin tuottamiseksi esimerkiksi hiilivetytalojen sähköpolttoaineiden tarpeisiin. Pidemmällä tähtäimellä Suomella on mahdollisuus tuottaa vetyä ja hiilineutraaleja sähköpolttoaineita merkittävästi yli nykyisen teollisuuden ja liikenteen tarpeen. Siksi hiilineutraalien polttoaineiden tuotannosta ja siihen liittyvästä teknologiasta on myös mahdollista kasvattaa oma vientiteollisuuden haaransa.



Kuva 7. Sähkön hankinta WEM- ja WAM-skenaarioissa (Koljonen ym. 2022)

3

ENERGIAJÄRJESTELMÄN VAIHTOEHDOT

Tässä luvussa kuvataan energiasysteemin ominaisuuksia, joihin kuuluvat sähkön ja lämmön tuotantomuodot sekä muut tärkeät teknologiat.



Energiantuotannossa on syytä tiedostaa, etteivät sähkö ja lämpö ole energian hyödyntämisen kannalta samanarvoisia, sillä sähkö voidaan hyödyntää mekaanisena energiana jopa 97 prosentin hyötysuhteella ja muuttaa kokonaisuudessaan lämmöksi. Lämmön muuttamista sähköksi rajoittaa käytetyn energianmuuntoprosessin hyötysuhde, joka voi olla matalassa lämpötilassa jopa alle 10 prosenttia ja parhaimmillaankin alle 65 prosenttia. Lämpöä ei voida myöskään siirtää sähkön lailla pitkiä matkoja väliaineen pumppauskustannusten ja lämpöhäviöiden kasvun vuoksi.

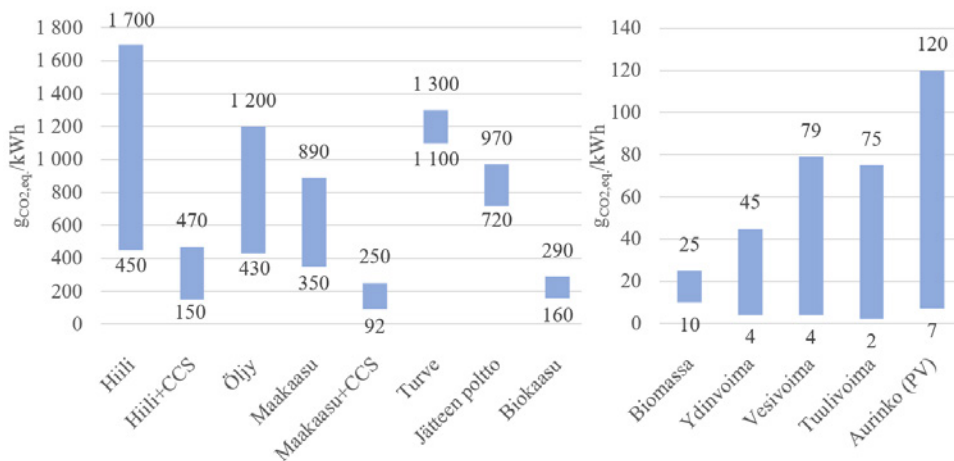
Sähkön ja lämmön yhteistuotantolaitokset ovat energiatehokkuudeltaan ylivoimaisia verrattuna vastaavan tuotantokapasiteetin erillistuotantoon. Polttoaineen energiasta saadaan yhteistuotantolaitoksissa hyödynnettyä sähköä ja lämpöä tyypillisesti yli 85 prosenttia, kun pelkästään sähköä tuottavan voimalaitoksen ja lämpöä tuottavan lämpölaitoksen tapauksessa luku on alle 60 prosenttia.

Lämpöä voidaan tuottaa sähkön avulla myös lämpöpumpuilla, jolloin voidaan hyödyntää maaperästä, ilmasta tai muusta matalalämpöisestä lähteestä saatavaa energiaa. Tällöin

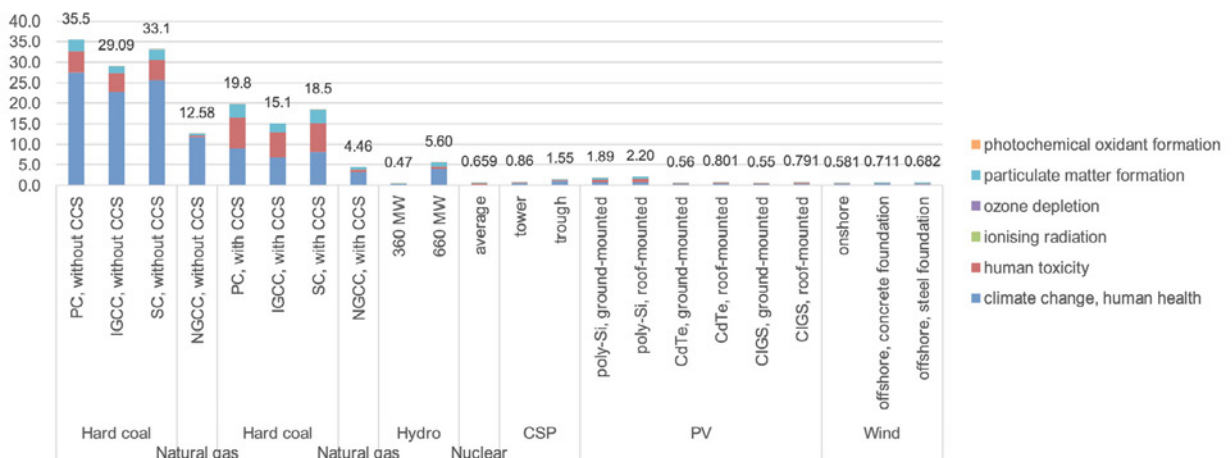
saadaan suurempi määrä lämpöä käytettyyn sähköenergiaan suhteutettuna, joten lämpöpumpuilla voidaan vähentää perinteisestä kotitalouden lämmöntuotannosta jopa yli 60 prosenttia uusiutuvalla tai hukkaenergialla.

3.1 Sähköntuotannon ilmastonmuutos- ja terveystvaikutukset

Kuvaan 8 on koottu sähköntuotannon kasvihuonekaasupäästövaikutuksia useista eri lähteistä, joista on muodostettu vaihteluväli eri teknologioille. Fossiilisilla polttoaineilla tuotetun sähkön päästöt koostuvat pääosin poltosta aiheutuvista ilmastopäästöistä. Uusiutuvan energian tuotannossa energiatuotantolaitosten rakentaminen aiheuttaa suurimmat päästöt, jolloin tuotannon lisääntyessä myös laitosten rakentamisen päästöt pienenevät. Lisäksi jos kapasiteettikerroin ja odotettavissa oleva elinikä kasvavat, voivat tuotannon elinkaaren aikaiset päästöt vähentyä merkittävästi. Jätteenpolton ja biokaasun tuotannon päästöissä on huomioitu elinkaaren aikaiset suorat päästöt, muttei sitä, että kaatopaikkakaasun muodostumisesta johtuvat metaanipäästöt vältetään, jos jätteitä ei sijoiteta kaatopaikalle.



Kuva 8: Koonti sähköntuotannon kasvihuonekaasupäästöistä (CCS=hiilen talteenotto ja varastointi) (Arvesen and Hertwich 2012; Asdrubali ym. 2015; Bruckenr ym. 2014; Ecoinvent 2019; Hertwich ym. 2015; Spath ym. 1999; Sphera 2021; UNECE 2021; Van Der Giesen ym. 2017; Whitaker ym. 2012; Ovaskainen 2017)



Kuva 9. Sähköntuotannon terveystvaikutukset, pysty akselilla yhdistetty elinikävaikutus vuosi/TWh (UNECE 2021).

Eri sähköntuotantomuodoilla on erilaisia terveysvaikutuksia (kuva 9). Voimalaitoksissa käytettävien polttoaineiden tuottaminen esimerkiksi kaivoksissa aiheuttaa terveysvaikutuksia. Polttoaineet vaikuttavat terveyteen niin pölyn, metallien kuin säteilyvaikutuksen muodossa. Eri energiantuotantomuodot aiheuttavat myös saasteita. Lisäksi ihmisen aiheuttama ilmastomuutos vaikuttaa haitallisesti väestön terveyteen.

Kuvasta 9 huomataan selvästi, että fossiiliset energiantuotantomuodot aiheuttavat terveydelle merkittävää haittaa. Vähäpäästöiset energiamuodot, kuten tuuli-, aurinko-, vesi- ja ydinvoima, aiheuttavat merkittävästi vähemmän terveysvaikutuksia (UNECE 2021).

3.2 Kustannukset

Energiajärjestelmän kustannuksia käsitellään tässä luvussa taustana myöhemmin esitettävillä yksittäisillä energiantuotantomuodoille. Sisältö liittyy olennaisesti myös järjestelmätasoon, jota käsitellään tarkemmin luvussa 4. Erityisesti järjestelmään liittyvät kustannukset ovat voimakkaasti sidoksissa luvussa 4 esitettävään energiantuotannon ja -kulutuksen väliseen tasapainoon.

Energiajärjestelmän kustannuksiin ja niiden arvioimiseen liittyy monenlaisia muutoksia, kun edetään kohti hiilineutraaliutta. Kun vaihtelevan uusiutuvan energian määrä kasvaa ja fossiilisen energian määrä vähenee, muuttuu sekä tuotantomuotojen että koko energiajärjestelmän rakenne. Järjestelmän kustannuksia voidaan tarkastella kahdella tasolla, joita ovat yksittäisten tuotantomuotojen kustannusten taso ja energiajärjestelmän kustannusten taso. Osittain nämä ovat vuorovaikutuksessa toisiinsa: esimerkiksi vaihtelevan uusiutuvan energian osuuden kasvu aiheuttaa lisää järjestelmäkustannuksia muun muassa toimitusvarmuuden ylläpitämiseen sekä energiantuotannon ja -kulutuksen tasapainottamiseen (tarkemmin luvussa 4.3). Seuraavassa tarkastellaan erityisesti sähköntuotannon kustannuksia, mutta vastaava

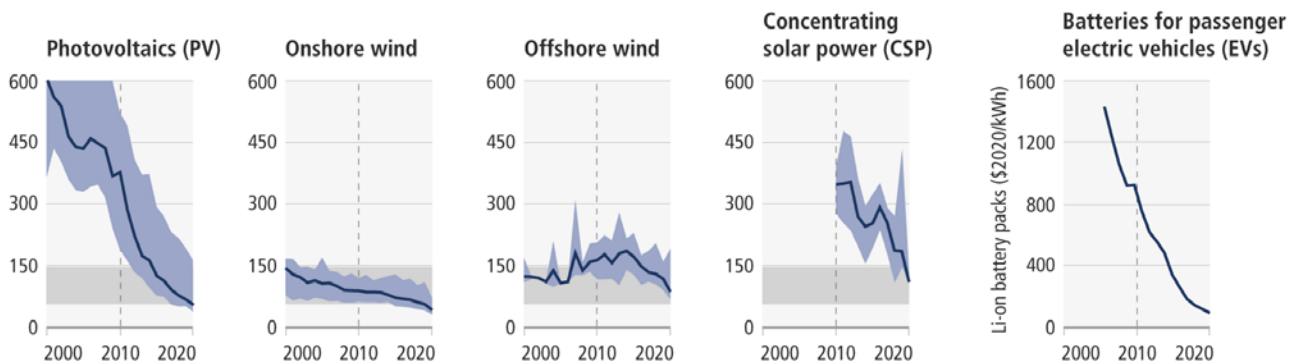
kustannusrakenne liittyy jossakin määrin myös lämmöntuotantoon energiajärjestelmän sähköistyessä.

Sähköntuotantomuotojen LCOE-kustannukset

Eri tuotantomuotoihin perustuvan sähköntuotannon kustannusten arvioinnissa käytetään yleisesti tasoitettua sähkön hintaa eli niin sanottua LCOE-kustannusta (Levelized Cost of Energy). Se on sähköenergian yksikkökustannuksen arvo tuotannollisen eliniän aikana, ja se sisältää pääomakustannukset, kiinteät ja muuttuvat käyttö- ja huoltokustannukset sekä polttoainekustannukset. Yksikkönä käytetään muotoa €/kWh tai €/MWh.

Selkeästä laskentaperiaatteestaan huolimatta LCOE-arvojen käyttö ja vertailu on usein vaikeaa, koska yksittäisenkin tuotantomuodon olosuhteet vaihtelevat alueittain. Lisäksi eri tarkastelut eroavat toisistaan sen mukaan, mitä oletuksia ja lähtötietoja niissä on käytetty. Sähköntuottajien sähkönostosopimuksista annetuissa LCOE-kustannustiedoissa on usein epäselvyyttä siitä, mitä laskennan parametreja (esimerkiksi pääomakustannukset, korkokannat, kapasiteettikertoimet, arvioitu laitosten elinaika) niissä on käytetty. Siksi on oltava hyvin varovainen, kun yksittäisiä lukuarvoja käytetään eri tuotantomuotojen vertailussa tai sovelletaan jossakin toisessa saman tuotantomuodon yksittäisessä laitoksessa. Laajemmissa LCOE-kustannustarkasteluissa tuotantomuodolle esitetäänkin usein tyypillinen kustannusvaihtelualue, josta teknisiin lähtötietoihin voi poimia sellaisen kustannusalueen, joka sopii omaan käyttötarkoitukseen.

Osa valtiollisista tahoista, yksityisen sektorin toimijoista ja kansainvälisistä organisaatioista julkaisee säännöllisesti LCOE-arvoja eri tuotantomuodoille. Edellä kuvattujen syiden vuoksi yksittäisissä arvoissa on eroja, mutta laajempi kokonaiskuva näyttää silti melko yhtenäiseltä. Useissa tarkasteluissa todetaan, että uusiutuvan energian kustannukset ovat laskeneet viimeisen 20 vuoden aikana merkittävästi ja että ne ovat jo osin pienemmät kuin fossiilisen energian tuotantokustannukset. Tämä on havaittavissa myös tuoreesta IPCC:n raportista (IPCC 2022) poimitussa kuvassa 10.



Kuva 10. Uusiutuvan energian laskevia yksikkökustannuksia (IPCC 2022).

LCOE-kustannuksia on esitetty eri sähköntuotantomuodoille sekä globaalista että paikallisesta näkökulmasta useissa lähteissä (IEA 2020, Hirth ym. 2015, Timilsina 2020, BEIS UK 2020, IRENA 2021, EIA 2022, Lazard 2021). Esityksissä käytetään yleensä yksikköä USD/MWh. Kuvassa 1 on esitetty esimerkiksi IEA:n vuoden 2020 tilanteen LCOE-arvot, joissa on mukana 24 maan 243 laitoksesta saadut kustannustiedot. LCOE-arvot vaihtelevat alueittain, ja tarkastelussa kuvataan myös erikseen keskimääräisiä arvoja eurooppalaisille laitoksille.

Yhteisenä näkemyksenä on kustannustarkasteluissa todettu seuraavaa:

- » Vaihtelevan uusiutuvan energian (tuuli, aurinko) kustannukset ovat laskeneet. Yleisesti aletaan nähdä, että useiden uusiutuvan energian tuotantomuotojen, varsinkin maatuulen, kustannukset ovat pienemmät kuin fossiilisten laitosten tuotantokustannukset.
- » Ydinvoiman todetaan säilyvän edullisimpana vähähiilisenä ja kulutuksen mukaan tarvittaessa säädettävissä olevana (engl. dispatchable) sähköntuotantomuotona, kun tarkastellaan ydinvoimalaitosten eliniän jatkamisen ja niiden käyttöön liittyviä kustannuksia (kuvassa Nuclear, LTO, long-term operation). Kuvassa 11 arvioidaan erikseen hinta uudelle ydinvoimalaitokselle, jonka LCOE-kustannukset ovat suuremmat kuin jo käytössä olevan laitoksen eliniän jatkamisen kustannukset.
- » Suuret vesivoima-altaat voivat sopivissa olosuhteissa tuottaa säädettävää sähköä sellaisilla LCOE-kustannuksilla, jotka vastaavat eliniän jatkamiseen perustuvan ydinvoiman kustannuksia.
- » Joillakin alueilla kaasuvoimalat saattavat olla osittain kilpailukykyisiä, mutta niiden LCOE-kustannukset riippuvat voimakkaasti kaasun ja yksittäisen alueen hiilidioksidipäästöjen hinnasta. Fossiilisten hiili- ja kaasulaitosten tuotantokustannukset eivät yleisesti ole enää juurikaan kilpailu-

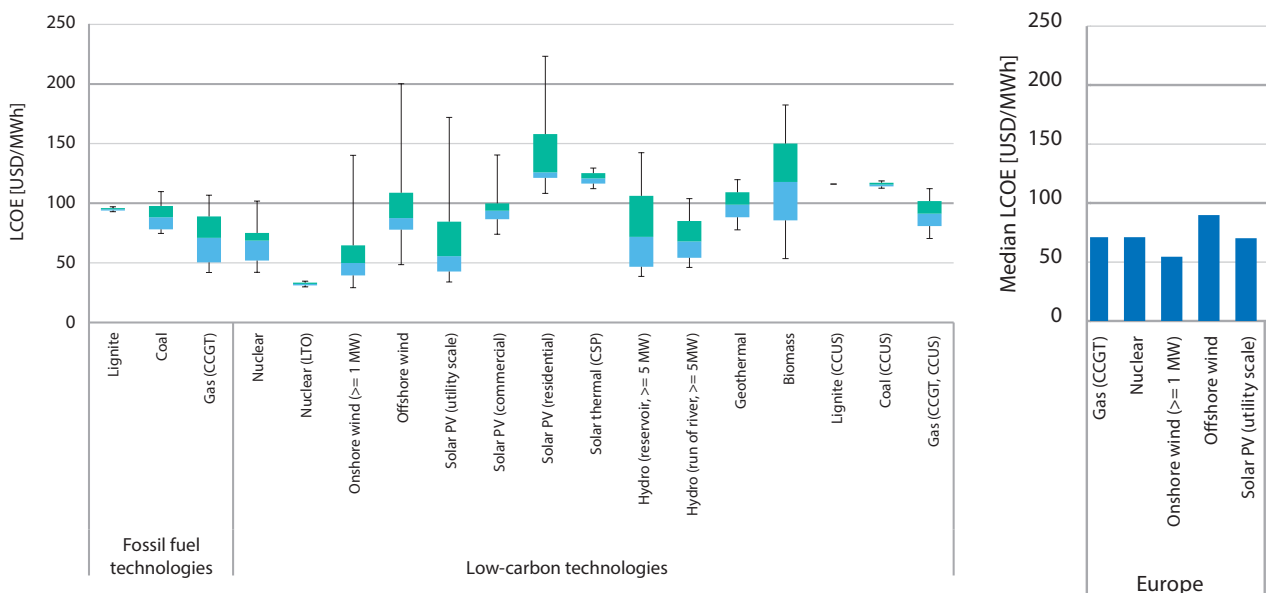
kykyisiä, ja päästökaupassa nousevat hiilidioksidipäästöjen hinnat heikentävät niiden tilannetta edelleen. Fossiilisen energian päästökustannuksia voidaan vähentää hiilidioksidin talteenotolla ja varastoinnilla, mutta niihin investoimisen arvioidaan olevan taloudellisesti perusteltua vasta, kun päästöhinta on 50–70 €/tCO₂.

- » Suomen kannalta merkittävää bioenergiaa ei ole useissa globaaleissa tarkasteluissa sisällytetty vertailuun. Sen sähköntuotannon kustannustarkasteluihin vaikuttavat niin ikään valitut laskenta-arvot, joilla laitosten sähkön ja lämmön osuutta arvioidaan. Timilsina (Timilsina 2020) on arvioinut Maailmanpankin kehitysryhmän globaalin LCOE-tarkastelun kustannusyhteenvedossa, että bioenergian keskimääräiset LCOE-kustannukset ovat 81 USD/MWh. Luvun vertailua esimerkiksi kuvan 11 arvoihin vaikeuttaa kuitenkin kustannuksiin sisältyvä hyvin suuri vaihteluväli. Bioenergiaa voidaan käyttää myös kulutuksen mukaan tasottavassa säädössä, mikä saattaa parantaa sen kilpailukykyä, kun tarkastellaan koko energijärjestelmän kustannuksia.

Järjestelmäkustannukset

LCOE-kustannukset on yleisesti käytetty, yksikertainen ja myös läpinäkyvä tapa yksittäisten tuotantomuotojen kustannusten arvioimiseen, kunhan laskentatiedot kuvataan arvion yhteydessä. Se ei kuitenkaan ota huomioon yksittäisten järjestelmien ja markkinoiden eroja, jotka vaikuttavat merkittävästi teknologioiden kilpailukykyyn. Nämä järjestelmäkohtaiset ominaisuudet ovat vuorovaikutuksessa tuotantomuotojen ominaisuuksiin, joita ovat esimerkiksi tuotannon vaihtelevuus, kulutuksen muutoksiin osallistuminen, vasteaika, kustannusrakenne ja rooli energijärjestelmässä. Siksi LCOE-kustannukset eivät myöskään ota huomioon sellaisia energijärjestelmään vaikuttavia kustannuksia, jotka syntyvät yksittäisistä tuotantomuodoista.

Figure ES1: LCOE by technology



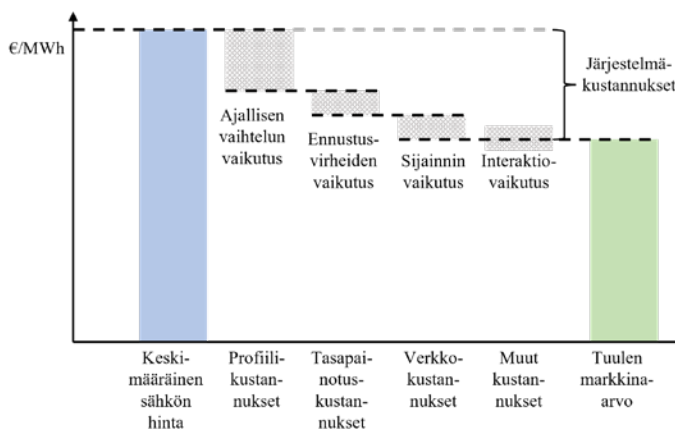
Note: Values at 7% discount rate. Box plots indicate maximum, median and minimum values. The boxes indicate the central 50% of values, i.e. the second and the third quartile.

Kuva 11. Eri tuotantomuotojen LCOE-kustannukset 24 eri maasta ja eurooppalaisten tuotantomuotojen LCOE-kustannusten mediaani (IEA 2020).

Sähköntuotanto vaihtelevalla uusiutuvalla energialla ei ole luotettavaa kaikkina hetkinä. Tämä edellyttää varasuunnitel- maksi esimerkiksi muuta säädettävää tuotantoa, energiava- rastoja tai kulutusjoustoja, jotta tarvittava tuotanto voidaan varmistaa keskeytyksettä. Lisäksi uusiutuvan energian tuo- tannon nopeat muutokset täytyy pystyä tasapainottamaan. Näiden tekijöiden ja niiden aiheuttamien kustannusten hu- mioon ottamiseksi tarvitaan menetelmiä, joilla järjestelmä- kustannuksia voidaan analysoida ja joilla niitä voidaan tar- kastella yhdessä LCOE-kustannusten kanssa. Näin saadaan kokonaiskuva eri tuotantomuotojen kustannuksista ja kilpai- lukyvystä koko energijärjestelmän näkökulmasta. (BEIS UK 2020, Hirth ym. 2015, IEA 2020, Timilsina 2020.)

Järjestelmäkustannusten muodostumisen käsittely ei ole ai- van yhtenäistä eri tutkimuksissa, mutta ne voidaan jakaa esi- merkiksi kolmeen kategoriaan seuraavasti (Hirth ym. 2015), kuten on esitetty kuvassa 12.

- » Profiilikustannukset (profile costs) aiheutuvat tuotannon ajallisesta vaihtelusta. Tällöin kustannukset syntyvät tuo- tannon ja kulutuksen tasoittamisen kustannuksista sekä vaihtelevan tuotannon markkina-arvon ja keskimääräisen sähkön hinnan eroista.
- » Tasapainotuskustannukset (balancing costs) aiheutuvat en- nustetun ja todellisen tuotannon eroista. Tällöin kustannuk- set syntyvät pääosin sähköjärjestelmän stabiiliuden ylläpi- tämisen lisääntyneistä vaatimuksista.
- » Verkkokustannukset (grid costs) liittyvät tuotantolaitosten sijaantiin sähkönsiirtoon ja -jakeluun nähden. Kustannuksia syntyy sähköverkon kehittämisestä ja pitkillä etäisyyksillä siirtohäviöistä.



Kuva 12. Järjestelmäkustannusten (Integration costs) jakautu- minen kolmeen kategoriaan: profiilikustannukset, tasapainotus- kustannukset ja verkkokustannukset (mukailen Hirth ym. 2015).

Järjestelmäkustannuksiin liittyvä ajattelu on tullut kustan- nastarkasteluihin mukaan vasta viime vuosina. Sen merki- tystä ja ominaisuuksia on alettu tiedostamaan selvemmin sitä mukaa, kun uusiutuvan energian osuus on kasvanut. Järjes- telmäkustannusten arviointi on ollut vielä kehittymisvaihees- sa. Toistaiseksi on esitetty vain yksittäisiä, osittain alustavia

järjestelmäkustannusanalyysjä eikä kyseisten kustannusten arvioimiseksi ole syntynyt yhtenäistä tapaa.

Tulevaisuuden energijärjestelmien kustannusten arviointi on vielä LCOE-arvoja vaikeampaa, koska eri parametrien ja läh- töarvovaihtoehtojen lisäksi joudutaan kehittämään arviointiin soveltuvat menetelmät ja myös oletamaan jokin konkreettinen muoto tulevaisuuden energijärjestelmälle, jolle on suuri mää- rä erilaisia vaihtoehtoja. Esimerkiksi IPCC 2022 -analyysissä tarkastellaan yli 2 500 tulevaisuuden skenaariota. Kun energia- murros etenee, syntyy erityinen tarve sisällyttää järjestelmään kaikki tekniset ja taloudelliset mekanismit, joilla energiantuo- tanto saadaan kaikkina hetkinä vastaamaan kysyntää.

Hirth ym. (2015) ovat ensimmäisten joukossa tarkastelleet jär- jestelmäkustannuksia yli sadan julkaistun tutkimuksen perus- teella. He ovat yhteenvedossaan arvioineet, että kun tuuliener- gian osuus kasvaa energijärjestelmässä 30–40 prosenttiin, järjestelmäkustannukset olisivat keskimäärin 25–35 €/MWh. Hinta olisi jo tuulivoimalle esitettyjen matalimpien LCOE-kus- tannusten suuruusluokkaa (vrt. kuva 12). Nämä arviot ovat järjestelmäkohtaisia ja pitävät edelleen sisällään merkittäviä epävarmuuksia, mutta samalla ne ovat liian suuria huomiotta jätettäviksi. Toisaalta pienillä tuulivoiman tuotanto-osuuksilla järjestelmäkustannukset ovat tuskin havaittavia.

Vastaavia tuloksia on esitetty myös muissa lähteissä (IEA 2020, BEIS 2020). Esimerkiksi nopeasti reagoivat kaasuo- voimat ovat tarkasteluissa järjestelmäkustannuksiltaan edullisia, vaikka LCOE-yksikkökustannukset ovatkin korkeita. Kokonaisuudessaan kulutuksen tasapainottamiseen ja säätöön soveltuvat tuotantomuodot, kuten vähähiiliset bio- ja ydinvoima, ovat järjestelmäkustannusten kannalta kohtuullisen edullisia, vaikkakaan ydinvoimaa ei ole nykyisessä suo- malaisessa energijärjestelmässä ollut taloudellista säätää sähkökulutuksen mukaan. Järjestelmäkustannuksista ja niiden merkityksestä vallitsee yleistasolla melko yhtenäinen käsitys, mutta niiden arviointi on vielä hajanaista ja epäyhtenäistä.

Yhteenveto energijärjestelmän kustannuksista Suomen olosuhteissa

Eri sähköntuotantomuotojen yksikkökustannukset vaihtelevat alueen, ajankohdan, olosuhteiden ja käytettyjen laskenta-arvojen mukaan. Siksi yleisellä tasolla tarkastellaan yleensä keskimääräisiä tai kustannusten vaihteluväliä kuvaavia tuo- tantokustannuksia. Kansainvälisesti koottuja kustannusar- voja on esitetty edellä, ja niistä tehdyt johtopäätökset pätevät pääpiirteissään myös Suomen olosuhteissa.

Ollennaista on, että tuulivoiman yksikkökustannukset ovat laskeneet ja että tuulivoimasta on tullut useissa tapauksis- sa edullisin vaihtoehto uuden tuotannon lisäämiseen. Uusien ydinvoimaloiden tuotantokustannukset ovat keskimäärin kor- keampia, mutta sen sijaan olemassa olevien ydinvoimaloiden ja laitosten eliniän pidentämisen sähkön tuotantokustannuk- set ovat matalia. Siksi jo investoitujen ydinvoimaloiden käyttö on hyvin taloudellista. Suomessa merkittävän bioenergian

kustannukset vaihtelevat laitoksittain enemmän, eivätkä niiden keskimääräiset kustannukset yllä edullisuudessaan tuulivoiman tai jo rakennetun ydinvoiman käytön tasolle.

On tiedostettava, että eri tuotantomuotojen suorat yksikkökustannukset muodostavat vain osan energijärjestelmän kokonaiskustannuksista. Erityisesti vaihtelevan uusiutuvan energian osuuden merkittävä kasvu synnyttää edellä kuvattuja järjestelmäkustannuksia. Vaikka järjestelmäkustannukset voivat olla suuruudeltaan huomattavia, ovat niiden arviot toistaiseksi epävarmoja ja arviointimenetelmät ovat vasta kehittyneissä.

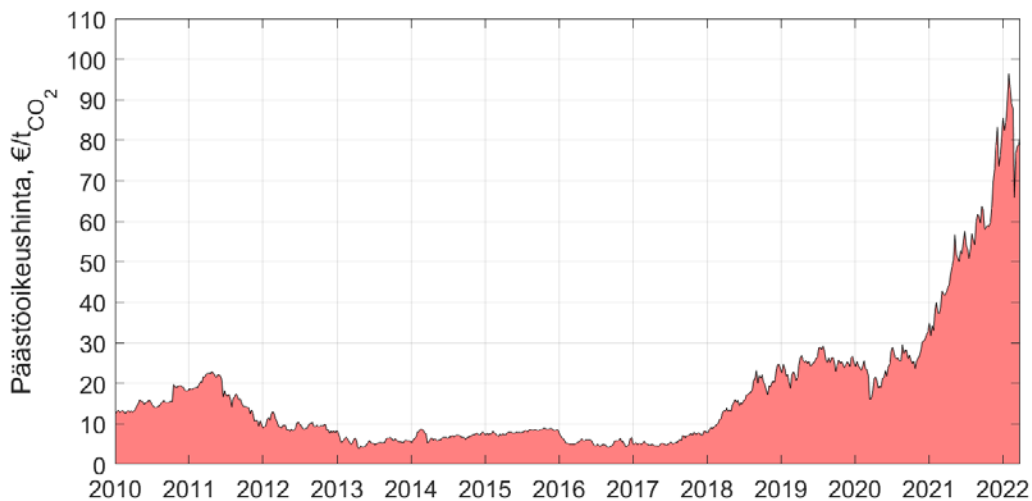
Suomen energijärjestelmän järjestelmäkustannusten kattamiseksi ja niiden suuruuden arvioimiseksi olisi syytä tehdä laajempaa pidemmän tähtäimen tutkimusta, jotta kansallista energijärjestelmää voitaisiin kehittää ottamalla huomioon ratkaisujen kustannusvaikutus kestävyuden ja toimintavarmuuden ohella.

Päästökauppa

Yksi energiantuotannon kustannuksiin vaikuttava tekijä on päästökauppaneuksemi. Päästökaupan tarkoituksena on pitää teollisuus- ja energiantuotantolaitosten sekä EU:n si-

säisen lentoliikenteen kokonaiskasvihuonekaasupäästöt asetetun päästörajan alapuolella. Päästökaupan tavoitteena on vähentää fossiilisten polttoaineiden käytöstä syntyviä kasvihuonekaasupäästöjä niin, että edullisimmat ja vähäpäästöisimmät vaihtoehdot asetetaan kalliimpien ja suuripäästöisten edelle. Päästökauppa ohjaa toteuttamaan sellaisia kasvihuonekaasupäästöjen vähentämistoimenpiteitä, joiden kustannukset ovat alhaisemmat kuin päästöoikeuden hinta. Päästöoikeudet lasketaan hiilidioksiditonneina (tCO₂).

Päästöoikeuden hintakehitys on esitetty kuvassa 13, jossa havaitaan muun muassa odottamattoman voimakas nouseva hintakehitys vuonna 2021 alkaen. Tällaiset muutokset ovat vaikeasti ennustettavissa ja siten vaikeuttavat teknologiainvestointien elinkaarikustannusten arviointia ja niitä koskevia päätöksiä. Korkean päästöhinnan ennusteet voivat kannustaa liian kalliiden päästövähennysteknologioiden kehitystyöhön ja käyttöönottoon, mutta toisaalta ne vaikuttavat merkittävästi energijärjestelmän tulevaisuuden skenaarioiden tuloksiin. Päästöoikeuden vaikutus fossiilisen energian kustannuksiin riippuu tuotantomuodon ominaispäästöjen määrästä. Esimerkiksi 50 €/tCO₂:n päästöhinnalla olisi modernin maa-kaasuvoimalan tuotantokustannuksiin noin 20 €/MWh:n lisä-kustannusvaikutus.



Kuva 13. Päästöoikeuden hintakehitys vuosina 2010–2022. (Data: Carbon emissions futures, investing.com)

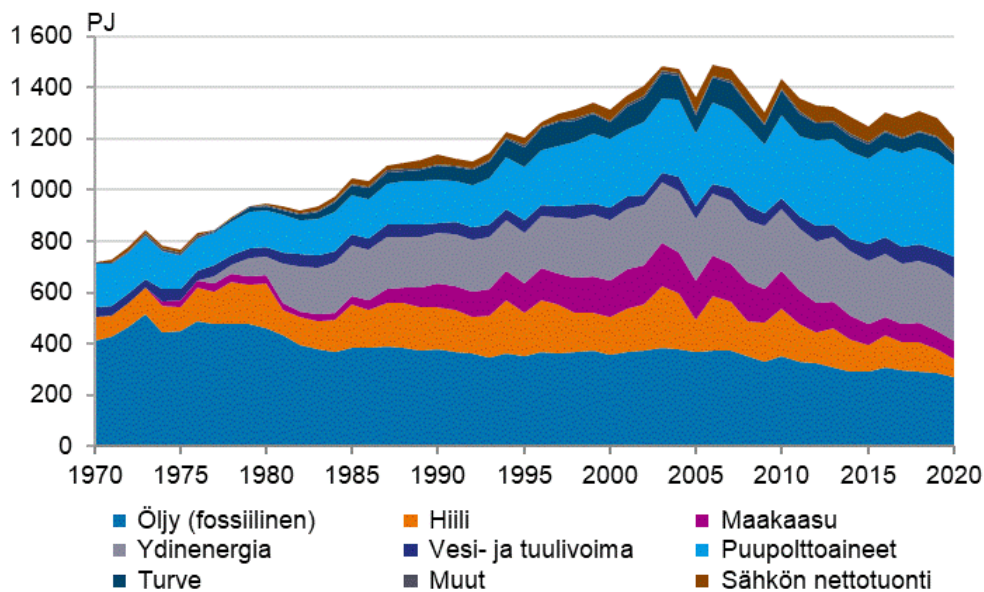
3.3 Fossiilinen energia

Käyttämämme energia jaetaan kahteen kategoriaan. Kestävä energia ei lisää ilmakehän hiilidioksidipitoisuutta (CO₂). Sen sijaan fossiilisen energian käyttö vapauttaa maan pinnan alle pitkäaikaisesti sitoutunutta hiiltä, josta suuri osa päätyy ilmakehään aiheuttaen lämpenemistä. Suomi on sitoutunut muun muassa Kyoton ja Pariisin sopimuksissa rajoittamaan ilmaston lämpenemistä, ja siksi fossiilisten käyttöä on vähennettävä. Fossiilisen energian käyttö onkin Suomessa vähentynyt 2000-luvulla (Tilastokeskus 2022a).

3.3.1 Hiili

Teollinen vallankumous edellytti konevoiman käyttöä. Se mahdollistui, kun opittiin rakentamaan hiilellä toimivia höyrykattiloita. Sähkön- ja lämmöntuotanto hiilestä on ollut Suomessa pitkään yleistä.

Kasvihuonekaasupäästöt: Kivihiili on fossiilinen polttoaine. Se tuottaa runsaasti kasvihuonekaasuja 450–1700 gCO₂-eq/kWh (Kuva 8, Luku 3.1).



Kuva 14. Energian kokonaiskulutus Suomessa vuosina 1970–2020 (Tilastokeskus 2022).

Yhteenveto: Hiilen energiakäyttö on jo pitkään hiipunut ja loppuu Suomessa, kun pääkaupunkiseutu irtautuu siitä vuoteen 2030 mennessä. Hiiltä toki käytetään myös muihin kuin energiatarkoituksiin, esimerkiksi raudan pelkistämiseen valmistusta.

3.3.2 Öljy

Öljyn laajamittainen käyttö alkoi noin sata vuotta sitten. Sen suosio sai kolauksia 1970-luvun öljykriiseissä, kun tuottajamaat nostivat voimakkaasti hintoja. Öljystä reilu puolet käytetään liikenteessä, ja vajaa 20 prosenttia kuluu kemianteollisuuden tarpeisiin. Lämmitysenergiaksi sitä käytetään niin kiinteistöissä kuin teollisuudessa muun muassa sellutehtaiden meesuuneissa ja teräksen jalostuksessa.

Kasviuonekaasupäästöt: Öljy on fossiilinen polttoaine. Öljy tuottaa vähemmän kasviuonekaasuja kuin hiili, mutta määrä on silti runsas 430–1 200 gCO₂-eq/kWhe.

Yhteenveto: Öljyn käytön vähentämisen tärkeimmät ratkaisut koskevat liikennettä. Biokaasu ja sähköllä tuotetut kaasut ovat vaihtoehtoja fossiiliselle maakaasulle.

3.3.3 Maakaasu

Maakaasun käyttö Suomessa alkoi 1970-luvulla putkiyhteyden valmistuttua. Maakaasua käytetään lähinnä teollisuudessa.

Kasviuonekaasupäästöt: Maakaasu on fossiilinen polttoaine. Se tuottaa vähemmän kasviuonekaasuja kuin hiili ja öljy, mutta määrä on silti runsas 350–890 gCO₂-eq/kWhe.

Yhteenveto: Maakaasun energiakäyttö on hiipunut korkean hinnan takia.

3.3.4 Turve

Turve ei ole fossiilinen polttoaine, koska turvevarat ovat enimmillään vain kymmentuhatta vuotta vanhoja. EU-päästölaskennassa turve rinnastetaan kuitenkin fossiilisiin polttoaineisiin.

Kasviuonekaasupäästöt: Turve tuottaa hiiltäkin enemmän kasviuonekaasuja (1 100–1 300 gCO₂-eq/kWhe).

Huoltovarmuus ja omavaraisuus: Turpeen käyttö edistää maaseudun työllisyyttä ja hyödyntää kotimaisia energialähteitä, mutta aiheuttaa runsaasti kasviuonepäästöjä.

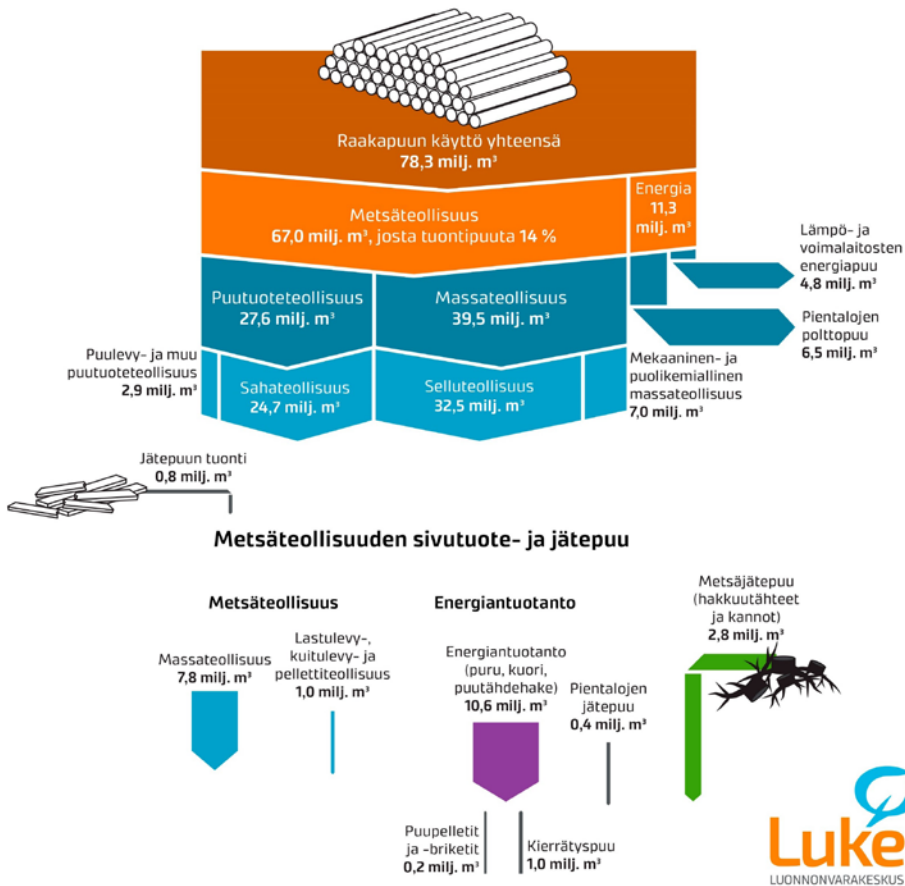
Yhteenveto: Päästökauppakustannusten takia turpeen käyttö energiantuotannossa vähenee Suomessa, ja sen ennustetaan loppuvan noin vuonna 2030.

3.4 Biomassa

Metsäteollisuus on puupohjaisen energian merkittävin tuottaja selluteollisuuden jäteliemien ja sivutuotteiden kautta. Kiinteät puujakeet hyödynnetään energiaksi tyypillisimmin kaukolämmöntuotannon ja teollisuuden lämmöntuotannon yhteydessä sekä pienimuotoisemmin alueellisessa kaukolämmön tuotannossa. Metsistä korjattava biomassa käytetään pääosin teollisuuden tarpeisiin, mutta kiertotaloudessa teolliset sivuvirrat muodostavat tärkeimmän uusiutuvien lähteen Suomessa (LUKE 2021).

Kasviuonekaasupäästöt: Metsäbiomassa on uusiutuva polttoaine, ja sen hiilidioksidipäästöt ovat noin 1–3 gCO₂/kWh voimalaitospaikalla (Giuntoli ym. 2017). Tällöin yhdistetyn tuotannon (sähkö ja lämpö) elinkaari-päästöt ovat 10–25 gCO₂/kWh. Metsäbiomassa luokitellaan uusiutuvaksi ja kestäväksi,

Raakapuun käyttö Suomessa 2020



Kuva 15. Raakapuun käyttö Suomessa vuonna 2020 (LUKE 2021).

jos se täyttää EU RED II -kestävyysskriteerit. Silloin biomassaa voidaan käyttää yli 20 MW:n laitosten sähkön- ja lämmön- tuotannossa ilman, että se luokitellaan fossiiliseksi poltto- aineeksi. Kestävyysskriteerit päivitetään RED III -direktiivin yhteydessä. Päivityksessä esityksessä muun muassa jalostus- kelpoisen ainespuun ja kantojen käyttö energiantuotannossa kielletäisiin, samoin kuin biomassan käyttö lauhdetuotannossa. Biomassa on ainoa energiamuoto, joka voi tuottaa hiili- nielun (katso luku 3.12).

Teknologian taso: Biomassan konversioteknologiat ovat säh- kön- ja lämmöntuotannossa hyvin kypsää ja kaupallistettua teknologiaa. Merkittävin kaupallistettava potentiaali liittyy uusiin biomassapohjaisiin jalosteisiin. Suomi on maailman- laajuisesti lämmön ja sähkön yhteistuotannon johtava maa. Yhteistuotannon etuna on, että polttoaineen energiasisältö hyödynnetään mahdollisimman tarkkaan. Suurissa leiju- kerroskattiloissa voidaan polttaa useita palakooltaan ja kos- teudeltaan vaihtelevia polttoaineita samanaikaisesti hyvällä hyötysuhteella ja pienin päästöin. Puupohjaisten ja muun bio- massan osuus kaukolämmön ja siihen liittyvän sähkötuotan- non polttoaineista on lähes puolet. Osuus kasvaa, kun turvetta ja hiiltä korvataan osin biomassalla.

Huoltovarmuus ja omavaraisuus: Suomen metsissä ei kasva- teta erikseen energiapuuta, vaan energiaksi käytettävä puu on hakkuiden, metsänhoidon ja metsäteollisuuden sivutuotetta. Yli puolet Suomessa käytetystä puusta päättyy energiaksi ja loput

tuotteiksi. Puubiomassan kestävä lisäyso- potentiaali on energiantuotannossa kuitenkin rajallinen ja liittyy metsänkäytön ja metsä- teollisuuden tulevaan kehitykseen. Teknis- taloudellinen potentiaali mahdollistaisi ny- kyisen korjuun kaksinkertaistamisen, mutta alueellisena polttoaineena sen saatavuuden vaihtelu rajoittaa käytön lisäämistä merkit- tävästi varsinkin Etelä- ja Länsi-Suomessa. Se on johtanut biomassan tuontiin erityises- ti rannikon laitoksille.

Biomassapohjaisen yhteistuotannon kilpai- lukyky on riippuvainen sähkön sekä poltto- aineena käytettävän biomassan hinnan ke- hityksestä. Biomassan hintakehitys on ollut maltillisempaa kuin tuontipolttoaineiden, eivätkä nykyinen polttoaineeverotus ja pääs- töoikeuden hinta vaikuta suoraan polttoai- neen hintaan. Puun kestävä energiakäyttöä pidetään siis hiilineutraalina, joten fossiilisten tuontipolttoaineiden, kuten öljyn, kivihiilen ja maakaasun, sekä kotimaisen turpeen korvaaminen biomassalla vähentää kasvi- huonekaasupäästöjä. Kotimainen puener- gia luo Suomeen myös työtä, toimeentuloa, vienti- ja verotuloja sekä parantaa ener- giantuotannon huoltovarmuutta. Nykyisin metsähakkeen hankinta työllistää suoraan noin 1 600 henkilöä ja kerrannaisvaikutuksi- neen kaksinkertaisen määrän. Määrä vastaa muutaman vuoden takaista turpeentuotannon työllisyysvaikutusta.

Vientipotentiaali: Biomassan tuotantoketju korjuusta lämpö- tai voimalaitokselle, pienkattilaan tai kuljetusvälineeseen vaatii runsaasti erilaista teknologiaa. Suomessa on kehittynyt vuosien saatossa paljon maailmanluokan osaamista bioenergian hyö- dyntämiseen. Esimerkkejä ovat biomassan korjuu- ja kuljetuska- lusto, leijukerroskattilat, puupohjaisten biopolttoainelajosteiden valmistus sekä biomassan mittausteknologia. Bioenergia-alan teknologia- ja palveluvientiyritysten tuotannon ja viennin yhteen- laskettu arvo on ulkomailla yli 400 miljoonaa euroa, ja sen odote- taan kasvavan merkittävästi lähivuosina. Suomi on bioenergian tuotantoon liittyvän teknologian johtava vientimaa.

3.5 Ydinvoima

Yleiskuvaus: Ydinvoima on toimitusvarma, resurssitehokas ja energiajärjestelmän kannalta edullinen tapa tuottaa sähköä ja lämpöä. Suomessa käytössä olevat ydinvoimalaitokset ovat teholtaan 500–1600 MWe, ja ne tuottavat sähköä 90–95-pro- senttisesti täydellä teholla. Teholtaan 1 200 MWe:n ydinvoimala tuottaa vuodessa 10 TWh sähköä. Uusien ydinvoimalaitosten tehoa pystytään säätämään +/- 80 MWe/minuutissa, mutta ydinvoiman matalan tuotantokustannuksen vuoksi laitosten ajaminen täydellä teholla on toistaiseksi ollut edullista. Poltto- aineetta 1 000 MWe:n voimalassa kuluu 22 tonnia vuodessa,

ja saman verran syntyy pitkäikäistä ydinjätettä. Pienydinvoima sopisi hyvin myös kaukolämmön tuotantoon, kun puhutaan kokoluokasta 20–200 MWth.

Kasvihuonekaasupäästöt: Ydinvoiman elinaikaiset hiilidioksidipäästöt ovat 4–45 gCO₂/kWh. Ydinreaktorien käynnistäminen 1980-luvun alussa Suomessa vähensi sähköntuotannon päästöjä kertaheitolla noin 300 gCO₂/kWh. Ydinpolttoaineella on maailmanmarkkinat, joten uraania ja polttoaineen valmistusta voi ostaa haluamastaan ilmansuunnasta.

Teknologian taso: Suurten ydinvoimalaitosten teknologia on jo kauan ollut kypsää, ja sitä on kaupallisesti saatavilla sekä lännestä että idästä. Pienydinvoima, jossa yksikkökoot ovat 20–300 MWe, on saavuttamassa kaupallisen kypsyyden. Teknologian valmiusaste on TRL 8.

Huoltovarmuus ja omavaraisuus: Ydinvoimalaitoksen tuotantoon ei voida puuttua ulkoa käsin. Polttoainetta ladataan reaktoriin 1–2 vuoden välein, joten reaktori itsessään on myös valtava polttoaineen varmuusvarasto. Suomeen ydinpolttoaine on kuitenkin ostettava ulkomailta. Luonnonuraania on prosessoitava, ennen kuin se sopii reaktoriin.

Talous ja työllisyys: Ydinvoimalaitoksia rakennetaan suurina yksiköinä, joiden suora investointikustannus on 2500–5000 €/kWe toimintaympäristöstä riippuen. Polttoaine- ja huoltokustannusten osuus on tyypillisesti alle 20 prosenttia tuotantokustannuksista. Edullisen polttoaineen takia ydinvoimaa on kannattavinta ajaa täydellä teholla. Suuri ydinvoimalaitos työllistää käydessään pysyvästi noin 300 henkilöä laitossykköä kohden.

Kestävyys ja ympäristövaikutukset: Ydinteollisuus huolehtii itse jätteidensä turvallisesta loppusijoituksesta: keinot ja laitteet ovat Suomessa jo olemassa. Merkittävin ympäristövaikutus on hukkalämpö, jota on kaksi kertaa sähkötehon verran. 1000 MWe:n ydinvoimalaitos tarvitsee noin 100 hehtaarin tontin. Ydinenergia on todettu EU:n rahoituksen luokittelujärjestelmässä ympäristön kannalta hyväksyttäväksi vaihtoehdoksi.

Turvallisuus, riskit ja haitat sekä säädökset: Tilastollisesti ydinvoima kuuluu vähiten vaarallisiin energianlähteisiin (Ritchie ym. 2020). Ydinvoimaloita säädellään ja valvotaan tarkasti (Valtioneuvosto, Säteilyturvakeskus). Turvallisuuksuunnittelu on perusteellisempaa, ja ympäristövaikutukset tunnetaan tarkemmin kuin muissa energiantekniikan ratkaisuisissa. Ydinvoimalaitoksilla tapahtuneiden onnettomuuksien todennetut seuraukset rajoittuvat laitosten ympäristöön.

Vientipotentiaali: Suomella on edellytyksiä viedä ydinvoimaan liittyvää osaamista maailmalle. Teknologioista vientimahdollisuudet koskevat lähinnä jätehuollon menettelyjä.

Sosiaaliset tekijät: Suuria ydinvoimalaitoksia on sijoitettu eri puolille Suomea, jotta sähkö saadaan siirrettyä kantaverkossa kustannustehokkaasti. Pienydinvoima mahdollistaa entistä tasapuolisemman ydinenergiantuotannon hajauttamisen.

Yhteenveto: Ydinvoima on todistetusti onnistunut vähentämään fossiilisten polttoaineiden käyttöä merkittävästi. Suomessa sähköntuotannon hiilidioksidipäästöt vähenivät noin 300 gCO₂/kWh:lla, kun ydinvoiman käyttö alkoi 1980-luvun alussa (Tilastokeskus 2019). Nykyään päästöjen taso on Suomessa tyypillisesti alle 100 gCO₂/kWh, Saksassa puolestaan noin 300 gCO₂/kWh. Ydinvoima on suorituskykyinen tapa tuottaa energiaa resurssitehokkaasti, ympäristöystävällisesti ja energijärjestelmän kokonaisuuden kannalta taloudellisesti. Radioaktiivisen säteilyn aiheuttaman terveysriskin vuoksi ydinvoimalaitosten turvallisuuteen ja vikatilanteiden hallintaan kiinnitetään enemmän huomiota kuin muiden energialähteiden terveysvaikutuksiin.

3.6 Vesivoima

Vesivoima on perinteinen energiamuoto, jossa hydrostaattinen korkeusero muutetaan energiaksi. Suomessa vesivoimaa rakennettiin erityisesti toisen maailmansodan jälkeen. Suomen vesivoimapotentialiaali on käytetty, eikä merkittäviä lisärakentamiskohteita ole käytettävissä, kun luonnonsuojelun näkökulma otetaan huomioon. Niin ikään luonnonsuojeluun liittyvistä syistä on todennäköistä, että pienvesivoimaa puretaan runsaasti seuraavan vuosikymmenen aikana. Jos purkutytöt koskevat lukumäärältään ylivoimaisesti suurinta eli alle 0,5 MWe vesivoimaa, ei niillä ole suurta merkitystä Suomen energijärjestelmälle.

Kasvihuonekaasupäästöt: Vesivoiman hiilidioksidipäästöt ovat 4–79 gCO₂-eq/kWh.

Huoltovarmuus ja omavaraisuus: Vesivoima tuottaa vuodessa sähköä lähes miljardin euron arvosta. Se on 100-prosenttisesti kotimaista ja tuotettavissa altainen varastointi- ja säätökyvyn puitteissa. Vesivoiman arvo korostuu, kun säätövoiman tarve kasvaa.

Yhteenveto: Vesivoima on aina toiminut suomalaisen sähköjärjestelmän säätövoimana. Uusiutuvan energian osuuden kasvaessa tämä rooli korostuu, vaikka vesivoima onkin rajallisen kapasiteettinsa takia vain osaratkaisu kokonaisjärjestelmässä. Erityisesti olisi huolehdyttävä, että suurimmat joet (toisin sanoen suurin energiantuotanto) säilyvät vesivoiman käytettävissä.

3.7 Tuulivoima

Yleiskuvaus: Tuulivoima perustuu auringon säteilyn ja maan pyörimisliikkeen aiheuttamaan ilman liikkeeseen ja siitä syntyvän liike-energian talteenottoon. Vuonna 2022 tuulivoimaloiden nykyteknologiaan perustuva, suurin laajasti käytössä oleva yksikköteho on 8 MW ja kokonaiskorkeus noin 300 metriä. Kehityshankkeista lasketun tuotantokustannuksen perusteella maatuulivoima on nykyteknologialla toteutettuna yksikkökustannuksiltaan edullisin tuotantomuoto Suomessa ja muissa Pohjoismaissa. Siihen liittyviä järjestelmäkustannuksia on tarkasteltu kustannusluvussa 3.2.

Teknologian kehityksen myötä tuotantokustannukset ovat edelleen laskussa. Maatuulivoiman investointikustannus on noin 1 200 €/kWe sisältäen perustukset, sähköaseman, voimalat, rakennustyöt ja liityntäpisteet. Tuulivoiman tuotannon määrä vaihtelee sääolosuhteiden vaikutuksesta, mikä on otettava huomioon energijärjestelmässä. Tuulivoimalat voivat myös sääolosuhteiden salliessa osallistua nopeaan ylös- ja alassäätöön. Tosin ylösäätö on mahdollista vain, jos voimalaa ajetaan tehorojoitetusti.

Tuulivoimatuotantoa voidaan ennustaa nykymeteorologian ansiosta melko tarkasti kahden tai kolmen päivän päähän. Tuulivoimatuotannon laajentaminen maantieteellisesti suuremmalle alueelle tasaisi myös tuotantoa ja vähentäisi säätötarvetta. Häiriöriski Puolustusvoimien tutkajärjestelmille rajoittaa merkittävästi tuulivoiman rakentamista itäisen Suomenlahden rannikolle, Kaakkois-Suomeen ja Itä-Suomeen. Esimerkiksi Virossa on päätetty investoida tulevina vuosina uusiin tutkiin, joilla voidaan vapauttaa pääosa Viron alueesta tuulivoiman rakentamiseen ilman korkeusrajoitteita [Tuuleenergia 2022].

Kasvihuonekaasupäästöt: Tuulivoiman hiilidioksidipäästöt ovat 2–75 g/kWhe, ja ne muodostuvat lähinnä tuulivoiman rakentamisen, kokoonpanon, kuljettamisen ja huollon aiheuttamista päästöistä.

Teknologian taso: Maatuulivoimalat ovat koeteltua teknologiaa ja markkinoilta yleisesti saatavilla [TRL9]. Kun tuulivoimaloiden koko kasvaa, paranee myös niiden tuotto ja huipunkäyttöaika, koska tuulen nopeus ja tasaisuus kasvavat napakorkeuden mukana ja maanpinnan kitkan vaikutus vähenee. Myös kiinteäperustaiset merituulivoimalat ovat saavuttaneet teknisen kypsyyden [TRL 9]. Kelluvat merituulivoimalat syville merialueille ovat tasolla TRL 6–7, mikä tarkoittaa, että ne ovat joko prototyyppiä tai rajoitetusti myytäviä tuotteita.

Huoltovarmuus ja omavaraisuus: Tuulivoimatuotanto on hajautettua tuotantoa. Yksittäisten turbiinien etäisyydet ovat noin 1–2 kilometriä, ja puistot sijaitsevat kymmenien kilometrien etäisyydellä toisistaan. Tuulivoimatuotannon hajasijoitus parantaa merkittävästi sähköntuotannon huoltovarmuutta, kun verrataan keskitettyihin yksiköihin. Laitokset eivät tarvitse polttoainetta, ja huolto tehdään paikallisesti.

Talous ja työllisyys: Tuulivoimarakentamisen kansantaloudelliset ja aluetaloudelliset vaikutukset ovat merkittäviä. Investointeihin liittyvien työllistävien ja talousvaikutusten lisäksi huoltoon ja kunnossapitoon syntyy pysyviä työpaikkoja: määrä on noin yksi työpaikka jokaista rakennettua turbiinia kohden.

Turvallisuus ja riskit: Tuulivoiman tuotanto on muihin energiantuotantomuotoihin verrattuna riskitöntä kaikilla mittareilla. Tuotannosta ei synny päästöjä, eikä siinä käytetä polttoaineita.

Vientipotentiaali: Suomesta viedään ulkomaille merkittävä määrä tuulivoimaloiden vaihteistoja, sähkögeneraattoreita, tehoelektronikkaa ja muita laitteita. Varsinainen vientipo-

tentiaali syntyy kuitenkin tuulivoimasähköllä valmistetuista, vihreään vetyyn pohjautuvista tuotteista ja teknologiasta.

Yhteenveto: Tuulivoima on energiantuotantomuoto, jonka hiilidioksidipäästöt ovat hyvin vähäisiä ja jonka avulla voidaan hyödyntää vetytalouden strateginen mahdollisuus. Tuulivoima on päästötöntä ja nopeaa rakentaa ja sen investointiriskit ovat pienet. Fingrid arvioi liittymäkyselyjensä perusteella (Fingrid 2022), että Suomeen tulee 16 000 MW uutta tuulivoimakapasiteettia 2020-luvun loppuun mennessä nykyisen 2 000 MW:n lisäksi. Yhteensä tämä kapasiteetti tuottaisi sähköä noin 63 TWh, jos kapasiteettikerroin on noin 40 prosenttia. Määrä vastaisi lähes 80 prosenttia Suomen sähköntuotannosta vuonna 2020. Yhteensä Fingrid on saanut lähes 150 000 MW:n edestä tiedusteluja kantaverkkoon liittymisestä, joista valtaosa koskee maatuulivoimaa. On epäselvää, millä aikavälillä ja kuinka suuri osa tiedusteluista voisi johtaa hankkeiden toteutumiseen, mutta mikäli kaikki hankkeet toteutuisivat, ne tuottaisivat noin 500 TWh sähköä vuodessa.

Merituulivoiman potentiaali lienee vähintään 60 TWh. Merituulivoima on noin kaksi kertaa kalliimpaa kuin maatuulivoima, joten siksi merituulivoimaan liittyvät investoinnit käynnistyvät hitaammin ilman tukia sekä linkittyvät Euroopan vedyn ja sähkön tarpeeseen. Silti investointeja suunnitellaan myös Itämeren alueelle.

3.8 Aurinkoenergia

Aurinkoenergiaa voidaan Suomessa hyödyntää suoraan sekä aurinkosähkön että -lämmön tuotannossa. Viime vuosikymmenen aikana aurinkosähkötekniikan tekninen kehittyminen ja komponenttien massatuotanto ovat laskeneet voimakkaasti aurinkosähkön tuotantokustannuksia. Samaan aikaan lämpöpumpputekniikan hyödyntäminen kiinteistöjen lämmityksessä ja jäähdytyksessä on yleistynyt. Nämä muutokset yhdessä ovat tehneet aurinkolämpökeräimistä taloudellisesti hankalasti perusteltavia verrattuna aurinkosähköön.

Kasvihuonekaasupäästöt: Aurinkosähkön hiilidioksidipäästöt ovat vähäisiä, ja ne vaihtelevat yksittäisissä tapauksissa välillä 7–120 gCO₂-eq/kWh. Päästöt ovat keskimäärin matalampia suurissa (>1 MW) ja varsinaiseen sähköntuotantoon tehdyissä järjestelmissä.

Teknologian taso: Aurinkosähkö on sähköntuotantoteknologia, joka voidaan integroida rakennuksiin, toteuttaa eri kokoluokissa ja joka on sovellettavissa kaupunkiympäristössä. Osana kiinteistöä aurinkosähköllä tuotetun sähkön vertailuhinta on sähkön kokonaishinta käyttökohteessa pelkän energian hinnan sijasta. Oman kulutuksen ylittävän tuotannon myynti energiayhtiölle onnistuu, kun tehdään sopimus sähkön oston lisäksi myös sähkön myynnistä. Käytännössä lähes kaikki energiayhtiöt ostavat pientuotettua sähköä. Aurinkosähkön tuotanto asennettua kilowattia kohden on Suomessa noin 800–1000 kWh/kWp, riippuen asennuspaikasta ja vuodesta. Tämä vastaa 9–11 prosentin kapasiteettikerrointa.

Vuoden 2020 lopussa Suomessa oli reilut 300 MW sähköverkkoon kytkettyä aurinkosähköä (IEA PVPS 2021). Pääosa paneeleista on asennettu kiinteistöihin. Aurinkosähkön määrä on lisääntynyt Suomessa viime vuosina noin 80–90 MW:n vauhdilla. Vuoden 2021 lopussa Suomessa oli arviolta 40 000 sähköverkkoon kytkettyä aurinkovoimalaa. Hyppäys vuosittain asennetussa aurinkosähkökapasiteetissa on odotettavissa, kun ensimmäisiä kymmenien megawattien maavoimaloita aletaan tehdä Suomeen. Tämä on jo tapahtunut Tanskassa ja Ruotsissa. Tanskassa asennettiin aurinkosähköä 1200 MW ja Ruotsissa 700 MW vuonna 2021 (SolarPower Europe 2021).

Yhteenveto: Aurinkosähkön tuotantokustannukset ovat tuulivoiman tavoin laskeneet merkittävästi viime vuosina. Ne ovat kuitenkin keskimäärin tuulivoimaa korkeampia. Suurempien maavoimaloiden tuotantokustannukset ovat matalimpia. Kiinteistöihin integroitu aurinkovoima on jonkin verran kalliimpaa, mutta sitä käytettäessä välttään sähkön siirtokustannuksilta. Aurinkovoiman tuotanto vaihtelee sääolosuhteiden mukaan sekä vuorokausi- että kausitasolla, mikä on otettava huomioon energijärjestelmässä, jossa aurinkovoima toisaalta tasaa vuositasolla tuulivoiman tuotantovaihtelua.

3.9 Jätteen energiahyötykäyttö

Jätteiden energiahyötykäyttöön kuuluvat sekalaisen polttokelpoisten jätteiden poltto ja terminen kaasutus, biokaasun tuottaminen biohajoavia jätteitä mädättämällä sekä bioetanolin ja biodieselin tuottaminen biohajoavista jätteistä eri menetelmillä liikennepolttoainekäyttöön. Jätteen osuus energiantuotannossa on melko pieni, mutta jätteen energiahyötykäytöllä on merkittävä rooli jätteiden kaatopaikkasijoittamisen ja siitä aiheutuvien kasvihuonekaasupäästöjen ja muiden ympäristövaikutusten vähentämisessä.

Jätteenpolttoa tai termistä kaasutusta tarvitaan, jotta sekalaista jätettä ja erilaisia kierrätyksen hylkymateriaaleja voidaan hyödyntää energiana, kun jätteestä on ensin erotettu pois teknisesti, taloudellisesti ja ympäristön kannalta maksimaalinen materiaaliolosuus kierrätykseen. Termiset menetelmät sopivat sekalaiselle jätteelle, joka sisältää biologisesti hajoamattomia (esimerkiksi sekalaisia muoveja) ja hitaasti biohajoavia materiaaleja (esimerkiksi sekalaista puuta, tekstiilejä ja kartonkia). Korkean lämpötilan ja orgaanisen aineksen täydellisen hajoamisen seurauksena jätteessä olevat taudinaiheuttajat ja orgaaniset myrkylliset yhdisteet tuhoataan. Suomessa jätteenpolto- ja -kaasutuslaitokset ovat pääasiassa yhdistettyjä sähkön- ja lämmöntuotantolaitoksia, joissa jätteiden energiasisältö muunnetaan korkealla hyötysuhteella (80–95 %) energiaksi.

Suomessa on kymmenen pääasiassa yhdyskuntien sekajätettä polttavaa jätteenpolttolaitosta, joiden käsittelykapasiteetti on yhteensä noin 1,6 miljoonaa tonnia sekalaista jätettä vuodessa. Niiden käyttöaste on ollut noin 90 prosenttia. Lisäksi Suomessa on 24 polttolaitosta, joilla on jätteen rinnakkaispolttolupa. Niissä poltetaan pääosin kaupan, teollisuuden ja

rakentamisen polttokelpoisista jätteistä tehtyjä SRF-(solid recovered fuels) polttoaineita. Niiden jätteenpoltto kapasiteetti on noin 0,9 miljoonaa tonnia vuodessa. Jätteenpoltolla tuotetaan sähköä noin 1 TWh vuodessa (n. 1,2 % Suomen sähkön kulutuksesta) ja lämpöä noin 3,7 TWh vuodessa (vastaa n. 10 % kaukolämmön tuotannosta). Kun otetaan huomioon jätteiden kierrätykselle EU:ssa asetetut tavoitteet, jätteenpolton potentiaali on Suomessa jo jotakuinkin täysin käytössä tai sitä joudutaan tulevaisuudessa jonkin verran vähentämään. Suomessa on kehitetty ja valmistetaan teknologiaa, joka soveltuu korkean hyötysuhteen jätteen energiahyötykäyttöön polttamalla. Huomattavimpia näistä ovat leijukerrospolto sekä jätteiden mekaanisen esikäsittelyn teknologiat.

Biokaasua voidaan tuottaa erilliskerätyistä biojätteistä, jätevesilietteistä, lannasta sekä elintarviketeollisuuden kasvi- ja eläinperäisistä jätteistä mädättämällä. Samalla tuotetaan maanparannusaineita, joilla voidaan korvata mineraalilannoitteita. Biokaasulla tuotettiin Suomessa vuonna 2017 sähköä 180 GWh ja lämpöä 520 GWh. Osa biokaasusta jalostetaan biometaaniksi ajoneuvokäyttöön (110 GWh vuonna 2020). Biokaasun tuotannon potentiaaliksi jättemateriaaleista on arvioitu Suomessa noin 11 TWh vuodessa. Se vastaa noin neljäsosaa liikenteen energiankäytöstä Suomessa. Suomessa on useita biokaasulaitoksia toimittavia yrityksiä, joilla on vientipotentiaalia.

Bioetanolia voidaan tuottaa fermentoimalla sokereita, tärkkelystä ja selluloosaa sisältävistä jättemateriaaleista. Bioetanolia sekoitetaan fossiiliseen bensiiniin, jolloin tavalliset bensiinikäyttöiset ajoneuvot voivat käyttää sitä pienellä sekoitussuhteella. Bioetanolia käytettiin Suomessa vuonna 2020 noin 1,1 TWh. Suomessa on kehitetty teknologiaa bioetanolin tuottamiseksi elintarviketeollisuuden ja yhdyskunnan jätteistä sekä biomassasta.

Biodieseliä voidaan tuottaa rasva- ja öljypitoisista jätteistä. Biodieseliä käytettiin Suomessa noin 3,5 TWh vuonna 2020. Suomessa tuotetaan biodieseliä vetykäsittelyyn perustuvalla teknologialla. Biodieseliä tehdään Suomessa myös mäntyöljystä, joka on metsäteollisuuden sivutuote.

Kestävyys ja ympäristövaikutukset

Jätteenpoltolla voidaan vähentää merkittävästi kasvihuonekaasupäästöjä, myrkyllisiä ilmapäästöjä, vesistö päästöjä sekä hajuja, jotka aiheutuvat kierrätyskelvottomien jätteiden sijoittamisesta kaatopaikalle. Vaikka jätteenpoltossa syntyy kasvihuonekaasupäästöjä fossiilisten materiaalien palamisesta, vähentää se kuitenkin samalla kaatopaikalla muodostuvan metaanin päästöjä ja korvaa myös muita polttoaineita ja niiden polttamisesta syntyviä päästöjä. Tämän vuoksi jätteenpolton vaikutukset kasvihuonekaasupäästöihin ovat kokonaisuutena merkittävästi pienempiä kuin suorat päästöt ilmaan (720–980 gCO₂/kWh sähköä, (Sphera 2021)). Elinkeinoalalla tutkimuksissa kokonaispäästövaikutukseksi on saatu lukuarvoja väliltä -1 800 gCO₂/kWh–360 gCO₂/kWh, kun huomioidaan päästövähennykset kaatopaikoilla. Jätteenpolto vähentää myös dioksiinipäästöjä, koska tutkimusten mukaan

kaatopaikkapaloissa muodostuu vuositasolla moninkertaisesti enemmän dioksiinipäästöjä kuin vastaavien jätemäärien poltossa (Dwyer ja Themeli 2015).

Biokaasun tuottamiseen jätteistä liittyy hyvin vähän haitallisia ympäristövaikutuksia. Biokaasun tuotannossa syntyy kasvihuonekaasupäästöjä 160–290 gCO₂/kWh käsittelyprosessineen. Myös biokaasun tuotanto vähentää jätteiden loppusijoituksen metaanipäästöjä. Biokaasun tuotantoprosessi katsotaan tilastoissa materiaalihyötykäytöksi, koska usein yli 90 prosentista käsiteltävästä jätteestä tulee lopputuotteena maanparannusainetta.

Ympäristövaikutusten kannalta bioetanolin tuotanto jätemateriaaleista on melko hyvin verrattavissa biokaasun tuottamiseen. Jos tuotannossa käytetään jätemateriaaleja, ei siihen liity hankalia ympäristövaikutuksia. Fermentoinnista jäävä, lietemäinen lopputuote voidaan hyödyntää biokaasun tuotannossa tai jalostaa kompostiksi. Bioetanolia ja biodieseliä voidaan tuottaa myös sitä varten kasvatetuista ja myös ravinnoksi soveltuvista kasveista, jolloin tuotannon kestävyys voi olla kyseenalaista.

Biodieselin laajamittaisessa tuotannossa merkittävä raaka-aine on ollut palmuöljyn rasvahappotisle, jonka käyttö on lisännyt sademetsien raivaamiseen liittyviä kestävyyskysymyksiä.

3.10 Geoterminen energia ja maalämpö

Maaperästä saatava lämpö voidaan jakaa geotermiseen energiaan, joka on peräisin maan kuumasta ytimestä, ja maan pintakerroksien energiaan, joka on kallioperään, vesistöihin tai ilmaan varastoitunutta auringon energiaa. Suomen maaperässä geotermisen energian lähteet ovat hyvin syvällä ja niiden hyödyntäminen vaatii useiden kilometrien syvyisiä lämpökaivoja. Nykyisessä kaukolämpöverkossa suoraan hyödynnettävän lämmönlähteen minimilämpötila on noin 100–120 astetta. Riittävän suuren lämpötilatason saavuttaminen vaatii Etelä-Suomessa noin 5–8 kilometrin syvyyttä lämpökaivoja.

Pienempiä lämpötilatasojakin voidaan hyödyntää joko suoraan rakennusten lämmityksessä tai aluelämpöverkossa, joka toimii matalammalla lämpötilatasolla. Niin kutsutuilla keskisyvillä, 1–4 kilometrin syvyyteen ulottuvilla lämpökaivoilla voidaan hyödyntää maan ytimen lämpöä ja saavuttaa riittävän korkea lämpötila matalalämpötilajärjestelmään. Jos tarvitaan korkeampia lämpötiloja, voidaan lämpötilatasoa nostaa lämpöpumpun avulla. Maan pintakerroksiin, kuten kallioperään tai vesistöihin, varastoitunutta auringon lämpöä voidaan hyödyntää lämpöpumpuilla. Maalämmön tapauksessa porakaivojen syvyys on noin 150–300 metriä. Erityisesti kevästä syksyyn myös ulkoilmaa voidaan hyödyntää tehokkaasti lämpöpumppujen lämmönlähteenä.

Kasvihuonekaasupäästöt: Kun investointi porakaivoon on tehty, geoterminen lämpölaitos voi oikein mitoitetuna tuottaa kymmeniä vuosia lähes päästötöntä lämpöä hyvin pienillä

käyttökustannuksilla. Lämpöpumpuilla saavutetaan Suomessa tyypillisesti noin vuositehokerroin 3, joka tarkoittaa, että yhdellä yksiköllä sähköä saadaan kolminkertainen määrä lämpöä. Lämmöntuotannon ominaispäästöt ovat näin ollen noin kolmasosa käytetyn sähkön ominaispäästöistä.

Teknologian taso: Syvien kaivojen porausteknologia on vielä kehitysasteella, ja niiden investointikustannuksiin liittyy melko suurta epävarmuutta. Suomessa teknologiaa on toteutettu käytännössä Espoon Otaniemessä, ja toinen hanke on meneillään Tampereen Tarastenjärvellä. Lämpöpumppujen käyttö on yleistynyt nopeasti, ja ne ovat energiatehokas tapa tuottaa sähköstä lämpöä. Toistaiseksi kasvu on ollut nopeinta talokohtaisissa pienen kokoluokan lämpöpumpuissa, mutta myös suuret aluekohtaiset, kaukolämpöä tuottavat lämpöpumppulaitokset ovat alkaneet yleistyä viime aikoina. Lämpöpumppujen käyttöä rajoittaa tuotettavan lämmön lämpötilataso, joka nykyisillä kaupallisilla ratkaisuilla on noin 100 astetta. Korkealämpötilalämpöpumppujen kehitys mahdollistaa lähivuosina jopa 150–200 °C:een lämpötilatasojen tuoton, jolloin lämpöpumppuja voidaan hyödyntää laajemmin myös teollisuuden prosessilämmön tuotannossa.

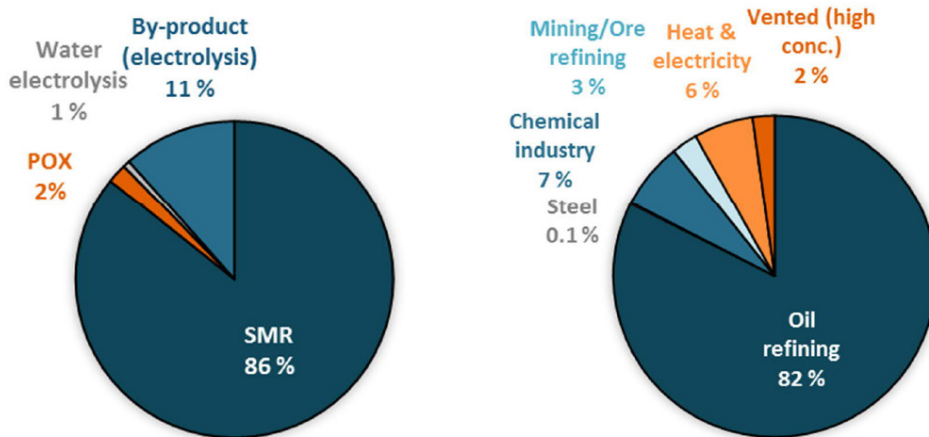
Yhteenveto: Lämpöpumpuilla voidaan korvata polttamista energiatehokkaasti ja hiilineutraalisti asumisen ja teollisuuden lämmöntuotannossa, jos lämpöpumppujen pyörittämiseen käytetään päästötöntä sähköenergiaa. Maalämmön lisäksi teollisuuden häviölämpövirrat, kuten datakeskukset ja vedyn tuotanto elektrolyysillä, ovat mahdollisia lämmönlähteitä tulevaisuuden lämpöpumpuille.

3.11 Vetytalous

Tulevaisuuden vähäpäästöisessä, uusiutuvan sähkön tuotantoon perustuvassa energijärjestelmässä vetyä käytetään sähkön rinnalla energian kantajana eli vaihtoehtoisena energiaa sisältävänä väliaineena energian varastoinnissa ja siirrossa. Vetyä tullaan käyttämään erityisesti sellaisissa kohteissa, joiden suora sähköistys on vaikeaa. Tällaisia käyttökohteita ovat esimerkiksi kemian- ja metalliteollisuus sekä raskas liikenne.

Vety on nykyään merkittävä teollisuuden raaka-aine, jota käytetään globaalisti noin 120 miljoonaa tonnia vuodessa (Nazir ym. 2020). Merkittävimmät käyttökohteet ovat öljyn jalostus (33 %), ammoniakkin tuotanto (27 %) ja metanolin tuotanto (10 %). Vety tuotetaan 96-prosenttisesti fossiilista raaka-aineista ja pääasiallisesti maakaasusta, joten nykyinen tuotanto on merkittävä hiilidioksidipäästöjen lähde.

Kasvihuonekaasupäästöt: Suomessa vetyä tuotetaan ja kulutetaan arviolta 200 000 tonnia vuodessa (Hurskainen 2019). Kuvassa 16 (vasemmalla) on esitetty vedyn tuotantomenetelmien osuuden jakautuminen Suomessa. Sen mukaan tuotanto perustuu lähes kokonaan (86 %) maakaasun höyryreformointiin (SMR) lukuun ottamatta kloorikemikaalituotannon sivutuotteena syntyvää vetyä (kuvassa By-product/electrolysis). Suurin yksittäinen käyttökohde on Porvoossa sijaitseva



Kuva 16. Vedyn tuotanto (vasemmalla) ja kulutus (oikealla) Suomessa (Hurskainen 2019).

Kilpilahden öljynjalostamo, jonka tuotanto on yli 150 000 tonnia vuodessa (kuva 16 oikealla). Kilpilahden jalostamo onkin Suomen toiseksi suurin yksittäinen hiilidioksidin päästölähte noin kolmella miljoonalla tonnilla vuodessa, mistä vedyn tuotannon osuus on arviolta 30 prosenttia.

Käyttökohteet: Vetytalouden ensi vaiheessa pyritään korvaamaan fossiilinen eli niin sanottu harmaa vety puhtaalla vedyllä. Puhdasta vetyä voidaan tuottaa hajottamalla vettä elektrolyytisesti sähkövirralla, joka on tuotettu uusiutuvilla energialähteillä (tuuli-, aurinko- ja vesivoima) tai ydinenergialla. Lisäksi fossiilisesta vedyn tuotannosta voidaan ottaa hiilidioksidi pääosin talteen ja varastoida se (CCS eli Carbon Capture and Storage), mistä syntyy niin sanottua sinistä vetyä. Vaihtoehtoisesti maakaasua voidaan pyrolysoida eli kuivatislata, jolloin syntyy vetyä ja kiinteää hiiltä.

Aurinko- ja tuulivoimaan tukeutuvaa elektrolyysiä pidetään globaalisti merkittävämpänä puhtaan vedyn tuotantomuotona (vihreä vety). Muiden vaihtoehtojen hyväksyttävyydestä pitkällä tähtäimellä käydään keskustelua muun muassa EU:ssa. Puhtaan vedyn taloudellinen kannattavuus riippuu sähkön ja maakaasun sekä elektrolyysilaitteistojen ja päästöoikeuksien hintakehityksestä. Suomessa puhtaan vedyn tuotannon ajatellaan pohjautuvan ensisijaisesti tuulienergiaan.

Uutena vedyn käyttökohteena tutkitaan kasvihuonekaasuja synnyttävän koksen korvaamista rautamalmin pelkistimenä niin sanotun vihreän teräksen tuotannossa. Koksilla tarkoitetaan kivihiilestä kuivatislaamalla valmistettua hiiltä, joka soveltuu hiiltä paremmin rautamalmin pelkistykseen, mutta tuottaa prosessissa hiilen tavoin merkittävän määrän kasvihuonekaasuja. Koksia on korvattu esimerkiksi SSAB:n hankkeissa Pohjois-Ruotsissa. Raahan terästehtaan siirtyminen vetypelkistykseen vaatisi noin 9 TWh sähköä vuodessa ja pienentäisi hiilidioksidipäästöjä yli kolmella miljoonalla tonnilla. Vastaavat luvut Kilpilahden öljynjalostamon vedyn tuotannolle ovat 7 TWh ja noin miljoona tonnia.

Akkusähköautot ovat yli kaksi kertaa energiatehokkaampia kuin vetypolttoainetta, joten sähköautot ovat ensisijainen vaihtoehto liikenteen päästöjen vähentämiseksi. Vety-polttoainetta ovat kuitenkin energiatehokkaampia kuin polttomoottoriautot, joten niiden käyttö voi olla perusteltua kohteissa, joissa akkuteknologian suorituskyky ei esimerkiksi ajokantaman suhteen riitä. Tällaisia kohteita ovat esimerkiksi tavarankuljetuksen pitkät runkolinjat, pitkän matkan bussiliikenne sekä rautateiden rataosuudet, joita ei kannata sähköistää. Vety-polttoainetta jakeluinfrastruktuuri kannattaakin suunnitella raskaan liikenteen ehdoilla. Vaihtoehtona vetyinfrastruktuurin rakentamiselle on vedyn jatkojalostus esimerkiksi metsäteollisuudessa syntyvien hiilidioksidilähteiden kanssa synteettisiksi P2X-sähkypolttoaineiksi, joita ovat metaani, metanoli, bensiini, diesel ja kerosiini. Vety-polttoainelle voi tulla jakeluvalvoite osana EU:n Fit-for-55 -säännöstöä. Nykykäytön mukaan vetyä tullaan jatkojalostamaan nestemäisiksi polttoaineiksi ainakin meri- ja lentoliikenteen tarpeisiin.

Yhteenveto: Vetytalous tarjoaa merkittävän kasvumarkkinan alan teknologiatoimittajille. EU:n tavoitteena on 100 miljardin investoinnit vetytalouden laitteisiin ja infrastruktuuriin vuoteen 2030 mennessä. Lisäksi vedyn tuotantoa varten rakennettaisiin sadoilla miljardeilla uutta aurinko- ja tuulivoimakapasiteettia.

3.12 Hiilidioksidin talteenotto, hyötykäyttö ja varastointi

Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi (CCS) ovat yksi tehokkaimmista tavoista vähentää hiilidioksidipäästöjä. Hiilidioksidia voidaan ottaa talteen lämmön- ja sähkötuotannon sekä teollisuuden pistelähteistä ja suoraan ilmakehästä. Talteen otetun hiilidioksidin hiili voidaan joko hyödyntää uudelleen P2X-synteesisprosessien avulla, tai hiilidioksidi voidaan varastoida maankuoreen. Hiilidioksidin talteenotto biomassapohjaisesta hiililähteestä tai ilmakehästä luo yhdessä varastoinnin kanssa teknologisen vaihtoehdon, jolla voidaan saavuttaa

suoria negatiivisia hiilidioksidipäästöjä. Negatiivisilla hiilidioksidipäästöillä pystytään vähentämään biogeenisessä hiilikierrossa olevan hiilen määrää, mikä vähentää hiilidioksidin määrää myös ilmakehässä.

Hiilidioksidin varastointi maankuoreen on todettu teknisesti toimivaksi ja turvalliseksi vaihtoehdoksi. Maantieteellisesti soveltuvimmat varastointimahdollisuudet sijaitsevat Pohjanmeren kaasu- ja öljykentillä sekä merenalaisissa geologisissa muodostelmissa. Hiilidioksidi siirretään Pohjanmerelle laivakuljetuksilla. Neste Oyj:n koordinoimassa, suuressa kansainvälisessä SHARC-hankkeessa testataan Porvoon öljynjalostamolla syntyvän hiilidioksidin yli 96-prosenttista talteenottoa, kuljetusta ja noin 4 Mt:n varastointia ensimmäisten kymmenen vuoden aikana (SHARC 2022). Hanke kuuluu EU:n Innovation Fund-ohjelmaan.

Kasvihuonekaasupäästöt: Hiilidioksidin talteenottoon, hyötykäyttöön ja varastointiin liittyvät teknologiat voidaan jakaa kahteen luokkaan, joita ovat hiilineutraalit ja hiilenegatiiviset teknologiat. Kun hiilidioksidi varastoidaan maankuoreen, fossiilisten hiililähteiden käytössä saavutetaan parhaimmillaan lähes hiilineutraalisuus. Hiilidioksidin talteenotolla ilmakehästä ja biomassan hyötykäytössä saavutetaan hiilineutraalisuus tai hiilenegatiivisuus riippuen siitä, käytetäänkö hiilidioksidia hyödyksi jossakin prosessikokonaisuudessa vai varastoidaanko se maankuoreen. Talteen otetun hiilidioksidin hyötykäytöllä saavutetaan parhaimmillaan hiilineutraalisuus. Nykyteknologioilla hiilidioksidin talteenotossa pistelähteistä saavutetaan yli 90 prosentin hiilen talteenottotehokkuus.

Teknologian taso: Teknologinen taso on kehittynyt tasaisesti viime vuosikymmenen aikana. Tällä hetkellä osa talteenotto-tekniologioista on teollisella teknologiatasolla (TRL 9). Kehitteillä (TRL 5–6) on myös uusia teknologioita, joiden uskotaan tarjoavan tehokkaampia ja taloudellisempia vaihtoehtoja. Teknologioiden kehittymistä on erityisesti hidastanut edellisen vuosikymmenen alhainen hiilidioksidin päästökauppahinta.

Talous ja työllisyys: Nykyiset teknologiat (TRL 9) kykenevät hiilidioksidin talteenottoon 30–70 kustannuksella, joka sisältää investointi- ja käyttökustannukset. Teknologian käytön yleistyessä ja kehittyessä kustannukset pienenevät. Parhaimmat työllisyyden kehittymisnäkökulmat ovat teknologiaoimittajien sektorilla.

Ympäristövaikutukset ja turvallisuus: Hiilidioksidin talteenotossa ja varastoinnissa keskeisin ympäristövaikutuksiin ja teknologian turvallisuuteen liittyvä seikka on hiilidioksidin varastoinnin toimivuus. Pohjois-Euroopan ja Pohjois-Amerikan pitkän ajan geologisten kokemusten, varastointikokeiden ja mallinnojen pohjalta hiilidioksidin varastointi maankuoreen on todettu toimivaksi ja turvalliseksi, kun se toteutetaan geologisten standardien mukaan. Tutkimustiedon pohjalta varastoinnille on arvioitu alle 0,01 prosentin vuotuinen vuotomäärä yli sadan vuoden pitoajalla, mitä voidaan pitää hyvin marginaalisena varastoinnin kokonaisuhyötyihin nähden (Alcalde ym. 2018).

Vientipotentiaali: Hiilidioksidin talteenotto, hyötykäyttö ja varastointi sisältävät useita eri teknologioita voimalaitoksista kemiantekniikan prosesseihin, hiilidioksidin käsittelyyn ja siirtämiseen. Varsinkin suuren mittakaavan laitokset ovat satojen miljoonien eurojen investointeja, joihin löytyy kansallisia laiteoimittajia ja jotka luovat näin mittavan vientipotentiaalin.

Yhteenveto: Hiilidioksidin talteenotolla pystytään vähentämään merkittävästi hiilidioksidipäästöjä lämmön- ja sähköntuotannossa sekä teollisuusprosesseissa. Hiilidioksidin talteenotto, hyötykäyttö ja varastointi tarjoavat merkittävän kasvumarkkinan suuren kokoluokan teknologiaoimittajille. Teknologian valmius on riittävällä tasolla, ja varastointi on todettu toimivaksi ja turvalliseksi. Nykytason talteenotto- ja varastointikustannuksista on esitetty arvioita, jotka alittavat päästökaupan korkeimmat hinnat, mikä luo edellytykset markkinalähtöiselle toiminnalle. Hiilidioksidin päästökauppahinnan näkymät ja lainsäädännölliset vaikutukset vaikuttavat pitkällä tähtäimellä merkittävästi suuriin investointipäätöksiin, joiden avulla teknologiat pystyvät ottamaan merkittäviä kehitysaskeleita.

3.12 Energiansäästö ja energiatehokkuus

EU haluaa, että jäsenmaat vähentävät energiankulutustaan. Loppuenergian määrää voi vähentää paitsi tuottamalla vähemmän tavaraa myös tuottamalla tavaraa vähäisemmällä energiankäytöllä. Energiatehokkuus vähentää energian käyttöä ja samalla kasvihuonekaasupäästöjä kustannustehokkaasti. Tulevaisuudessa energiatehokkuutta voidaan parantaa esimerkiksi energiankäyttöä sähköistämällä. Esimerkkejä tällaisista sovelluksista ovat lämpöpumppujen hyödyntäminen lämmityksessä ja liikenteen sähköistäminen.

Teknologian taso: Tyypillisiä keinoja energiatehokkuuden lisäämiseen ovat sähkön ja lämmön yhteistuotanto, vapaaehtoisten energiatehokkuussopimusten solmiminen sekä energiakatselmusten järjestelmällinen toteuttaminen. (TEM 2022)

Esimerkiksi kaupan alalla energiankulutus on suurta. Kylmälaitteet, ilmanvaihto ja valaistus kuluttavat paljon energiaa. Kaupan alalla lämmönkulutusta on saatu vähennettyä lämmön talteenotolla ja oman sähköntuotannon osuutta kasvatettua aurinkopaneeleja asentamalla. Uusiutuvan tuuli- ja aurinkovoiman lisääminen energiajärjestelmään nostaa järjestelmätasolla energiatehokkuutta. Näissä tuotantomuodoissa primäärienergia päätyy lähes kokonaisuudessaan sähköksi ilman, että sähköenergian tuotannossa juuri syntyy jätelämpöä.

Vientipotentiaali: Suomi on monissa energiansäästötoimissa ja energiankäytön tehokkuudessa kansainvälisesti johtavia maita. Tämä on saavutettu kustannustehokkailla ratkaisuilla ja vapaaehtoisuuteen perustuvalla energiatehokkuussopimusjärjestelmällä. Tällä hetkellä suurin osa luonnonvarojen kestävästä käytöstä edistävän ja liiketoiminnan kielteisiä ympäristövaikutuksia vähentävän cleantech-liiketoiminnan arvosta tulee energiatehokkuudesta. (TEM 2022)

Suomessa on vahva sähkö- ja tehoelektroniikkateollisuus. Se valmistaa vientiin sähkömoottoreita ja -generaattoreita ohjaavia järjestelmiä eli niin sanottuja sähkökäyttöjä, jotka mahdollistavat pyörimisnopeussäädön teollisuudessa käytettäviin pumppuihin, puhaltimiin ja kompressoreihin. Ne ovat tyypillisesti merkittävimpiä teollisuuden sähköenergian käyttäjiä. Taajuusmuuttajaohjatuilla laitteilla voidaan saavuttaa kymmenien prosenttien energiansäästö perinteisiin, kuristamalla säädettyihin toimilaitteisiin verrattuna.

3.13 Kulutusjoustot

Kulutusjousto, joka tunnetaan myös kysyntäjoustopona, tarkoittaa kulutuksen ajallista ohjaamista ulkoisen signaalin, kuten sähkön hinnan tai taajuuden, perusteella. Jousto voi perustua manuaaliseen, sähkön hinnan perusteella tehtävään ohjaukseen tai esimerkiksi taajuuden perusteella tehtävään automaattiseen ohjaukseen. Laajamittainen joustava kysyntä laskee kaikkien kuluttajien sähkön hintaa, kun se huomioidaan kaupankäyntivaiheessa, koska hinnoittelu perustuu marginaalihintaan.

Kulutusjoustolla pystytään reagoimaan nopeasti, jopa milisekunneissa, sähköjärjestelmän vaihteluihin. Siksi se on erinomainen joustoresurssi esimerkiksi voimajärjestelmän nopeassa taajuussäädössä. Tehoa voidaan kuitenkin pienentää vain rajallisen ajan, kuten tunnin tai vuorokauden, sisällä, joten kulutusjousto ei sovellu pitkän aikavälin joustoksi.

Teknologian taso: Sähkökuormia on ohjattu ulkoisen signaalin perusteella jo vuosikymmeniä. Hyvä esimerkki on sähkölämmityksen yöohjaus. Etäohjauksessa käytetään myös nopeampaan vasteaikaan perustuvaa tekniikkaa, jolloin kulutusjousto voidaan käyttää nopeaan taajuussäätöön. Suomessa kulutuskohteet voivat osallistua kulutusjoustomarkkinoille aggregoituina, mikä tarkoittaa, että pienistä kohteista muodostetaan isompi kokonaisuus. Taajuussäätömarkkinoilla sallitaan myös kolmannen osapuolen aggregointi, jolloin joustoagreggaattori ei tarvitse olla kohteen sähkönyöjä.

Kulutuksen ohjaukseen ei kuitenkaan ole muodostunut yleisiä standardeja tai käytänteitä, vaan ohjauksen tekninen toteutus on yleensä toimittajakohtaista. Vaikka teknologia on vakiintunutta, haasteena kulutusjoustopona on se, että joustopona saatava korvaus on suhteellisen matala, jolloin ylimääräiset teknologian tai asennusten kustannukset voivat heikentää toiminnan kannattavuutta.

Kysyntäjoustopona potentiaalia on vaikea arvioida yksiselitteisesti, koska joustavuudessa on myös aikaulottuvuus; osa kysyntäkohteista kykenee minuuttitason joustoponaan, kun taas toisissa käyttökohteissa on mahdollisuus joustaa useita tunteja. Lisäksi joustoponapotentiaaliin vaikuttaa merkittävästi siitä saatava korvaus. Fingridin arvion mukaan markkinoille osallistuu tällä hetkellä 300–1 800 MW joustoponaa, riippuen käytettävästä (Fingrid Kysyntäjousto 2022). Järventausta ym. (2015) on puolestaan arvioinut, että tekninen ohjauspotentiaali pientalojen sähkölämmityksessä on noin 3 000 MW. Pientalon lämmitys-

tä voidaan tyypillisesti rajoittaa vähintään tunnin ajan ilman merkittävää vaikutusta asumismukavuuteen.

Vientipotentiaali: IEA:n arvion mukaan sähköjärjestelmien joustotarve nelinkertaistuu globaalisti vuosina 2020–2050. Kulutusjousto tulee olemaan tässä merkittävässä roolissa. Vuoden 2015 asiantuntijakyselyn mukaan Suomen energiateknologioiden suurin vientipotentiaali on 2030-luvulla automaattisissa kulutusjoustoponakäytöissä. Suomessa on sähköteknistä ja ICT-osaamista, jotka yhdistyvät kulutusjoustoponaan, kun sähkökäyttöä ohjataan älykkäästi. Suomessa on myös hyvin edistykselliset sähkömarkkinat, mikä mahdollistaa ratkaisujen toteuttamisen kotimaan markkinoilla.

Yhteenveto: Kulutusjoustopona on keskeinen rooli tehotasapainon ylläpitämisessä, kun sähköntuotanto perustuu entistä enemmän vaihtelevaan uusiutuvaan tuotantoon. Tässä Suomessa on myös hyvää vientipotentiaalia. Keskeinen haaste on ratkaisuiden kannattavuus ja houkuttelevuus: joustopona saatava korvaus on vähäinen, mikä vuoksi asia ei ole houkutteleva sähkökäyttäjille. Kulutuspuolen jousto pääsee Suomessa hyvin sähkömarkkinalle, joten markkinasäännöt ovat toimivia nykyisellään. Kustannustehokkuuden varmistamiseksi tarvitaan kuitenkin sääntelyä, joka varmistaa, että tekninen ohjausmahdollisuus toteutetaan rakentamisen tai perusparannuksen yhteydessä kohteisiin, joissa on tunnistettu joustoponapotentiaalia esimerkiksi lämmityksessä tai sähköauton latauksessa.

3.14 Energiavarastot

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

Teknologian taso: Maailmassa on arviolta noin 200 GW sähköverkkoon kytkettyä sähkövarastotehoa, josta 80 prosenttia eli 160 GW on pumppuvesivoimaloita. Pumppuvesivoimaloiden kapasiteetti riittää vuorokausi-, viikko- tai kuukausitason varastointitarpeeseen. Niiden yleistymistä hidastavat sopivien sijoituspaikkojen puute sekä ympäristökysymykset. Suomessa Pyhäsalmen kaivokseen on suunniteltu maanalaista pumppuvesivoimalaa, jonka teho voisi olla 70 MW.

Litium-ioniakut ovat nopeimmin kasvava sähkön varastointitekнологia. Kehitystä ajavat etenkin liikenteen sähköistymisen ja autoteollisuuden tarve ajovoima-akuille. Litium-akkujen vuosituotannon on arvioitu kasvavan 200 GWh:sta 2 000–4 000 GWh:iin vuoteen 2030 mennessä, mikä vastaisi 25–50 miljoonan sähköauton tarpeita. Verkkoon kytkettyjen sähkövarastojen määrän on arvioitu jäävän 10 prosenttiin

sähköautojen akkumarkkinoista. Akkumarkkinoiden kasvua rajoittavat lähinnä raaka-aineiden riittävyys ja riittämättömät investoinnit raaka-ainetuotantoon.

Litium-akkujen käyttö sähköverkkoympäristössä mitoitetaan nykyään 0.5–4.0 tunnin kapasiteetin mukaan, jolloin akusto voi toimia sähköverkon säätösähkö- ja reservimarkkinoilla, leikata käyttökohteen kulutushuippuja sekä toimia lyhytaikaisena energiavarastona ja varavoimana. Suomen suurin akkusähkövarasto, teholtaan 30 MW, on kytketty Fingridin siirtoverkkoon Lappeenrannassa, ja se toimii taajuusohjatulla reservimarkkinalla. Maailmalla aurinkosähkön varastointiin suunnitellut litiumakut mitoitetaan tyypillisesti neljän tunnin kapasiteetin mukaan, jolloin ne riittävät energian varastointiin keskipäivältä illan kulutushuippua kattamaan.

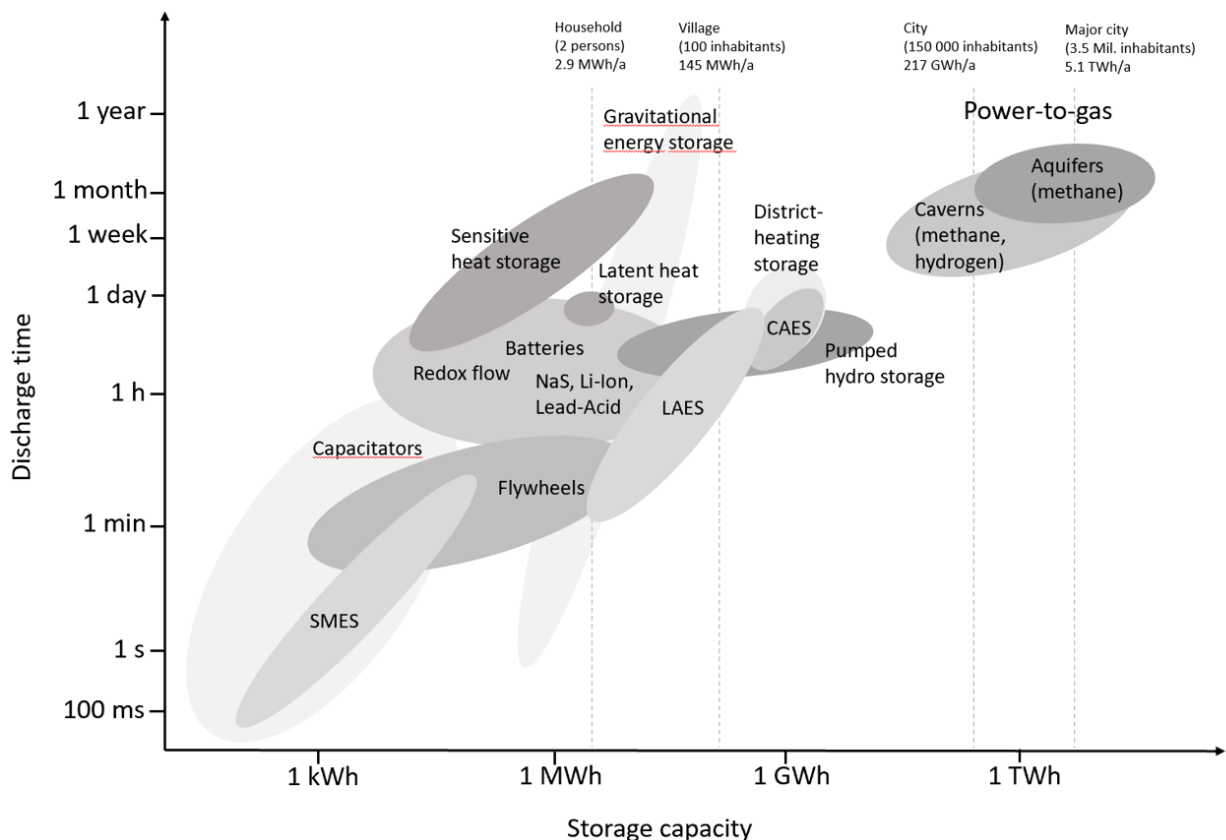
Sähkön vuorokausi- ja viikkotason varastointiin on kehitetty pumppuvesivoiman rinnalle useita teknologioita, kuten paineilma- ja painovoimavarastot, painovoimaan perustuvat mekaaniset varastot, ilman nesteytykseen ja kryogeniikkaan perustuvat energiavarastot sekä vanadiini-virtausakut, mutta ne ovat vielä pilotointimittakaavassa ja siksi kalliita. Sähkön kausivarastointiin soveltuvat lähinnä vety ja siitä valmistetut synteettiset polttoaineet, mutta tämäkin teknologia on vielä pilotointitilassa ja siksi kiertohyötysuhteet ovat suhteellisen matalat.

Huoltovarmuus ja omavaraisuus: Energiavarastojen taloudellisuus riippuu hankintahinnan lisäksi oleellisesti lataus- ja purkukertojen määrästä, jolloin lyhytaikaiset käyttökohteet tulevat ensimmäisinä kannattaviksi. Kausivarastot, joilla vuotuisia latauskertoja on vain muutamia, eivät ole taloudellisesti kannattavia nykyisillä energiamarkkinoilla. Monilla paikkakunnilla investoidaan lämmön kausivarastointiin kalliuluoliin, ja sen taloudelliseen kannattavuuteen vaikuttavat merkittävästi sähköhinnan vaihtelut.

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

3.15 Energiankantajien varastointi ja siirto

Energiankantajalla tarkoitetaan tässä yleisesti energiaa sisältävää väliainetta tai järjestelmää, jota voidaan siirtää tai varastoida ja jonka sisältämää energiaa voidaan tarvittaessa käyttää hyödyksi jossain toisessa muodossa, kuten läm-



Kuva 17. Energiavarastot kapasiteetin ja varastointiajan suhteen esitettyinä (LUT).

Taulukko 1. Energiantantajien energiatihyksiä.

POLTTOAINE	TIHEYS [kg/m ³]	LÄMPÖARVO [MJ/kg]	ENERGIATIHEYYS [MWh/m ³]
Kevyt polttoöljy	850	45	10,6
Biodiesel	886	37	9,1
Metaani	420 (neste)	49,5	5,8
Metanoli	790	19,5	4,3
Ammoniakki	680 (neste)	18,8	3,5
Vety	70 (neste)	120	2,3
Sähköakku	2190	0,6	0,35

pönnä tai mekaanisena työnä. Energiantuotannon ja -kulutuksen kohdentamiseksi tarvitaan energian siirtoverkkoja. Tavallisimmin energiaa siirretään sähkönä, polttoaineena tai lämpö- ja kylmäverkoissa.

Lämmön ja kylmän siirto on kannattavaa vain melko lyhyillä siirtoetäisyyksillä. Sekä sähköä että polttoaineita voidaan kuljettaa tehokkaasti ja vähäisin häviöin pitkiäkin matkoja. Sähköenergian ja vedyn haasteita ovat niiden hankala varastointimahdollisuus ja alhainen energiatiheys, joka rajoittaa käyttöä esimerkiksi pitkän matkan liikenteessä. Taulukossa 1 on esitetty joidenkin energiantantajien energiatihyksiä.

Kasvihuonekaasupäästöt: Hiilivetyperusteiset polttoaineet ovat tehokkaita energiantantajia. Jos ne on tuotettu kestävästä biomassasta tai uusiutuvasta sähköstä, voidaan niitä pitää myös lähes hiilineutraaleina. Metaani on merkittävä kasvihuonekaasu, ja sen käyttöön ja kuljetukseen voi liittyä vuotoja, joilla on myös merkittävä ilmastovaikutus.

Teknologian taso: Energiantantajien valikoima kasvaa, kun vety ja muut hiilineutraalit polttoaineet korvaavat nykyiset. Nykyinen energiainfrastruktuuri on rakentunut pitkälti sähkön ja hiilivetyjen varaan. Kokemus vedyn siirrosta rajoittuu muutamiin pilottikohteisiin. Sähköakkujen kehitys on nopeaa, mutta niiden rinnalle tarvitaan muitakin energian varastointimuotoja. Maakaasun luolavarastoinnista on kokemusta, ja luolavarastoilla voi olla rooli myös vedyn varastoinnissa. Maanalaiset lämpövarastot ovat myös keskeisessä roolissa monien kaupunkien hiilineutraaliussuunnitelmissa.

Huoltovarmuus ja omavaraisuus: Uusiutuvat energialähteet jakautuvat maantieteellisesti fossiilisia energiavaroja tasaisemmin. Suomesta voi tulla aiempaa energiaomavarausempi. Tämä vaatii kuitenkin merkittäviä investointeja energiaverkkoihin.

Talous ja työllisyys: Siirto- ja varastoinfrastruktuurin rakentaminen vaatii merkittäviä taloudellisia ponnistuksia, joilla on merkittävä työllistävä vaikutus.

Kestävyys ja ympäristövaikutukset: Uusien energiantantajien varastointi ja kuljetus on haastavampaa kuin nykyisten polttoaineiden, mikä kasvattaa siirtoketjun häviöitä. Koko ketjun ympäristövaikutukset on otettava huomioon kestävyystarkasteluissa.

Turvallisuus, riskit ja haitat sekä säädökset: Vedyn turvallinen käyttö vaatii uusia säädöksiä räjähdysvaaran takia. Energiaverkkoihin liittyy usein geopolittisia jännitteitä, ja uudet energiantantajat voivat aiheuttaa alueellisten energiavoima-suhteiden muutoksia.

Vientipotentiaali: Uusien energiantantajien tuotantoon ja siirtoon liittyy monia kehitystarpeita, jotka tarjoavat suuret vientimarkkinat energia- ja teknologiateollisuudelle.

Yhteenveto: Energian siirto- ja varastointikapasiteetin tarve tulee kasvamaan moninkertaiseksi, kun uusiutuvan energian tuotanto kasvaa. Uusien hiilineutraalien polttoaineiden tuotanto vaatii vahvistusta sekä sähkö- että kaasuverkkoihin. Uudet energiantantajien jalostuskeskittymät nousevat kohteisiin, joissa on saatavilla uusiutuvaa energiaa, luotettavat olosuhteet sekä helppo pääsy raaka-aine- ja lopputuotemarkkinoille.

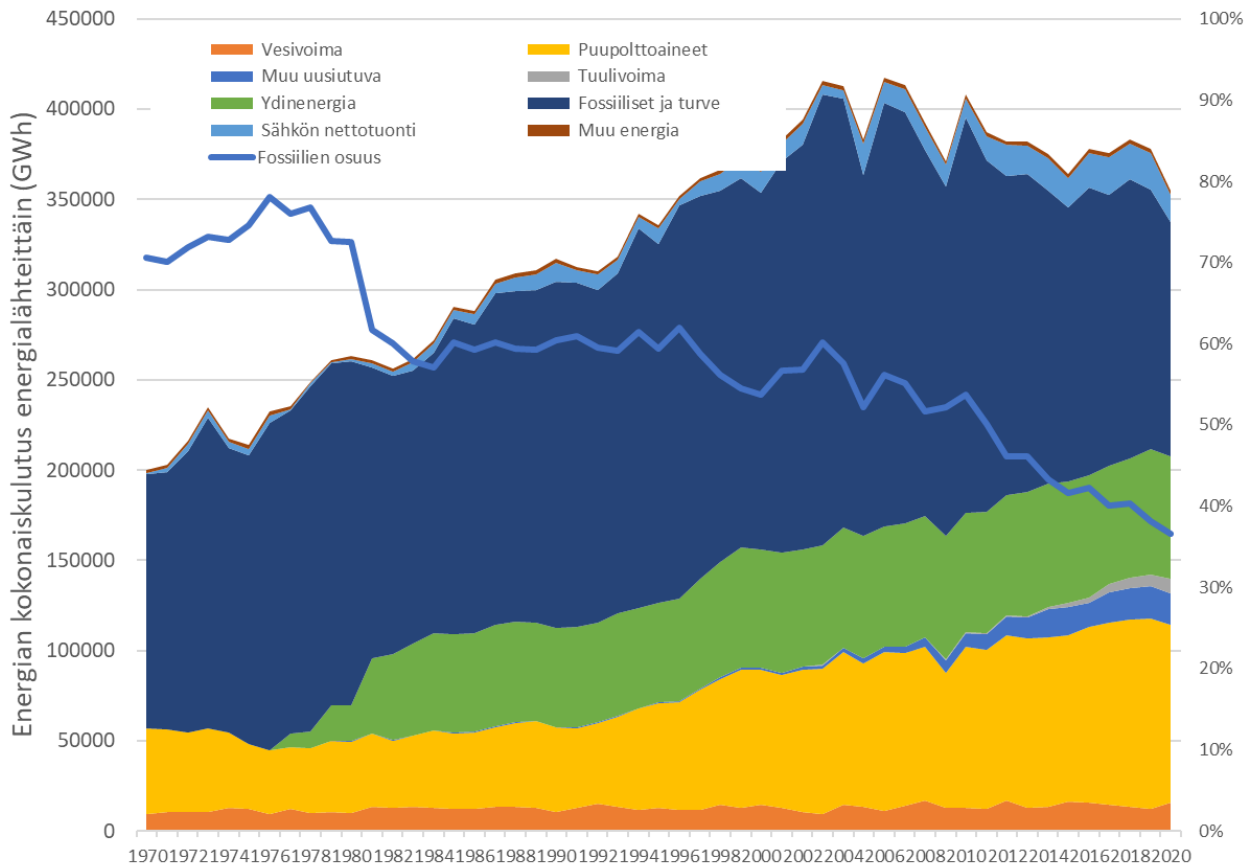


4

SUOMEN ENERGIA- JÄRJESTELMÄN TILA JA KEHITYSSUUNNAT

Tässä luvussa analysoidaan energiajärjestelmän merkittävimpiä tekijöitä, joita tarvitaan hiilineutraaliuteen siirtymiseen.





Kuva 18. Energian kokonaiskulutus Suomessa energialähteittäin 1970–2020 GWh. (Tilastokeskus 2022a)

Suomen energiajärjestelmä on edelleen varsin riippuvainen fossiilisista polttoaineista. Vaikka uusiutuvien ja vähähiilisten polttoaineiden osuus nousee tasaisesti, merkittävä osa energiasta on edelleen peräisin fossiilisista energialähteistä. Fossiilisten osuus energian kokonaiskulutuksesta vuonna 1990 oli 60,5 prosenttia, ja se on vähentynyt vuoteen 2020 mennessä 36,6 prosenttiin (kuva 18).

Tuulivoiman kasvun ja järjestelmän sähköistymisen arvioidaan olevan jatkossa oleellisessa roolissa, kun tavoitellaan energiajärjestelmän hiilineutraaliutta. Sääolosuhteista johtuva tuuli- ja aurinkovoiman tuotantovaihtelu synnyttää lisäkustannuksia energiajärjestelmässä. Kustannusten arvioidaan kasvavan merkittäviksi tuulivoiman tuotanto-osuuden lisääntyessä. Kun fossiilisen energian määrä vähenee, keskeisimpiä sähkön tuotantomuotoja ovat tuulivoiman lisäksi ydinvoima, bioenergia ja myös vesivoima ylläpidettävän kapasiteettinsa puitteissa. Lisäksi muut luvussa 3 mainitut energiamuodot tukevat omalta osaltaan energiantuotannon kokonaisuutta. Aurinkoenergian osuus tulee kasvamaan, mutta Suomen olosuhteissa sillä tulee olemaan pienempi rooli kuin eteläisemmillä alueilla.

Pidemmällä tähtäimellä hiilineutraaliuden saavuttamiseksi esitetään negatiivisia kasvihuonepäästöjä, joilla voidaan muun muassa kompensoida mahdollisia teollisuuden päästöjä. Sopivina teknisinä ratkaisuuina pidetään hiilidioksidin

talteenottoa ilmakehästä ja biomassan energiakäytöstä. Päästö muuttuu negatiiviseksi, kun hiilidioksidi varastoidaan maankuoreen. Suomella on erityinen asema merkittävänä bioenergian osuuden tuottajana, minkä ansiosta hiilidioksidin talteenotolla ja varastoinnilla on mahdollista saada aikaan merkittäviä negatiivisia päästöjä. Toisaalta talteen otetulle hiilidioksidille on tarvetta myös vetytaloudessa esimerkiksi synteettisten ja hiilineutraalien P2X-sähköltpolttaineiden tuotannossa.

4.1 Sähkö

Sähköntuotanto on Suomessa erittäin vähähiilistä. EU:n keskihiilipäästöt tuotetulle sähkölle ovat olleet 231 gCO₂/kWh, Saksan 294 gCO₂/kWh ja Suomen 63 gCO₂/kWh (Energiateollisuus 2022b). Tämä johtuu siitä, että lähes 90 prosenttia Suomessa tuotetusta sähköstä on hiilidioksidipäästötöntä.

Vuonna 2020 sähkön hankinnasta yli neljännes oli ydinvoimasähköä, noin viidennes vesivoimaa ja kymmenesosa tuuli- ja aurinkoenergiaa (taulukko 2). Sähkön nettotuonti oli suurta lähes viidenneksen osuudella, mutta määrän odotetaan vähenevän lähivuosina selvästi. Teollisuuden ja kaupunkien lämpövoima muodosti sähkön tuotannosta neljänneksen, ja se sisältää pääosin sähkön ja lämmön yhteistuotantolaitosten tuotantoa.

Taulukko 2. Sähkön hankinta ja kokonaiskulutus vuonna 2020 (Tilastokeskus 2022b)

HANKINTA	GWh	%
Ydinvoima	22 354	27,4
Vesivoima	15 669	19,2
Tuulivoima	7 938	9,7
Aurinkovoima	218	0,3
Nettotuonti	14 977	18,4
Muu lämpövoima	20 417	25,0
Yhteensä	81 573	100
KOKONAISKULUTUS	GWh	%
Teollisuus ja rakentaminen	37 331	45,8
Kotitaloudet ja maatalous	23 441	28,7
Palvelut ja julkinen kulutus	17 780	21,8
Siirto- ja jakeluhäviöt	3 021	3,7
Yhteensä	81 573	200

Suomen teollisuus käyttää sähköstä lähes puolet. Koti- ja maataloudet käyttävät puolestaan siitä reilun neljänneksen. Palvelut ja muut julkiset tahot käyttävät sähköstä viidenneksen.

4.2 Lämpö

Suomen lämmöntuotanto (taulukko 3) perustuu pääosin uusiutuvien biopohjaisten polttoaineiden käyttöön. Näitä ovat selluteollisuuden sivutuotteet eli mustalipeä ja kuori yhdessä saha- ja vaneriteollisuuden sivujakeiden kanssa. Vuonna 2020 uusiutuvat polttoaineet muodostivat yhteensä 64 prosenttia lämmöntuotannosta. Kokonaismäärästä yli kaksi kolmasosaa saatiin yhteistuotantolaitoksista ja loput erillistuotantona.

Taulukko 3. Suomen lämmöntuotanto vuonna 2020. Taulukossa ei ole mukana niin sanottua lähilämpöä, jolla tarkoitetaan kotitalouksien ja julkisten palveluiden omia lämpökattiloita. (Tilastokeskus 2022b)

	LÄMMÖN TUOTANTO GWh	%
Öljy	2 527	2.9
Kivihiili	4 661	5.4
Maakaasu	7 900	9.2
Muut fossiiliset	2 152	2.5
Turve	7 141	8.3
Mustalipeä	27 561	32.0
Muut puupolttoaineet	24 507	28.4
Muut uusiutuvat	2 674	3.1
Muut energialähteet	7 123	8.3
Yhteensä	86 246	100.0

Tuotetusta lämmöstä teollisuuden tarpeisiin käytettiin 51 100 GWh, josta 54 prosenttia saatiin mustalipeästä ja kaiken kaikkiaan 77 prosenttia uusiutuvista polttoaineista. Loppuosa lämmöstä, 35 100 GWh, käytettiin kaukolämmitykseen.

Kaukolämmitys

EU on pitkään yrittänyt saada Euroopan maita lisäämään kaukolämpöä, koska se koetaan merkittäväksi tavaksi edistää EU:n energiavoittoja (Galindo ym. 2016). Suomi on yksi niistä maista, joissa kaukolämpö on jo nykyisellään merkittävä lämmitysmuoto. Vuonna 2020 kaukolämmön osuus kaikesta lämmön käytöstä oli 41 prosenttia, ja tästä reilusti yli puolet tuotettiin yhteistuotantolaitoksissa. Kaukolämmöstä 38 prosenttia tuotettiin puupolttoaineilla ja kaiken kaikkiaan 44 prosenttia uusiutuvilla polttoaineilla. Myös fossiililla polttoaineilla ja turpeella oli kaukolämmön tuotannossa vielä merkittävä osuus (43 %).

Suomen kaukolämmön tuotannon ominaispäästöt ovat laskeneet tasaisesti vuodesta 2000 alkaen fossiilisista polttoaineista luopumisen myötä. Vuonna 2021 ne olivat noin 123 gCO₂/kWh (Energiateollisuus 2022a). Fossiilisista polttoaineista luopumisen ohella on muitakin keinoja edistää kaukolämmityksen siirtymistä hiilineutraaliuteen. Kun yhdistetään biomassaa käyttävä yhteistuotantolaitos sekä hiilidioksidin talteenotto ja varastointi (Bioenergy with Carbon Capture and Storage, BECCS) voidaan sähköä ja lämpöä tuottaa jopa hiilinegatiivisesti. Tulevaisuudessa myös pienikokoisilla ydinreaktoreilla (Small Modular Reactors, SMR) saatetaan tuottaa kaukolämpöä keskisuuren tai suuren kaupungin tarpeisiin.

Kaukolämpö on viime vuosina menettänyt asemiaan pientalojen ja uudisrakentamisen lämmitysmuotona maalämpöpumppujen yleistymisen myötä. Kaukolämpö on kuitenkin keskeisessä roolissa tulevaisuuden energijärjestelmissä erityisesti tiheään asutuilla alueilla, joissa yhteistuotantolaitokset tuottavat sähköä ja lämpöä energiatehokkaasti ja lämmönjakeluverkko voidaan rakentaa kustannustehokkaasti.

Kaukolämmön kilpailukykyä pyritään jatkuvasti parantamaan. Uusia kehityssuuntia ovat lämpöpumppujen käyttö (esim. lämmön talteenotto jätevedestä ja lauhuvasta savukaasusta), kaksisuuntainen kaukolämpöverkko (asiakas voi ostaa tai myydä lämpöä) ja matalalämpötilaverkot. Viimeksi mainittujen avulla voidaan paitsi pienentää lämpöhäviöitä myös helpottaa hukkalämmön hyötykäyttöä ja parantaa lämpöpumppujen toimintaedellytyksiä. Toisaalta lämpöpumppujen yleistynyt käyttö kaukolämmön korvaajina luo haasteita yhteistuotantolaitosten kannattavuudelle pienentyneen lämpökuorman vuoksi.

Lämmön varastointi on edullista toteuttaa kaukolämpöverkon yhteyteen. Verkolla on jo itsessään suuri varastointikapasiteetti vesitilavuuden ansiosta. Jos käytetään erillistä varastoa, lämpö varastoidaan tavallisesti veteen, joka on erotettu kaukolämpöpiiristä. Lämmön varastointiin voidaan käyttää muitakin väliaineita kuin vettä, ja myös sähköä voidaan varastoida lämpönä käytettäväksi. Ratkaisulla voidaan vähentää polttoaineiden käyttöä lämmöntuotannossa.

4.3 Energiantuotannon ja -kulutuksen tasapaino

Sähkö- ja lämpöenergian tuotannon ja kulutuksen välisen tasapainon ylläpitäminen on keskeinen vaatimus energijärjestelmälle. Perinteisesti kulutuksen muutoksiin on vastattu tuotantoa muuttamalla, tyypillisesti käyttämällä varastointiin soveltuvia kiinteitä, nestemäisiä tai kaasumaisia polttoaineita. Ilmastonmuutoksen hillitseminen ohjaa sähköenergian tuotantoa yhä enemmän tuuli- ja aurinkovoimaan, joiden tuotanto on epäsäännöllistä sekä hetkellisesti että kausittain. Kun samalla tasapainottamisessa käytettyjen fossiilisten polttoaineiden määrä vähenee selvästi, eivät nykyiset vähähiiliset menetelmät sähköntuotannon ja kulutuksen tasapainottamiseen ole jatkossa riittäviä. Nykyisillä menetelmillä ja mahdollisesti myös niiden tehostamisella on kuitenkin merkittävä rooli osaratkaisuna jatkossa.

Nykyistä vesivoimakapasiteettia voidaan osittain käyttää sähköntuotannon tasapainottamiseen, mutta sen käyttö on kuitenkin rajallista ja vesitilanteesta riippuvaa. Tuotannon joustavuuden kannalta on edelleen tärkeää käydä sähkökauppaa naapurimaiden välillä sekä käyttää biomassaa ja biopolttoaineita sähkö- ja lämpöenergian tuotannossa. Ydinvoiman käyttö sähköntuotannossa on ollut Suomessa edullista lähes täydellä teholla, joten sillä ei ole toistaiseksi ollut merkittävää roolia tuotannon ja kulutuksen tasapainottamisessa. Kuormanseuranta ydinvoimalla on kuitenkin teknisesti mahdollista ja muun muassa Ranskassa jokapäiväistä.

Myös kaukolämpöjärjestelmissä omat termiset puskurivarastonsa, jotka voivat osallistua kapasiteettiansa rajoissa tuotannon säätelyyn. Termiset varastot soveltuvat myös sähköenergian epäsuoraan varastointiin, jos ne muunnetaan lämpöpumpulla lämpöenergiaksi. Tuotannon sopeuttamisen lisäksi myös kulutuksen joustoa on käytetty jossakin määrin tasapainon saavuttamiseen. Myös kulutusjoustopuutteen lisääminen nähdään osana tulevaisuuden ratkaisua. Tuotannon sopeuttamisesta on osittain kysymys niin sanotussa sektori-integraatiossa, josta on oma lukunsa (luku 4.4).

Tulevaisuudessa tarvitaan uusia keinoja tasapainottamaan sekä lyhyen että pitkän aikavälin kausittaisen kulutuksen ja tuotannon välistä epätasapainoa, koska vaihtelevan uusiutuvan sähköenergian tuotanto lisääntyy ja tuotannon vaihteluun perinteisesti paremmin sopeutuvan fossiilisen energian käyttö vähenee. Luvussa 3.15 esitetyt, eri aikaväleille soveltuvia energiavarastoja on tullut ja on tulossa osaksi energijärjestelmää. Erityinen haaste energijärjestelmän toimintavarmuudelle ja riittävydelle on energiankulutuksen kausittaisten huippukuormien kattaminen talviaikaan. Vedyn tuotanto ja siitä valmistetut synteettiset polttoaineet, joita voidaan varastoida kausiluonteisesti, ovat merkittävimpiä kehitteillä olevia, kausivarastointiin soveltuvia teknologioita. Kyseisen teknologian kiertoahyötysuhteet ovat suhteellisen matalat ja kustannustaso melko korkea, mutta sen rooli nähdään silti tärkeänä tulevaisuudessa, kun energian varastoinnin ja tuotannon vaihtelutarpeen merkitys kasvaa.

Vetytalouden ja -teknologian kehittäminen onkin merkittävä osa Suomen ilmasto- ja energiastrategiaa. Vetytaloudessa tehonvaihteluun pystyvät, vetyä tuottavat elektrolyysilaitokset nähdään myös tärkeänä osaratkaisuna tuotannon ja kulutuksen tasapainottamisessa.

Nykyisin sähkömarkkinat perustuvat pääosin energian myyntiin. Energiankulutuksen ja -tuotannon välisen tasapainottamisen oletetaan saavan riittävästi tuloja energianhinnanvaihtelusta. Mikäli energianhinnanvaihtelu ei synnytä riittäviä investointeja tasapainottaviin resursseihin, tarvitaan energiamarkkinan rinnalle kapasiteettikorvauksiin perustuva markkina, jossa tuotetun energian sijaan tai sen lisäksi maksetaan valmiudesta lisästä tuotantoa tai pienentää kulutusta.

Suomessa Energiavirasto ylläpitää tehoreservijärjestelmää ja toimitusvarmuutta sellaisissa tilanteissa, joissa sähkömarkkinaehtoinen tarjonta ei riitä kattamaan sähkönkulutusta. Järjestelmä rahoitetaan nykyään sähköjärjestelmän ja kantaverkon hyödyntämiseen perustuvilla, sähkönkulutukseen kohdistettavilla erillisillä maksuilla, joita Fingrid kerää siirtopalveluiden käyttäjiltä. Muuttuva energijärjestelmä luo painetta kehittää tehoreservijärjestelmää. Kun vaihtelevan uusiutuvan energian määrä lisääntyy tulevaisuudessa, kasvaa myös järjestelmän rooli. Siksi sitä täytyy kehittää toimitusvarmuustarpeiden mukaisesti. Esimerkiksi jo seuraavalla tehoreservikaudella tehoreserviin on mahdollista hyväksyä voimalaitosten ja kulutusjoustopuutteen kykenevien kohteiden lisäksi energiavarastoja.

Energiajärjestelmän rakenteeseen ja toimintaan sisältyy tulevaisuudessa paljon epävarmuuksia, mikä vaikeuttaa tulevien haasteiden mittaluokan arviointia. Kun energiamurros etenee, toimitusvarman energijärjestelmän ylläpitämiseksi tarvitaan joka tapauksessa varautumista riittävän kokoihin ja joustaviin tehoreserveihin sekä kasvavien järjestelmäkustannusten kattamiseen.

4.4 Sektori-integraatio

Sektori-integraatio on yksi sähköntuotannon ja -kulutuksen tasapainottamisen keinoista. Siinä hyödynnetään eri energiamuotojen tuotannon ja kulutuksen eritahtisuutta, jolla voidaan tasata tuotannon nopeaa vaihtelua. Perinteisin integraatio tapahtuu sähkön ja lämmön välillä. Tulevaisuudessa myös vedyn ja siitä jatkojalostettavien energiankantajien tuotanto tuo uuden joustokomponentin energijärjestelmään. Kun sähköautot yleistyvät, myös liikenne kytkeytyy kiinteämmäksi osaksi energijärjestelmää. Sähköautojen akkujen älykäs lataus voi tuoda merkittävästi lisää uutta joustokapasiteettia.

Sektori-integraation täysimääräinen hyödyntäminen edellyttää myös erilaisia energiavarastoja. Lämpövarastot ovat suoraviivaisin tapa toteuttaa sähkö- ja lämpöverkkojen integraatiota. Perinteisiä lämpövarastoja ovat kiinteistökokoluokan lämminvesivaraajat, joilla voidaan vastata tuntien tai enintään muutamien vuorokausien vaihteluihin. Viime vuosina suuret lämpövarastot ovat yleistyneet, ja niissä voidaan parhaimmillaan

laan varastoida lämpöä useiden kuukausien jaksoja kesältä talvikaudelle.

Jos lämpö halutaan muuntaa takaisin sähköksi, pitää lämpöä varastoida riittävän korkealla lämpötilatasolla, jotta sähkön-tuotannon hyötysuhde pysyy kohtuullisena. Tehokkain energian pitkäaikaisvarastointi onnistuu polttoaineiden muodossa. Vetyvarastoilla ja/tai vedystä johdettujen hiilineutraalien, nestemäisten ja kaasumaisten polttoaineiden varastoilla on merkittävä rooli energijärjestelmän huoltovarmuudessa. Lisäksi tarvitaan huippukuormavoimalaitoksia, joissa polttoaineiden energia voidaan muuntaa tarvittaessa sähköksi ja lämmöksi silloin, kuin uusiutuvan energian tuotanto ei ole riittävää. Perinteisiä huippukuormalaitoksia ovat kaasuturbiini- ja polttomoottorivoimalaitokset, jotka ovat pääomakustannuksiltaan edullisia. Se on perusedellytys varavoimalaitoksille, joita käytetään vain lyhyitä jaksosia vuodessa.

4.5 Infrastruktuuuri

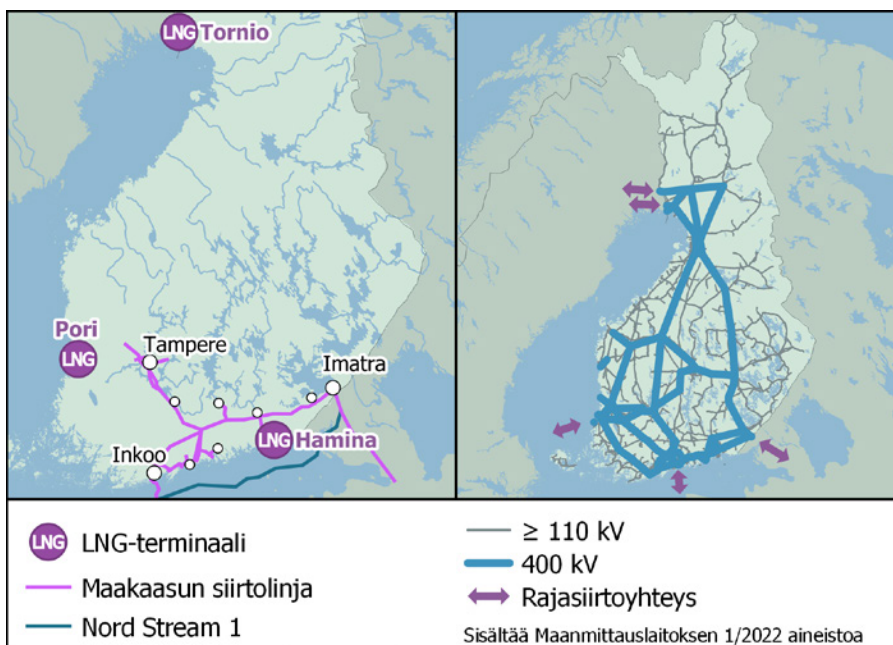
Suomen merkittävin energiainfrastruktuuuri on sähköverkko, joka on varsin kattava ja toimintavarma nykyisissä olosuhteissa. Fingrid ylläpitää Suomen kantaverkkoa, johon kuuluu noin 14 400 kilometriä voimajohtoja. Suomen sähköjärjestelmä on osa yhteispohjoismaista sähköjärjestelmää yhdessä Ruotsin, Norjan ja Itä-Tanskan järjestelmien kanssa. Lisäksi Venäjältä ja Virosta on Suomeen tasasähköyhteydet, joilla pohjoismaiden järjestelmä on yhdistetty Venäjän ja Baltian voimajärjestelmiin. Maiden välinen tehon siirto on kaksisuuntaista lukuun ottamatta yhteyttä Venäjälle, joka mahdollistaa siirron vain Venäjältä Suomeen.

Sähköverkon lisäksi Etelä-Suomessa on 1 150 kilometriä pitkä maakaasuverkko, joka hankkii maakaasua Venäjältä Imatran

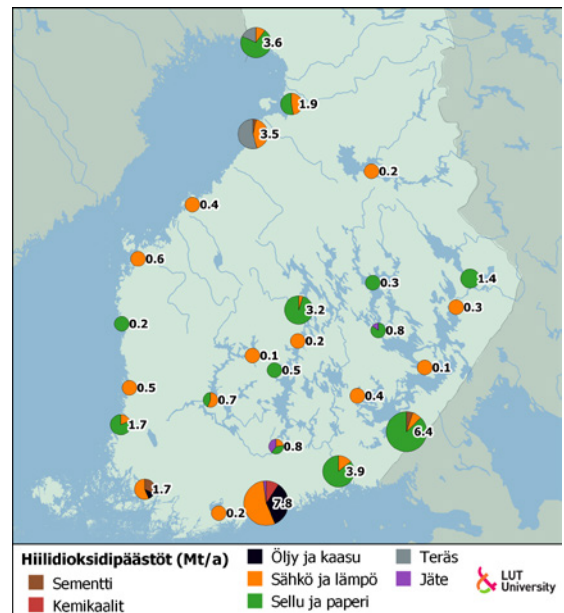
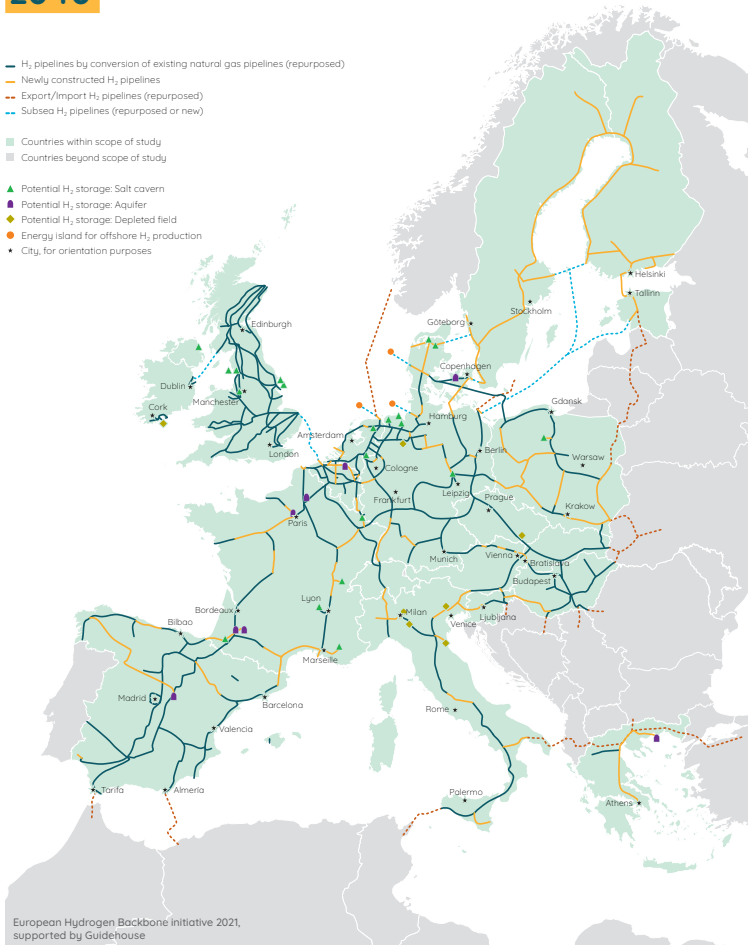
kautta sekä Baltic Connector -putken kautta Virossa Inkooseen. Lisäksi verkossa siirretään kotimaista biokaasua suomalaisilta biokaasulaitoksilta. Kaasuverkkoa operoi Gasgrid Finland. Kaasuverkoston ulkopuolelle maakaasua jaellaan nesteytettyinä maakaasuna (LNG). Nesteytetyn maakaasun terminaaleja on perustettu Poriin ja Tornioon. Lisäksi Haminan satamaan on valmistumassa Suomen kolmas LNG-terminaali, joka tulee olemaan toistaiseksi ainoa maakaasun siirtoverkkoon kytkettävä terminaali. LNG-terminaalien yhteydestä maakaasua voidaan jakaa alueellisesti teollisuuden sekä auto- ja laivaliikenteen käyttöön.

Nykyisten sähkö- ja kaasuverkostojen lisäksi energianjakeluinfrastruktuurit käsittävät nestemäisten polttoaineiden jakeluasemat sekä niihin liittyvät polttonesteiden raide- ja kumipyöräkuljetukset. Henkilöliikenteen sähköistyminen vaatii tulevaisuudessa uudistuksia sekä sähkönsiirtoon että sähköautojen latausasemaverkkoihin.

Tulevaisuuden hiilineutraalisuustavoitteet edellyttävät merkittäviä määriä lisää päästöttömän sähkön tuotantoa. Uusi tuotanto on suurelta osin tuulivoimaa, jossa huipputuotannon ja keskituotannon vaihtelu on suurta, mikä johtaa sähköverkon kapasiteettivaatimusten merkittävään kasvuun. Tuulivoimapotentialiaali jakautuu myös uudella tapaa, mikä aiheuttaa muutoksia pohjois-etelä- ja länsi-itäsuuntaiselle sähkönsiirrolle. Yhtenä vaihtoehtona sähkönsiirrolle pidetään vetyä, jonka roolin energiankantajana oletetaan kasvavan voimakkaasti. Eurooppalaisessa Hydrogen Backbone -visiossa (Jens ym. 2021) tulevaisuuden energijärjestelmän on ajateltu perustuvan laajalti Euroopan laajuiseen vedyn jakeluverkkoon, jossa osin rakennetaan uutta verkostoa ja osin muutetaan nykyistä maakaasuverkostoa vedyn kuljetukseen soveltuvaksi (kuva 20).



Kuva 19. Vasemmalla on Etelä-Suomen kattava maakaasuverkko ja oikealla Suomen nykyinen sähkön kantaverkko.



Kuva 20. Vasemmalla on yksi visio mahdollisesta vedyn jakeluinfrastruktuurista vuonna 2040 (Jens ym. 2021). Oikealla ovat Suomen CO₂-pistelähteet vuonna 2020.

Tulevaisuuden energiajärjestelmässä myös hiilidioksidi voi olla yksi kuljetettava raaka-aine maakaasun ja vedyn lisäksi. Hiilidioksidin siirtoon ja jakeluun muodostuu infrastruktuureja ja terminaaleja, joihin hiilidioksidi kootaan joko hyödynnettäväksi synteettisten polttoaineiden ja kemikaalien tuotannossa tai siirrettäväksi pysyvään loppusijoituspaikkaan ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden vähentämiseksi. Suomen teollisuudessa syntyy suuria määriä bioperäistä hiilidioksidia, joka voi olla merkittävä raaka-aine tulevaisuuden hiilineutraalissa yhteiskunnassa. Sekä vedyn että hiilidioksidin tuotannon ja hyötykäytön kasvu edellyttää huomattavia investointeja sähkö- ja kaasuinfrastruktureihin.

4.6 Liikenne

Vuonna 2020 liikenteen energiankulutus oli Suomessa noin 46 TWh (vrt. 50 TWh vuonna 2019), joista biopolttoaineiden osuus on 4,6 TWh ja sähkö 0,8 TWh. Sähköautojen energiankulutus oli 0,1 TWh. Liikenne muodostaa merkittävän osan Suomen energiankulutuksesta: liikenne kuluttaa yhtä paljon energiaa kuin Suomessa tuotetaan vuodessa sähköä uusiutuvilla polttoaineilla ja ydinvoimalla yhteensä. Tämä antaa hyvän kuvan siitä, mitä liikenteen sähköistys vaatisi päästöttömän energiantuotannon kannalta.

Liikenteen energiankulutuksesta merkittävin osuus katetaan fossiilisilla polttoaineilla. Vuonna 2020 moottoribensiinin osuus oli 14,2 TWh, dieselöljyn 27,9 TWh ja maakaasun 0,1 TWh. Raskaan kaluston osuus dieselin kulutuksesta on arvioitu olevan noin 70 prosenttia (Autoalan tiedostuskeskus 2022). Kotimaan lentoliikenteen energiankulutus oli 1,0 TWh ja vesiliikenteen 1,8 TWh,

ja niiden energia tuotetaan pääsääntöisesti fossiilisilla polttoaineilla. Vastaavasti ulkomaan lentoliikenteen energiankulutus oli 3,3 TWh ja vesiliikenteen 3,6 TWh. On huomattava, että vuonna 2020 ulkomaan lentoliikenne vähentyi merkittävästi. Vuonna 2019 ulkomaan lentoliikenteen energiankulutus oli 9,8 TWh. Raideliikenteen energiankulutus on suurimmaksi osaksi sähköä (0,7 TWh) ja kevyttä polttoöljyä (0,2 TWh). Nämä luvut eivät sisällä työkonien energiankulutusta, joka syntyy lähinnä moottoribensiinin ja kevyen polttoöljyn käytöstä. Vuonna 2020 työkonien energiankulutus oli noin 5,3 TWh.

Fossiilisilla polttoaineilla on edelleen merkittävä osuus liikenteen energiankulutuksessa. Henkilöliikenteen sähköistymisen nopeutuu tulevaisuudessa. Tämä nähdään vuoden 2021 rekisteröintitilastoista, joissa 30 prosenttia ensirekisteröidyistä henkilöautoista oli ladattavia ajoneuvoja. Raskaan liikenteen sähköistymisen on hitaampaa. Autoalan keskusliiton mukaan vuonna 2030 kuorma-autoista yli 80 prosenttia olisi vielä dieselkäyttöisiä (Turunen 2022). Ennusteiden mukaan tieliikenteessä on vielä vuonna 2030 miljoonia polttomoottoriautoja.

Sähköistymisellä on merkittävä rooli myös henkilöliikenteessä päästöjen vähentämisessä, mutta siihen tarvitaan vähäpäästöistä sähköä ja latausinfrastruktuurin kehittämistä. Sähköistymisen laskee liikenteen energiankulutusta, koska sähköautojen hyötysuhde (well-to-wheel) on selvästi parempi kuin polttomoottoriautojen. Raskaan kaluston ja työkonien

den energiankulutuksen päästöjen vähentämiseksi tarvitaan sekä biopohjaisia polttoaineita että synteettisiä, uusiutuvaan sähkөөn perustuvia polttoaineita. Vedyn ja synteettisten polttoaineiden käytössä ei päästä hyötymään hyötysuhteen paranemisesta, vaan hyötysuhde (well-to-wheel) voi olla jopa heikompi, koska vedyn ja synteettisten polttoaineiden tuotanto ja varastointi vievät energiaa. Tällöin niiden käyttö osaltaan kasvattaa liikenteen kokonaisenergian kulutusta.

4.7 Teollisuus

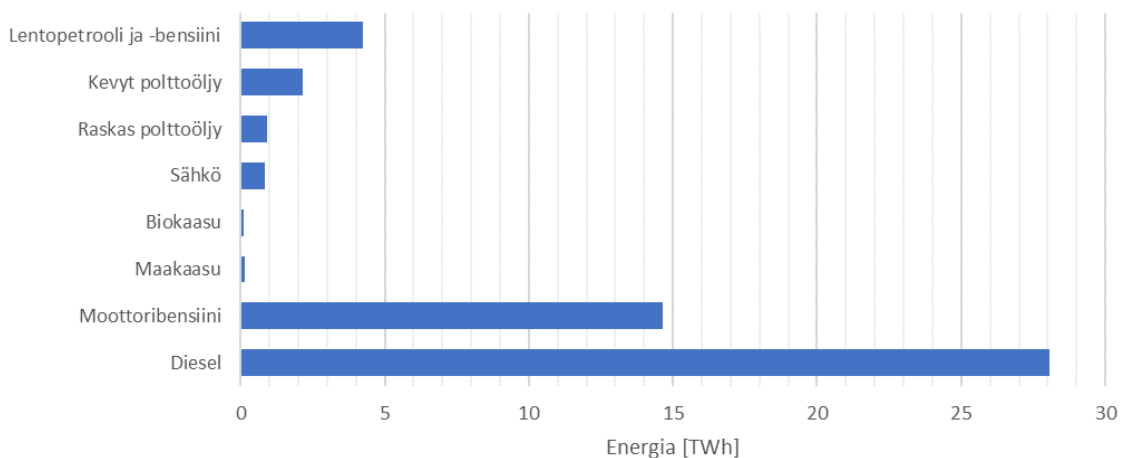
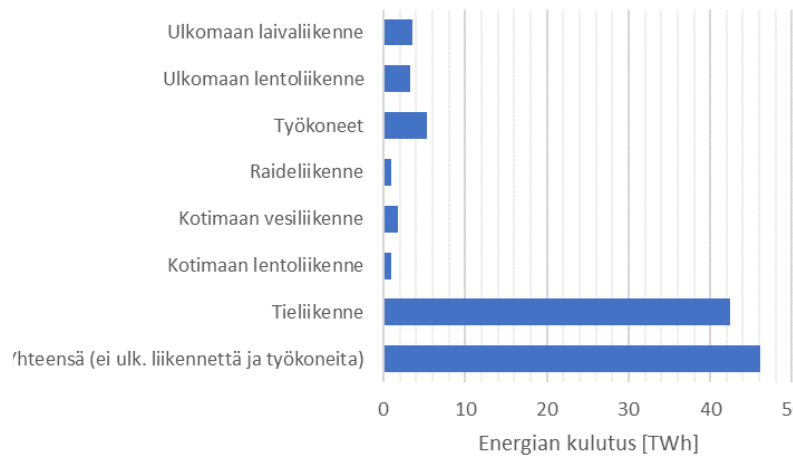
Vuonna 2020 teollisuuden prosessien ja tuotteiden käytön päästöt olivat 5,2 Mt CO₂-ekv tai 11 prosenttia kokonaispäästöistä (Tilastokeskus 2021b). HIISI-raportin (Lehtilä ym. 2021) skenaariotulosten perusteella kasvihuonekaasupäästöjen vähentäminen on teollisuudessa huomattavasti hankalampaa kuin energiatuotannossa siitäkkin huolimatta, että suuri osa teollisuuden päästöistä kuuluu päästökaupan piiriin. Suomessa pääosa teollisuusprosessien kasvihuonekaasupäästöistä syntyy hiiliteräksen valmistuksessa. Määrä vastaa noin seitsemää prosenttia Suomen kokonaispäästöistä.

Lisäksi petrokemianteollisuus ja sementtiteollisuus vaikuttavat osaltaan teollisuuden päästöihin. Metalliteollisuuden

tuotteiden vähähiilisyyks riippuu voimakkaasti esimerkiksi vedyn käyttöön perustuvien, HYBRIT-tyyppisten prosessien käyttöönotosta ja terästen vähähiilisyyttä koskevista EU-säädöksistä. Petrokemianteollisuuden kasvihuonekaasupäästöjen odotetaan vähenevän, kun teollisuudenala siirtyy yhä enemmän uusiutuvien raaka-aineiden käyttöön ja hiilidioksidin talteenotto ja varastointi kehittyvät. Teollisuus kulutti pääosin puuperäistä energiaa, ja ylivoimaisesti eniten energiaa kului metsäteollisuudessa. Sen jälkeen suurimpia energiankuluttajia olivat kemian- ja metalliteollisuus.

Metsäteollisuus on suunnitellut polun hiilineutraaliuteen siirtymiseksi ja käyttää enää vain vähän fossiilista energiaa. Fossiilisten polttoaineiden käyttö metsäteollisuudessa voi päättyä 2030-luvulla tehtaiden investointien ja sähköistymisen myötä pieniä varapolttoainemääriä lukuun ottamatta. EU-strategian mukaan biogeenistä hiilidioksidia voidaan tuottaa suuria määriä, jos sitä tarvitaan esimerkiksi vetytalon hiilineutraalien polttoaineiden tuotannossa.

Kemianteollisuudessa uskotaan, että fossiiliset päästöt loppuvat 2050-luvulla, kun prosesseissa siirrytään käyttämään yhä enenevässä määrässä uusiutuvaa sähköä. Erityisesti vihreän vedyn lisääntyvälle käytölle on hyvät näkymät.



Kuva 21. Energiankulutus eri liikennemuodoissa ja jakeissa vuonna 2020. (Tilastokeskus 2021a)

4.8 Energiamarkkinat

Sähkömarkkinoiden tavoitteita ovat luotettavuus, kestävyys ja kustannustehokkuus. Käytännössä näihin tavoitteisiin päästään siten, että pitkän ja lyhyen aikavälin markkinapaikkojen kaupankäynnissä valitaan edullisimmat tuotantovaihtoehdot niin, että tuotanto vastaa kulutusta joka hetki. Koska sähkön- ja lämmöntuotanto ovat päästökaupan piirissä, toimii päästökauppa yhdessä sähkömarkkinoiden kanssa markkinaehtoisena kestävyyskannusteena, jos päästöoikeuden hinta on riittävän korkealla.

Suurin osa kaupasta käydään vuorokausimarkkinalla, jossa jokaiselle tunnille muodostuu hinta osto- ja myyntitarjousten perusteella, käytännössä kalleimman käytössä olevan tuotantomuodon marginaalikustannuksen mukaan. Uusiutuvan tuotannon (tuuli, aurinko ja vesi) marginaalikustannukset ovat tyypillisesti hyvin vähäiset, jolloin niiden saatavuuden vaihtelu aiheuttaa voimakasta hintojen vaihtelua. Tämä puolestaan luo kannusteen siihen, että kysyntä (jatkossa myös energiavarastot) osallistuu aktiivisemmin markkinoille kulutusjoustoilla, jolloin sähkönkulutusta ajoitetaan edullisimmille tunneille. Kulutusjousto osallistuu myös reaaliaikaiseen taajuudensäätöön, jonka resurssit hankitaan säätösähkö- ja reservimarkkinoilta.

Suomessa on edistyneet ja toimivat sähkömarkkinat. Merkittäviä markkinoillepääsyn esteitä ei ole, kulutus pääsee osallistumaan kaikille markkinapaikoille tasapuolisesti ja aggregoidut joustoresurssit osallistuvat jo nykyisellään aktiivisesti reservimarkkinoille. Merkittävä osa uusista tuotantoinvestoinneista, kuten tuulivoimalat, toteutetaan pitkäaikaisina ostosopimuksina (PPA – Power Purchase Agreement). Vuorokausimarkkinan hintavaihtelut luovat kuitenkin investointisignaalin huipputuotantoon ja muihin joustoresursseihin. Energiaviraston ylläpitämä tehoreservijärjestelmä varmistaa kapasiteetin riittävyyden myös siinä tilanteessa, jos tuotanto ei riitä kattamaan kulutusta markkinaehtoisesti. Tehoreservijärjestelmään ei ole vielä tarvinnut turvautua, mutta se on oleellinen osa luotettavuuden varmistamista. Reservin määrää on hyvä tarkastella säännöllisesti jatkossakin.

Hintavolatiliteetin kasvaminen kannustaa joustavuuteen sähkökäytössä. Toisaalta voimakkaasti vaihtelevat hinnat tuovat hintariskiä loppukäyttäjälle. Sähkönmyyntiin voidaan tarvita uudenlaisia tuotteita, jotka kannustavat joustavuuteen sekä hyötyjen ja riskien jakamiseen toimijoiden välillä. Näiden kehittämiseksi ei kuitenkaan ole estettä.

Kulutuksen ohjautuminen hintasignaalien perusteella voi johtaa paikallisesti verkon kuormituksen kasvuun, joka voimistuu, kun verkkoon kytkeytyy enemmän ohjattavia kuormia, kuten sähköautojen latausta. Kuormituksen älykkäällä ohjauksella voidaan huomioida myös jakeluverkon rajoitteet menettämättä merkittävästi sähkömarkkinoiden joustohyötyä. Tehoperusteinen verkkopalvelumaksu kannustaa huippu- ja teho- ja ylijäähdytys hallintaan niin, etteivät verkon huippukuormat kasva ja sähkökäytön joustavuus parane. Tämä edistää sekä tuotannon että verkon kustannustehokkuutta.

Suomen lämpömarkkinat ovat paikallisia ja varsin suljettuja. Suurimmissa kaupungeissa on kaukolämpöjärjestelmä, mutta pääsääntöisesti kaukolämpö toimii kuin monopoli.

Kaasumarkkinat

Kaasumarkkinat avautuivat Suomessa kilpailulle vuoden 2020 alussa. Sen seurauksena kolmansille osapuolille syntyivät tasapuoliset ja syrjimättömät edellytykset maakaasun siirto- ja jakeluverkkoihin pääsyyllä. Suomessa sovelletaan EU-kaasumarkkinoiden mukaista syöttö-otto-järjestelmää. Siinä kaasua virtaa sisään Suomen kaasujärjestelmän syöttöpisteistä ja ulos ottopisteistä. Kaasun syöttöpisteitä ovat Imatra, Baltic Connector sekä nesteytetyn maakaasun ja biokaasun virtuaaliset syöttöpisteet. Vastaavasti kaasun ottopisteitä ovat kaasun siirto- ja jakeluverkkoon liittyneet loppukäyttäjät. Baltic Connector voi toimia myös kaasun ottopisteinä.

Kaasun tukkumarkkinoilla käydään kauppaa sekä kaasun energiasta että kaasun siirtokapasiteetista. Siirtokapasiteettia myy Gasgrid Finland. Siirtokapasiteetti tarkoittaa oikeutta siirtää kaasua siirtoverkossa (kWh/h). Kaasuenergiaa myyvät shipperit ja traderit. Gasgrid Finland vastaa Suomen kaasujärjestelmän tasehallinnasta. Tasejaksona on kaasupäivä. Se alkaa aamulla kello 7 ja päättyy seuraavana päivänä kello 7. (Gasgrid Finland 2022.)

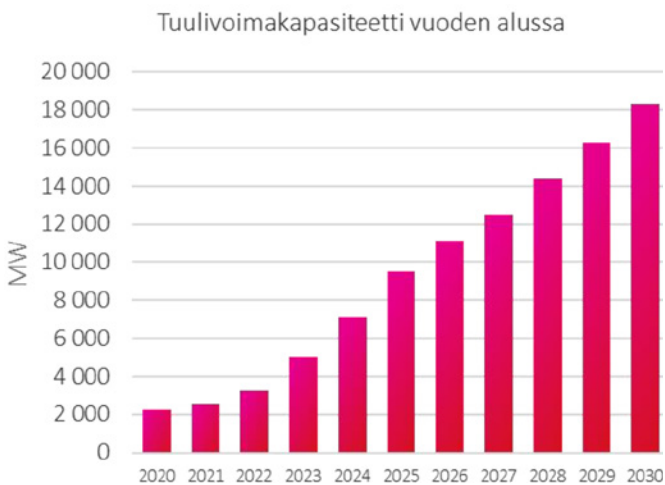
4.9 Investoinnit

Vihreän siirtymän investointien rahoituksesta noin 93 prosentin arvioidaan tulevan yksityisestä pääomasta (private capital), joten investointiympäristön pysyvyys ja lainsäädännön johdonmukaisuus ovat rahoituksen kannalta avainasemassa.

Investointien toteutuminen riippuu investoinnin tuotosta sijoittajalle sekä investointiriskistä, joka lasketaan rahoituskustannuksiin. Riskiin vaikuttavat muun muassa hankkeiden kustannusarvion pitävyys ja läpimenoaika. Ukrainan sodan vuoksi rahoituksessa on korostunut myös maariski. Muun muassa päästökauppa ja vähähiiliseen energiaan liittyvät tuet ovat ohjanneet investointeja vähähiilisiin kohteisiin. Toisaalta lainsäädäntö voi olla myös esteenä investointien toteutumiselle. Energiainvestointien kasvun suurimpia esteitä ovat hidas luvitusprosessi ja erityisesti hallinto-oikeuskäsittelyjen pitkät käsittelyajat.

Energiajärjestelmien investointeja ei tilastoida järjestelmällisesti Suomessa. Suurimmat energiantuotannon investoinnit ovat kohdistuneet vuosina 2000–2022 tuulivoimaan, johon on investoitu noin kuusi miljardia euroa (Suomen tuulivoimayhdistys 2022) ja jolla tuotetaan vuosittain energiaa noin 8 TWh. Olkiluoto 3 -laitosyksikköön on investoitu puolestaan noin 5,7 miljardia euroa, ja ydinvoiman osuus energiantuotannosta on noin 13 TWh vuodessa. Investointien laskennallinen pitoaika on tuulivoimalla 30 vuotta ja ydinvoimalla 60 vuotta. Kaasuvoimailoihin ei ole investoitu uutta kapasiteettia vuosina 2010–2022.

Ydinvoiman lisärakentamisesta ei ole päätöksiä. Mediatietojen mukaan Suomessa ei juuri nyt suunnitella uusia investointeja



Kuva 22. Tuulivoimakapasiteetin ennustettu kehitys 2020-luvulla (Fingrid 2022).

ydinsähköön. Fennovoiman Hanhikivi-hanke on keskeytynyt Venäjän vastaisten pakotteiden takia, ja hankkeen toteuttaminen on epävarmaa. Fortum on hakenut Loviisan kahdelle reaktorille käyttö lupaa vuoteen 2050 asti. Arvioitu tarvittava investointi on 325 miljoonaa euroa. Tämä säilyttää Suomen ydinvoimakapasiteetin 4,9 GW:ssa, kun Olkiluoto 3 siirtyy kaupalliseen tuotantoon arvon mukaan heinäkuussa 2022.

Fingrid arvioi liittymäkyselyjensä perusteella (Fingrid 2022), että Suomeen tulee tämän vuosikymmenen loppuun mennessä 16 GW uutta tuulivoimakapasiteettia nykyisen 2 GW lisäksi (kuva 22). Investointi olisi noin 22 miljardia euroa, ja sillä tuotettaisiin noin 63 TWh sähköä, jos huipunkäyttöaika on noin 40 prosenttia. Se vastaisi lähes 80 prosenttia vuoden 2020 sähköntuotannosta Suomessa.

Aurinkovoimainvestointeja tehdään tuulipuistojen yhteyteen ja vanhoille turvesoille yhä enemmän. Vuonna 2020 aurinkovoimaa tuotettiin Tilastokeskuksen mukaan 0,22 TWh.

Fingrid investoi vuosina 2022–2031 kotimaan sähkön kantaverkkoon keskimäärin reilut 200 miljoonaa euroa vuosittain, mikä on enemmän kuin keskimäärin edeltävinä vuosina. Sähköjakeluverkojen investoinnit ovat olleet vuositasolla noin 700–800 miljoonaa euroa.

Muita tulevaisuudessa merkittäviä investointeja ovat luvussa 3.2 kuvatut energijärjestelmään ja sen murrokseen liittyvien järjestelmäkustannusten mukaiset investoinnit. Niiden arvioimiseksi tarvitaan tulevaisuuden järjestelmän rakenteeseen ja siihen liittyvien tekijöiden kustannusvaikutuksiin liittyvää tutkimus- ja kehitystyötä.

Uuden energiantuotannon rakentamiseen liittyvillä investoinneilla on yleensä merkittäviä kansallisia vaikutuksia työllisyyteen ja talouteen. Työllistäviä vaikutuksia luovat muun muassa maarakennustoiminta (tieverkosto, voimalaitoksien ja sähkö-

asemien maarakennustyöt), voimalaitosrakentaminen (erityisesti perustukset), sähköverkkojen ja sähköasemien rakentaminen, majoitustoiminta ja muu paikallisten palvelujen käyttö, satamatoiminnot ja kuljetukset sekä metsänkorjuu, mittaus ja suunnittelupalvelut.

4.10 Suomen energijärjestelmän tulevaisuuden suunnat

Energijärjestelmän tärkeimpiä ominaisuuksia ovat häiriötön ja luotettava energian tarjonta kaikissa energiamuodoissa, kohtuullinen hinta sekä kestävyys eli järjestelmälle asetettujen hiilineutraaliustavoitteiden toteuttaminen. Suomessa tarvittavan sähkö- ja lämpöenergian häiriötön saatavuus edellyttää jatkossakin, että tuotanto pystyy seuraamaan kysyntää. Mikäli energiasta tulee nykyistä merkittävämpi vientituote esimerkiksi kemiallisessa tai materiaalisessa muodossa, kuten synteettisinä polttoaineina, voivat tällaisten tuotteiden varastot toimia osaltaan tuotannon ja kysynnän tasapainoa ylläpitävänä puskurina.

Bioenergia, ydinenergia, sähkön tuonti ja fossiilisten polttoaineiden käyttö olivat Suomen merkittävimmät energialähteet sähkön hankinnassa ja lämmöntuotannossa vuonna 2020. Fossiilisten polttoaineiden osuus jatkaa hiilineutraaliustavoitteiden mukaisesti laskuaan. Sen merkittävämmäksi korvaajaksi suunnitellaan uusiutuvaan energiaan, erityisesti tuuleen, perustuvia teknologioita. Bioenergia ja ydinenergia ovat jatkossakin merkittävässä roolissa yhdessä kasvavan tuulivoiman kanssa. Kun Olkiluoto 3 käynnistyy, ydinsähkön tuotanto kattaa reilut 40 prosenttia Suomen 2010-luvun tyypillisestä sähkönvuosikulutuksesta. Kun vaihtelevan uusiutuvan energian osuus kasvaa, kysynnän ja tuotannon sovittaminen sekä lyhyemmällä tunti- ja vuorokausitasolla että kesä- ja talvikausitasolla vaatii energijärjestelmän merkittävää kehittämistä. Kehityskohteita ovat muun muassa energiavarastot, kulutusjoustot, varavoima ja sektori-integraatio.

Energijärjestelmän tulevaisuuden kehityssuuntia tarkasteltaessa on huomioitava poliittisten ja yhteiskunnallisten tavoitteiden lisäksi eri tuotantomuotojen luontaiset ominaisuudet ja luonnon asettamat resurssirajoitteet. Jokainen energiamuoto tarvitsee raaka-aineita tuotantolaitosten sekä jakelu- ja varastointijärjestelmien rakentamiseksi. Energijärjestelmän raaka-aineet ovat rajallisia, mutta kaikilla niillä on maailmanmarkkinat, joilla kysynnän kasvaminen johtaa hinnan nousuun. Joidenkin raaka-aineiden osalta tunnetut luonnonvarat saattavat olla harvojen hallussa. Geologian tutkimuskeskuksen arvon (Michaux 2021) mukaan fossiilisia polttoaineita ei ole globaalisti mahdollista korvata pelkästään uusiutuvilla, kuten aurinko- ja tuulivoimalla, koska tarvittavia raaka-aineita (litium, nikkeli, koboltti) ei yksinkertaisesti ole riittävästi saatavilla. Lisäksi muita uusiutuvia energianlähteitä, kuten vesivoimaa tai biomassaa, on vaikea lisätä luontosyistä.

Tämän päivän hinta-arviot yksittäisten teknologioiden tuotantokustannuksista eivät siis enää päde huomispäivänä, jos teknologian edellyttämistä raaka-aineista tulee pulaa. Keskeisiä päästöttömän energijärjestelmän raaka-aineita ovat muun

muassa sähköakkujen litium, tuuligeneraattorien kestopagneettien harvinaiset maametallit ja ydinpolttoaineena käytetty uraani. Tuuligeneraattoreita on tosin tehty myös ilman kestopagneetteja, ja ydinvoimaloiden uraani riittää nykykuluksella useaksi sadaksi vuodeksi.

4.10.1 Vaihtelevan uusiutuvan energian rooli

Vuonna 2020 kolmannes Suomen koko energiantarpeesta eli yhteensä 114 TWh katettiin fossiililla energianlähteillä (öljy 21 %, hiili 6 %, maakaasu 6 %). Uusiutuvaan energiaan perustuvassa skenaariossa fossiiliset energialähteet korvataan pääosin tuuli- ja aurinkoenergialla tuotetulla sähköenergialla, josta tulee samalla primääri eli ensisijainen energianlähde.

Sähkönkulutus oli vuonna 2020 yhteensä 81,6 TWh. Tulevaisuuden tuotanto tulee kasvattaa yli kaksinkertaiseksi kulutukseen nähden, jos halutaan, että nykyinen fossiilisen energian kulutus voidaan kokonaan korvata uusiutuvalla sähköenergialla, mukaan lukien liikenne ja lämmitys. Jos uusi sähkö tehdään pääosin tuulivoimalla, tuulivoimatuotantoa tarvittaisiin tällöin yli 20-kertainen määrä vuoden 2020 kapasiteettiin nähden. Mikäli Suomesta halutaan energian vientimaa, uusiutuvaan energiaan perustuvan sähköntuotannon voidaan ennustaa kasvavan viennin määrästä riippuen jopa viisinkertaiseksi (400 TWh) nykyiseen kokonais­sähkönkulutukseen nähden vuoteen 2050 mennessä. Määrä on yli 50-kertainen vuoden 2020 tuulivoimatuotantoon nähden.

Biojakeiden ja jätteiden polttoon perustuva energiantuotanto säilyy osana energiajärjestelmää varsinkin lämmöntuotannossa. Maakaasu on toistaiseksi luokiteltu EU-taksonomiasa vihreäksi teknologiaksi, mutta tämä luokittelu tulee poistumaan sekä geopolittisten että ilmastovaikutusten takia. Ilmakehän metaanipäästöjen takia maakaasun todelliset ilmastopäästöt ovat pahimmillaan suuremmat kuin hiilenpolton, kun koko tuotannon, siirron ja loppukäytön kokonaisuus otetaan huomioon. Maakaasua korvaavat sähköllä tuotetut kaasut, kuten vety ja e-metaani.

Ydinvoima säilyy järjestelmässä yhtenä keskeisenä hallittavana sähköntuotantomuotona, mutta sen kasvattamista rajoittavat pitkät toteutusajat ja rahoituksen puute. Loviisassa on käytössä kaksi ja Olkiluodossa kolme reaktoria myös tulevina vuosikymmeninä, jolloin koko ydinvoiman vuosituotanto on noin 36 TWh. Lisäksi pienillä modulaarisilla reaktoreilla on mahdollisuus olla kaukolämmityksessä merkittävässä roolissa polttamista korvaavana vaihtoehtona.

Tuulivoima on tuotantokustannuksiltaan halvin sähköntuotantomuoto. Suomessa tuulivoiman kapasiteetti ylittää Fingridin arvion mukaan (Fingrid 2022) 18 GW:iin vuosikymmenen loppuun mennessä. Energiantuotanto olisi tällöin noin 63 TWh. Vastaava energiamäärä voitaisiin tuottaa viidellä Olkiluoto 3:n kokoisella ydinreaktorilla.

Aurinkovoiman rakentaminen tuulipuistojen yhteyteen on kustannustehokasta, koska aurinkosähkö täydentää tuu-

lisähkön tuotantoa vuodenaikojen vaihtelun mukaan. Talvela saadaan eniten tuulisähköä ja kesällä paljon aurinkosähköä sijainnistamme johtuen. Aurinkosähkö edellyttää 1.5 ha/MW:n pinta-alaa, joka merkitsee 530 GWh/km²,a. Turvetuotantoalueilla vuosituotanto on yli 30 TWh. Kiinteistökohtaiset aurinkovoimalat yleistyvät, ja niiden energiaa hyödynnetään rakennuksen valaistukseen, kiinteistön ja käyttöveden lämmitykseen, kodinkoneisiin sekä sähköautojen lataukseen.

Energian vienti rakentuu vedyn, sähkön, metanolin, ammoniakin sekä näiden jatkojalosteiden varaan. Esitetty 400 TWh:n kokonaistuotanto on mahdollista toteuttaa seuraavien kahdenkymmenen vuoden aikana (vrt. Fingrid kyselyt ja tuotanto, Fingrid 2022). Tämä vaatii, että tuotanto sijoitetaan tasaisesti eri puolille Suomea, mikä parantaa myös tasapainoista aluekehitystä ja tuulituotannon sosiaalista hyväksyttävyyttä.

Kun järjestelmä kasvaa nykyisen kysyntätilanteen vuorokausikysyntään, ei ole odotettavissa suuria muutoksia. Vuorokausikysynnän vaihtelu Pohjoismaissa (Nordpool) on noin 15 000 MW. Tästä vaihtelusta on huolehdittu järjestelmässä Norjan ja Ruotsin vesivoimalla.

Uusiutuvan energian vaihtelu edellyttää kokonaisjärjestelmässä suurta joustokapasiteettia, mikä on keskeinen osa energiajärjestelmän toimintavarmuuden kehittämistä. Joustokapasiteetti auttaa kestävästi merkittävää tuuli- ja osaltaan aurinkovoiman osuuden kasvua, kun samalla kulutuksen mukaan asetettavissa olevan fossiilisen energian kapasiteetti laskee. Energiankulutuksen ja -tuotannon tasapainottamisen kysymyksiä sekä mahdollisia perinteisiä ja uusia joustoon soveltuvia teknologioita on käsitelty tarkemmin luvussa 4.2. Uudeksi joustoelementiksi on kehittymässä joustavan vedyn ja sen jatkojalosteiden tuotantokapasiteetti, joka soveltuu myös pidempiaikaisen kausivaihtelun tasaamiseen. Vedyn tuotanto perustuu elektrolyysilaitoksiin, joiden tehoa voidaan asettaa joustavasti sähköntuotannon mukaan. Myös vedyn jatkojalosteiden tuotantotehoa ohjataan samalla periaatteella. Lisäksi sähkö- ja lämpövarastoja lisätään järjestelmään, jotta eri tahtiin vaihtelevaa tuotantoa ja kulutusta saadaan yhteensovitetua. Akkuvarastoilla on tärkeä rooli sähköverkon luotettavan toiminnan varmistamisessa.

Tärkeään asemaan nousevat myös energiamarkkinat ja niiden toiminta. Markkinoilla kysynnän, tuotannon ja varastoinnin (kulutusjoustot) arvo toteutuu ja järjestelmä pysyy tasapainossa. Sähkön kysyntä kasvaa nimenomaan vedyn tuotannon takia. Tällöin vety integroituu osaksi markkinaa. Vedyn tuotanto voi toimia säätövoimana ja vetypuutket varastoina järjestelmässä.

Kun sähkömarkkina siirtyy sovitusti varttitaseseen eli 15 minuutin taseselvitysjaksoon, voidaan arvioida, että markkinat automatisoituvat, kuten osakkeiden pörssikaupallekin on käynyt viime vuosikymmenen aikana. Vuorokausimarkkinan rinnalla toimivat reaaliaikaiset reservimarkkinat, joilla varmistetaan tuotannon ja kulutuksen keskeytymätön tasapaino.

Pitkäaikaiset ostosopimukset (PPA – Power Purchase Agreement) ovat keskeisessä roolissa, kun markkinoille saadaan

uutta tuotantokapasiteettia. Mikäli markkinat eivät synnytä riittäviä investointikannustimia, voidaan harkita energia-markkinasta erillisiä kapasiteettimekanismeja, mutta niiden mahdollinen käyttöönotto vaatii tarkempaa analyysiä.

Energiajärjestelmän toimivuuden takaavat markkinoiden riittävä siirtokapasiteetti (sähkö ja vety) sekä energiapörssin luotettava toiminta. Erityisesti siirtokapasiteetin kasvattaminen markkinoiden välillä ja sisällä on valtioille erittäin tärkeä tehtävä tulevaisuuden energiajärjestelmän toimivuuden varmistamiseksi.

4.10.2 Ydinvoiman rooli

Ydinvoiman osuus Suomen sähköenergian kulutuksesta asettuu noin 40 prosenttiin, kun Olkiluoto 3 saavuttaa täyden tehon. Hanhikiven ydinvoimalaitoksen toteutuminen on epävarmaa, joten Suomi ei saavuta 50 prosentin tasoa, jossa Ruotsi pitkään toimi 1980–2000-luvuilla. Ydinsähkön lisätuotanto ei tarvitse tuekseen massiivisia verkkoinvestointeja tai varmentavaa tuotantoa, mikä osaltaan parantaa energiajärjestelmän luotettavuutta ja toimitusvarmuutta. Olkiluodon kaikkien ydinvoimalaitosyksiköiden käyttöluvut ovat voimassa vuoteen 2038, ja Fortum on hakenut Loviisan voimalaitoksen molemmille yksiköille käyttö lupaa vuoteen 2050 asti. Olkiluodon yksiköiden 1 ja 2 käytön jatkaminen vuoden 2038 jälkeen jää TVO:n teknistaloudelliseen harkintaan. Olkiluoto 3 -yksikön suunniteltu käyttöikä on 60 vuotta, eli se voi olla käytössä vähintään 2080-luvulle asti, hyvin pidettynä paljon pidempäänkin.

Pienet modulaariset reaktorit (Small Modular Reactors, SMR) saattaisivat kokonsa ja ominaisuuksiensa puolesta sopia kaupunkien ja kuntien energiayhtiöiden tarpeisiin. Kunnallisilla yhtiöillä on ankaria paineita vähentää sähkön ja lämmön yhteistuotannon päästöjä. Pienydinvoima olisi tähän toimiva ratkaisu, jos se osoittautuu kustannuksiltaan kilpailukykyiseksi muiden yhtä luotettavien ja toimitusvarmojen lämmönlähteiden kanssa.

Merenkulku ja Suomelle tärkeä laivanrakennus ovat myös ankarien päästövähennyspainoiden kohteena. Ydinreaktori on laivaan teknisesti hyvä, päästötön voimanlähde, sillä se tarjoaa erinomaisen suorituskyvyn sekä laivan nopeuden että toimintasäteen osalta. Laivareaktoriteknologia on sota-aluksissa tasolla TRL 9, mutta teknologian kustannukset saattavat olla siviilikäyttöön toistaiseksi liian suuria.

Pelkän kaukolämmön tuotantoon suunniteltujen reaktoreiden teknologia on toistaiseksi kehitysasteella (TRL 5–6). Sen sijaan kotimaisesta pienestä modulaarisesta kaukolämpöreaktorista voisi tulla vientituote myös muualle Eurooppaan, erityisesti aluksi Itämeren ympäristöön, jossa kaukolämpöverkot ovat jo valmiina mutta jossa käytetään edelleen fossiilista energiaa.

Suomi aloittaa käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoittamisen noin vuonna 2025. Ydinenergia on ainoa energiamuoto, joka on pitänyt omat jätteensä tallessa, teknisesti varautunut huolehtimaan niistä turvallisesti ja kerännyt jätehuollon kustannusten kattamiseen tarvittavat varat osana myymänsä sähkön hintaa.

4.10.3 Biomassan rooli

Biomassapohjaisen energiantuotannon kehitys on vahvasti sidoksissa metsäteollisuuden kehitykseen, koska metsäteollisuuden puunhankinnan ja puunkäytön yhteydessä syntyy huomattava määrä tuotteiden raaka-ainekäyttöön soveltumattomia sivujakeita. Perinteisten tuotteiden lisäksi sellu- ja paperiteollisuus on vähitellen kasvattanut tuotevalikoimaansa kehittämällä uusia korkeampiarvoisia tuotteita, kuten biopolttoaineita, biokomposiitteja ja biopohjaisia muoveja. Samalla myös liiketoiminta on uudistunut. Selluteollisuuden uudet laitokset ovat biojalostamoita, joissa hyödynnetään useita kaupallisesti kypsiä teknologioita. Tällaisia ovat kuoren polttaminen ja kaasutus, biokaasun tuotanto lietteestä, mäntyöljyn jalostaminen liikennepolttoaineeksi ja ligniinin erotus sulfaattisellutehtaan mustalipeästä. Näiden lisäksi mustalipeän kaasutus, hydroterminen nesteytys (HTL) ja hydroterminen hiilestys (HTC) ovat demonstraatiovaiheessa. Bioenergiaan liittyvistä laitosten biomassakonversioista ja niiden käyttöönottoon liittyvistä haasteista löytyy lisätietoa EU:n Horisontti-ohjelmassa meneillään olevan BIOFIT-projektin sivustolta.

Kaukolämmön tuotantoon pohjautuva lämmöntuotantojärjestelmä perustuu edelleen pääosin polttaviin teknologioihin, joissa biomassalla korvataan enenevässä määrin fossiilisia polttoaineita. Biomassapolttoaineiden käyttö painottuu suurempiin CHP-laitoksiin, joissa pystytään maksimoimaan polttoainehyötysuhde ja hyödyntämään biomassaresurssi mahdollisimman tehokkaasti. Tuotetulla sähköllä voidaan tasapainottaa lisääntyvän tuulivoiman aiheuttamia sähköntuotannon vaihteluita talvikaudella. Vuonna 2020 puubiomasapohjaisen sähköntuotannon osuus uusiutuvasta sähköstä oli noin kolmannes, kun uusiutuvien osuus kasvoi yli puoleen sähköntuotannosta. Kaukolämmön tuotannossa puupolttoaineiden osuus oli 38 prosenttia ja teollisuuslämmön tuotannossa 75 prosenttia, johon vaikuttaa erityisesti mustalipeän merkittävä energiakäyttö metsäteollisuudessa. Uusiutuvan energian kehitys tulevina vuosikymmeninä johtaa puupolttoaineiden osuuden vähentymiseen sähköntuotannossa, mutta yhdyskuntien ja teollisuuden lämmöntuotannossa puupolttoaineilla on kasvunäkymä.

CHP-laitosten yhteyteen on kehitteillä sektori-integraatioon pohjautuvia, uusiutuvaa vetyä ja metaania tuottavia yksiköitä, jotka tuottavat vedyn valmistuksen yhteydessä syntyvää hukkalämpöä kaukolämpöverkkoon ja hyödyntävät laitoksen päästämän hiilidioksidin metanointiprosessissa. Uusiutuvan vedyn elektrolyysi vaatii runsaasti tuulisähköä, joten prosessi edellyttää tuulivoimatuotannon huomattavaa lisäämistä. Biopohjaisen hiilidioksidin talteenotto ja loppukäyttö (BECU) vähentävät päästöjä, kun niillä korvataan fossiilipohjaisia lopputuotteita. Jos biopohjaisten lopputuotteiden elinkaari on pitkä, voidaan puhua hiilinegatiivisesta kaukolämmön tuotannosta tai hiilidioksidin varastoinnin myötä (BECCS) hiilinegatiivisuudesta.

Bioenergian käytön ennakoidaan lähivuosikymmeninä edelleen lisääntyvän kaukolämmön ja teollisuuslämmön tuo-

tannossa, jossa sillä korvataan fossiilisia polttoaineita, sekä biojalostamoissa, joissa sitä käytetään uusien biotuotteiden raaka-aineena. Bioenergian energiakäytön taso vuonna 2020 oli 116 TWh ja puuenergian käytön 93 TWh. Esimerkiksi kansallisen HIISI-hankkeen skenaariotarkasteluissa bioenergian energiakäytön on arvioitu kasvavan tasolle 139–144 TWh vuoteen 2035 mennessä, jonka jälkeen bioenergian käytön kehitys tasaantuu (Lehtilä at. al. 2021). Puuenergian käytön on arvioitu kasvavan samalla ajanjaksolla tasolle 128–131 TWh, joten sillä on merkittävin rooli bioenergian kasvussa. Kasvua syntyy myös agrobiomassoista, tuontibiopolttoaineista sekä jätepolttoaineiden bio-osuuksista.

Vuonna 2020 bioenergian osuus uusiutuvasta energiasta oli 86 prosenttia, mutta sen suhteellinen osuus uusiutuvasta energiasta pienenee, kun tuuli- ja aurinkoenergian osuus kasvaa. Vuonna 2035 bioenergian osuuden arvioidaan olevan noin 60 prosenttia. Bioenergian osuutta energiasektorilla ylläpitää myös biopolttoaineiden jakeluvelvoite liikenteessä. Se nousee 30 prosenttiin vuoteen 2030 mennessä. Vuoden 2022 alusta myös biokaasu liitettiin jakeluvelvoitteeseen. Biopolttoöljyllä vastaava velvoite nousee kymmeneen prosenttiin.

4.11 Suomalaisen hiilineutraaliusosaamisen mahdollisuudet

Suomalainen toimintaympäristö ja osaaminen sekä Suomessa valmistetut tuotteet voivat tarjota muille maille ja yrityksille merkittäviä mahdollisuuksia vähentää omia kasvihuonekaasupäästöjään. Energiaan liittyvien päästöjen osuus kaikista kasvihuonekaasupäästöistä on globaalisti lähes kolme neljännestä. Vähähiilinen sähkö, hiilineutraali kaukolämpö ja hukkalämpöjen tehokas hyödyntäminen ovat esimerkkejä tekijöistä, joilla vaikutetaan Suomessa valmistettavien tuotteiden ja sitä kautta myös asiakkaiden hiilijalanjälkeen. Lisäksi suomalaista osaamista voidaan edelleen hyödyntää tuotteiden käytönaikaisen energiatehokkuuden parantamisessa tai jätehuoltoratkaisujen tehostamisessa. Myös niillä voidaan osaltaan pienentää hiilijalanjälkeä.

Puuperäisten polttoaineiden laaja käyttö energiantuotannossa tarjoaa merkittäviä mahdollisuuksia hyödyntää jo hiilikierrossa olevaa hiiltä fossiilisten raaka-aineiden sijaan.

Erityisesti hiilivetyjen laajat markkinat tarjoavat mahdollisuuksia, kun fossiilisiin raaka-aineisiin perustuvaa tuotantoa korvataan kestävillä ratkaisuilla. Bioperäinen hiili tarjoaa yhdessä hiilineutraalin vedyn kanssa merkittäviä mahdollisuuksia kestäväan hiilivetyjen tuotantoon. Kemiallinen metsäteollisuus edustaa Suomessa merkittävintä osaa masanvalmistuksesta, joka perustuu biopohjaisesti tuotettuun energiaan. Vuonna 2020 kaukolämpökunnista 38 prosenttia tuotti lämpönsä biomassaan perustuvilla polttoaineilla, ja osuuden oletetaan kasvavan lähivuosina (Energiateollisuus 2019). Siksi hiilen lähde on Suomessa turvattu vuosikymmeniksi eteenpäin – toisin kuin niissä maissa, joissa bioenergiaa ei juuri tuoteta ja fossiilisten polttoaineiden käyttöä ollaan ajamassa alas.

Hiilikädenjäljellä kuvataan positiivisia vaikutuksia asiakkaan tuotteen hiilijalanjälkeen. LUT-yliopisto on yhdessä VTT:n kanssa kehittänyt menetelmän tuotteiden kädenjäljen (myös hiilikädenjälki ja ympäristökädenjälki) laskemiseksi. Lisäksi LUT on soveltanut menetelmää kaupungin hiilikädenjäljen laskennan kehittämiseen. Suomen mainetta ilmatoratkaisujen tarjoajana voidaan kasvattaa ja siten luoda edellytyksiä uuden liiketoiminnan kehittymiselle, kun potentiaalisia kädenjälkivaikutuksia huomioidaan ja lisätään järjestelmällisesti.

Yhä useampi organisaatio tavoittelee hiilineutraaliutta. Päästöjen vähentäminen on organisaatioille ensisijaista, mutta päästöjä jää silti myös kompensoitaviksi. Hiilineutraaliustavoitteen julkaisseet organisaatiot tarvitsevat tulevaisuudessa keinoja päästöjensä kompensoimiseen, jotta ne voivat saavuttaa tavoitteensa. Kompensoinnilla tarkoitetaan esimerkiksi sitä, että organisaatiot antavat rahoitusta hankkeille, joissa hiiltä poistetaan ilmakehästä tai joissa vähennetään kasvihuonekaasupäästöjen syntymistä.

Kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseksi tarvitaan joka tapauksessa hiilen poistoa hiilikierrosta. Suoraan ilmasta hiilidioksidia poistavat ratkaisut (DAC), hiilidioksidin poisto bioperäisen energiantuotannon savukaasuista sekä näiden yhdistäminen varastointiratkaisuun voivat olla tulevaisuudessa merkittäviä keinoja päästökompensaatioiden tuottamiseksi markkinoille. Bioenergiantuotanto voi tässäkin mielessä tarjota mielenkiintoisen mahdollisuuden.



YHTEENVETO

ENERGIAJÄRJESTELMÄ on suuressa rakenteellisessa murroksessa globaalien, ilmastomuutoksen hillitsemiseksi asetettujen hiilineutraaliustavoitteiden vuoksi. Tunteamme järjestelmä on muuttumassa monin tavoin, ja muutos koskee laajasti yhteiskunnan eri toimintoja ja rakenteita sekä erilaisia teknologioita, jotka ovat keskenään vuorovaikutuksessa. Energiajärjestelmään ja muutoksen hallintaan liittyy monia kansalliseen kilpailukykyyn ja hyvinvointiin vaikuttavia keskeisiä tavoitteita, joista tärkeimpiä ovat kustannustehokkuus, toimitusvarmuus ja päästöttömyys Suomen ilmasto- ja energiastrategian mukaisesti.

Energiajärjestelmän kokonaisuuden hahmottamista vaikeuttavat useat erilaiset ja osittain epäselvät rakenteeseen ja toimintaan liittyvät osatekijät. Erityisesti tulevaisuuden järjestelmään liittyy yksityiskohdissaan suuri määrä erilaisia valintoja. Muun muassa teknologian käytettävyys ja kehittymisnäköymät, kustannusten kehittyminen, tarvittavien resurssien saatavuus ja yhteiskunnan arvokäsitykset muodostavat vaikeasti ennustettavan ja hallittavan kokonaisuuden. Energiajärjestelmän yhteiskunnallinen merkitys kuitenkin edellyttää, että eri tasoilla käydään asiapohjaista keskustelua, jotta saadaan ymmärrys kokonaisuudesta ja siihen vaikuttavista tekijöistä. Sen perusteella voidaan edelleen tehdä päätöksiä niistä suuntauksista ja toimenpiteistä, joilla energiajärjestelmälle asetetut perustavoitteet voidaan täyttää.

Tämän energiaselonteon tarkoituksena on tukea energiajärjestelmän kehittämiseen ja sitä koskevaan päätöksentekoon liittyvää keskustelua sekä antaa yleistajuista ja asiapohjaista tietoa järjestelmän muutoksen kannalta tärkeistä osatekijöistä ja siihen vaikuttavista näkökulmista. Tällaisen tiedon avulla voidaan paremmin ymmärtää ja perustella valittavia kehityssuuntia, joissa eri osatekijöistä muodostuu yhteiskunnan tavoitteita mahdollisimman hyvin palveleva kokonaisuus.

Skenaariot vaihtelevat, uusia ratkaisuja tarvitaan

Energiamurrokseen liittyviä näkemyksiä ja skenaarioita on esitetty suuri määrä eri tasoilla. Tämän selonteon taustaksi on poimittu näkemyksiä hallitusten välisen ilmastopaneelin IPCC:n tuoreesta raportista, EU:n vihreän kasvun tavoitteista, pohjoismaisen ministerineuvoston energiatutkimuksen NERin arvioista sekä Suomen ilmasto- ja energiastrategiasta. Energiajärjestelmän kehittämiseen vaikuttaa merkittävim-

min globaali tavoite rajoittaa ilmaston lämpeneminen 1,5 asteeseen. IPCC:n arvioissa tavoitteen saavuttaminen nähdään edelleen mahdollisena, mutta sen ei kuitenkaan katsota toteutuvan nykyisillä kansallisten ohjelmien toimenpiteillä, vaan se edellyttää globaalisti nopeita ja merkittäviä tiukennuksia ohjelmiin.

Skenaarioissa yleistä ja yhteistä ovat fossiilisten energialähteiden alasajo ja uusiutuvan energian yleistymisen. Eri energialähteiden ja -teknologioiden painoarvot sekä aikajänteet vaihtelevat tarkasteluissa, mikä johtaa erilaisiin kehityspolkuihin. Fossiilisen energian käyttö vähenee erityisesti energiantuotannossa. Sen sijaan teollisuuden siirtyminen vähähiilisyteen on haastavampaa ja edellyttää merkittävää teknologioiden kehitystyötä. Lisäksi energiajärjestelmän nähdään sähköistyvän, kun vaihtelevan uusiutuvan sähköntuotannon määrä lisääntyy. Se edellyttää uusia ratkaisuja energiajärjestelmän kokonaisuuden ja toimitusvarmuuden hallintaan.

Hiilineutraaliuden saavuttamiseksi tarvitaan vähäpäästöisen energiantuotannon lisäksi useita muita energiajärjestelmän toiminnan osatekijöitä. Perinteisempiä keinoja ovat energiansäästö ja energiatehokkuuden lisääminen. Vähäpäästöisen vedyn ja sen johdannaisten tuotantoon liitetään paljon odotuksia, ja ne voivat toimia yhdessä kestävien biopolttoaineiden kanssa myös siellä, missä suora sähköistäminen on vaikeaa. Välttämättömänä pidetään myös hiilidioksidin talteenottoa. Sen avulla hiilidioksidia voidaan poistaa teollisuuden päästöistä, suoraan ilmakehästä tai bioenergian tuotannon kaasusta. Lisäksi kuluttajien ja eri sektoreiden väliset kulutusjoustot ovat osa muuttuvaa energiajärjestelmää, kuten myös erilaiset energiavarastot.

Suomen hiilineutraaliuteen on useita osaratkaisuja

Suomen tavoitteena on olla hiilineutraali vuonna 2035. Valtaosa kokonaispäästöistä on peräisin energiasektorilta, joten energiajärjestelmän kehittäminen on aivan keskeistä tavoitteen saavuttamiseksi. Kansallisesti energiajärjestelmään liittyy omia erityispiirteitä, jotka muodostavat perustan järjestelmän muutokselle.

Bioenergian osuus on ollut Suomessa perinteisesti hyvin suuri, ja Olkiluoto 3:n käynnistyessä myös ydinvoiman osuus kasvaa entisestään. Bioenergia ja ydinvoima muodostavat merkittävän osuuden vähähiilisen energiajärjestelmän rakenteesta yhdessä rajallisen vesivoiman kanssa. Tuulivoimalla on Suomessa suuri lisärakennuspotentiaali, ja se onkin nousemassa no-

peasti bioenergian ja ydinvoiman rinnalle energiatuotannon kivijalaksi.

Suomen hiilineutraali sähköntuotanto, vahva sähkön kantaverkko ja suuri bioenergian osuus ovat keskeisiä edellytyksiä, kun tuotetaan hiilineutraalia vetyä ja siitä johdettuja hiilivetyjä. Niitä voidaan käyttää energiavarastoina ja vähähiilisen energian vaihtoehtoina vaikeasti sähköistettävissä kohteissa. Tällaista tuotantoa pidetään hyvänä osaratkaisuna vähähiilisessä kansallisessa energiajärjestelmässä. Tulevaisuudessa hiilineutraaleja polttoaineita voidaan tuottaa mahdollisesti myös vientiin, jos niiden tuotanto osoittautuu riittävän kilpailukykyiseksi.

Bioenergian tuotekaasuista voidaan ottaa talteen hiilidioksidia hiilineutraalien polttoaineiden tuotantoon yhdessä vedyn kanssa. Talteenotolla voidaan saada aikaan myös ilmakehän hiilitaseen kannalta negatiivisia hiilipäästöjä, kun hiilidioksidi varastoidaan maaperään. Muita energiantuotannon vähähiilisiä osaratkaisuja ovat muun muassa aurinkoenergia, geotermienergia, lämpöpumpit ja jätteen energiahyötykäyttö. Yksityiskohtaisempia teknologisten ratkaisujen ominaisuuksia on kuvattu tarkemmin tämän energiaselonteon luvussa 3.

Energiajärjestelmältä vaaditaan joustavuutta

Energiajärjestelmän kehityksen kannalta tärkeitä kysymyksiä ovat yksittäisten teknologioiden kustannus- ja ympäristötehokkuus sekä ajallinen saatavuus. Sen lisäksi on välttämätöntä tarkastella, millä ratkaisulla ja kustannuksilla energiajärjestelmän toimintaa ja toimitusvarmuutta saadaan ylläpidettyä, kun siirrytään hiilineutraaliuteen ja yhä suurempaan vaihtelevan tuotannon osuuteen.

Kun sääolosuhteiden mukaan vaihtelevan uusiutuvan energian osuus kasvaa, kysynnän ja tuotannon tasapainottaminen tunti- ja vuorokausitasolla sekä kesä- ja talvikausitasolla vaatii energiajärjestelmän merkittävää rakenteellista kehittämistä. Tämä kehitystarve korostuu, kun fossiilinen energia poistuu sähköntuotannosta, sillä se on sopeutettu kulutuksen

vaihtelun mukaiseen tuotannon säätöön. Yksittäisten teknologioiden sekä järjestelmän ja tarvittavan infran kehittäminen ovat kehitystyössä avainasemassa.

Nykyisistä vähähiilisistä tuotantomuodoista vesivoima, bioenergialaitokset sekä kaukolämpöverkkojen lämpövarastot ovat käytettävissä kulutuksen ja tuotannon tasapainotuksessa. Kehitettäviä osaratkaisuja ovat tuotannon mukaan toimivat kulutusjoustot ja kulutussektorien välinen integraatio, valmiit ja kehitteillä olevat energiavarastoteknologiat sekä uuden varavoiman lisääminen. Erityinen mahdollisuus tasapainotuksessa on vetyteknologioilla. Niiden on mahdollista kehittyä osaratkaisuksi sähkön kausivarastoinnin tarpeeseen, jolloin ylimääräsähköä sekä siitä jalostettuja hiilivetyjä voitaisiin hyödyntää sähköntuotantovaiheen aikana. Vetyteknologioilla on omia hyötysuhteiden, kustannusten ja hiilivetyjen tuotannon kehitystarpeita, mutta sen tutkiminen ja kehittäminen nähdään tärkeäksi myös Suomen energiastrategiassa, kun energiavarastoinnin ja vähähiilisten polttoaineiden merkitys kasvaa.

Ydinvoiman käyttö tasaisena peruskuormana on ollut Suomessa taloudellista, mutta erilaisissa tulevaisuuden tuotanto- ja kustannusrakenteissa sitä voi olla osittain mahdollista käyttää myös tasapainotukseen, kuten esimerkiksi Ranskassa tehdään. Energiajärjestelmän kehittämiseen liittyy myös läheisesti niin sanottu sektori-integraatio, jossa teollisuus, liikenne ja lämmitys kytkeytyvät sähkö-, kaukolämpö- ja kaasuverkkojen kautta toisiinsa.

Laaja kokonaiskuva erilaisista kustannuksista

Energiajärjestelmän muutokset ja kehittyminen edellyttävät jatkuvia investointeja sekä vähähiilisen tuotannon lisäämiseen että järjestelmän toimitusvarmuuden varmistamiseen uudella järjestelmäympäristössä. Markkinaehtoinen kehitys, energiatuet ja erilliset kansalliset järjestelmät, joihin kuuluu huoltovarmuuden ja tehoreservijärjestelmän kehittäminen, vaikuttavat tarvittavien investointien toteutumiseen ja rahoitukseen.

”

Tällä energiaselonteolla LUT-yliopisto pyrkii tukemaan ja lisäämään energiajärjestelmän kehittämistä käytävää keskustelua.

Energiajärjestelmässä sähköntuotannon kustannuksia voidaan tarkastella kahdella tasolla: näitä ovat yksittäisten tuotantomuotojen kustannukset ja toimivan järjestelmän ylläpidon edellyttämät kustannukset. Nämä tasot ovat osittain vuorovaikutuksessa toisiinsa. Esimerkiksi vaihtelevan uusiutuvan energian osuuden kasvu aiheuttaa lisää järjestelmäkustannuksia energiantuotannon ja -kulutuksen tasapainottamiseen ja siten myös energian toimitusvarmuuden ylläpitämiseen.

Yksittäisten tuotantomuotojen ominaiskustannusten vertailu on selkeästä laskentaperiaatteestaan huolimatta usein vaikeaa. Yksittäisen tuotantomuodon olosuhteet vaihtelevat alueittain, ja eri tarkastelut eroavat toisistaan sen mukaan, mitä oletuksia, lähtötietoja ja laskennan parametrejä on käytetty. Siksi yksittäisten lukuarvojen käyttö eri vertailuissa on usein harhaanjohtavaa. Useiden laitosten kustannusten laajempi tarkastelu antaa paremman kokonaiskuvan, joka näyttää kuitenkin päälinjoiltaan melko yhtenäiseltä eri lähteissä esitetyissä koosteissa.

Useissa tarkasteluissa todetaan, että tuuli- ja aurinkoenergian, erityisesti maatuulivoiman, kustannukset ovat laskeneet viimeisen 20 vuoden aikana merkittävästi ja että ne ovat osin jo pienemmät kuin fossiilisen energian tuotantokustannukset. Ydinvoiman todetaan säilyvän edullisimpana vähähiilisenä ja kulutuksen mukaan tarvittaessa säädettävissä olevana sähkön tuotantomuotona, kun tarkastellaan laitosten eliniän jatkamisen tai olemassa olevien laitosten käytön kustannuksia. Suomessa merkittävän bioenergian kustannukset vaihtelevat laitoksittain enemmän, eivätkä niille esitetyt keskimääräiset kustannukset yllä edullisuudessaan tuulivoiman tai jo rakennetun ydinvoiman käytön tasolle.

On kuitenkin tiedostettava, että eri tuotantomuotojen suorat yksikkökustannukset muodostavat vain osan energiajärjestelmän kokonaiskustannuksista.

Erityisesti vaihtelevan uusiutuvan energian osuuden merkittävä kasvu synnyttää järjestelmäkustannuksia, jotka aiheutuvat tuotannon ajallisesta vaihtelusta, enustetun ja todellisen tuotannon eroista sekä tarvittavan verkon kehittämisestä. Vaikka järjestelmäkustannukset voivat olla suuruudeltaan huomattavia, ovat niistä tehdyt arviot toistaiseksi epävarmoja ja arviointimenetelmät vasta kehittymässä. On myös epäselvää, kuinka tulevaisuudessa todennäköisesti kasvavat järjestelmäkustannukset katetaan.

Selonteosta aineksia yhteiskunnalliseen keskusteluun

Vihreän siirtymän konkreettiseen etenemiseen liittyy monimutkainen osaratkaisujen verkosto, joka pitää yhteiskunnallisten tekijöiden lisäksi sisällään lukuisia teknisiä epävarmuustekijöitä. Ne liittyvät muun muassa aikatauluun, kustannusten kehittymiseen, energiajärjestelmän toimitusvarmuuden ylläpitämiseen ja kehitteillä oleviin teknologioihin. Erityisesti energiajärjestelmän tuotannon ja kulutuksen tasapainotuksen toteuttaminen sekä tarvittavan rakenteen ja kustannusten arviointi hiilineutraalissa järjestelmässä on hyvin mutkikas kokonaisuus, joka vaikuttaa laajasti yhteiskuntaan.

Suomen energiajärjestelmän kehittäminen on yhteiskunnalle suuri haaste ja mahdollisuus. Tällä energiaseleonteolla LUT-yliopisto pyrkii tukemaan ja lisäämään energiajärjestelmän kehittämisestä käytävää asiapitoista keskustelua. Selonteko tarjoaa perustietoa järjestelmään vaikuttavista tekijöistä, haasteista ja mahdollisuuksista sekä niihin liittyvistä erilaisista näkökulmista ja osaratkaisuista. Tarkoituksena on myötävaikuttaa kansallisen energiajärjestelmän hiilineutraaliuden, kustannustehokkuuden ja toimitusvarmuuden kehittymiseen, jonka tutkimiseen LUT-yliopisto on vahvasti sitoutunut.

Lähdeluettelo

Alcalde, J., Flude, S., Wilkinson, M., Johnson, G., Edlmann, K., Bond, C.E., Scott, V., Gil-fillan, S.M.V., Ogaya, X. & Haszeldine, R.S. 2018, "Estimating geological CO2 storage security to deliver on climate mitigation", *Nature Communications*, vol. 9, pp. 1–13.

Arvesen, A., Hertwich, E.G., 2012. *Assessing the life cycle environmental impacts of wind power: A review of present knowledge and research needs. Renew. Sustain. Energy Rev.* 16, 5994–6006. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2012.06.023>

Asdrubali, F., Baldinelli, G., D'Alessandro, F., Scrucca, F., 2015. *Life cycle assessment of electricity production from renewable energies: Review and results harmonization. Renew. Sustain. Energy Rev.* 42, 1113–1122. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2014.10.082>

Autoalan tiedotuskeskus, 2022, *Liikenteen polttonesteiden myyntitilastot*, https://www.aut.fi/tilastot/liikenteen_energiankulutus/liikennepolttonesteiden_myynti.

BEIS UK 2020. *Electricity generation costs 2020*. https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/911817/electricity-generation-cost-report-2020.pdf

BIOFIT 2022 *Bioenergy Retrofits for Europe's Industry* <https://www.biofit-h2020.eu/>.

Dwyer ja Themelis, 2015. *Inventory of U.S. 2012 dioxin emissions to atmosphere. Waste Management* 46.

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

EIA Energy Information Administration (2022). *Levelized Costs of New Generation Resources in the Annual Energy Outlook 2022*. Available at https://www.eia.gov/outlooks/aeo/pdf/electricity_generation.pdf

Energiateollisuus, 2022a, *Energia vuosi 2021 – Kaukolämpö*. Available at: https://energia.fi/uutishuone/materiaalipankki/energia vuosi_2021_-_kaukolampo.html

Energiateollisuus, 2022b, *Energia vuosi 2021 – Sähkö*. Available at: https://energia.fi/uutishuone/materiaalipankki/energia vuosi_2021_-_sahko.html

European Commission, 2021. *Directorate-General for Climate Action, Directorate-General for Energy, Directorate-General for Mobility and Transport, De Vita, A., Capros, P., Paroussos, L., ym., EU reference scenario 2020 : energy, transport and GHG emissions : trends to 2050, Publications Office, 2021, https://data.europa.eu/doi/10.2833/35750*.

Fingrid Kysyntäjousto 2022. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/markkinoiden-yhtenaisyyss/pilottihankkeita/kysyntajousto/>.

Fingrid Gasgrid väliraportti: *Energian siirtoverkot vetytalouden ja puhtaan energijärjestelmän mahdollistajina. 2022*. <https://www.epressi.com/media/userfiles/107305/1647268774/fingrid-gasgrid-valiraportti-energian-siirtoverkot-vetytalouden-ja-puhtaan-energiajarjestelman-mahdollistajina.pdf>

Galindo, M., Roger-Lacan, C., Gähns, U. and Aumaitre, V., *Efficient district heating and cooling markets in the EU: Case studies analysis, replicable key success factors and potential policy implications, EUR 28418 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2016, ISBN 978-92-79-65048-2 (online), 978-92-79-74179-1 (ePub), doi:10.2760/371045 (online), 10.2760/649894 (ePub), JRC104437*.

Gasgrid Finland (2022), *Markkinamalli*. <https://gasgrid.fi/kaasumarkkinat/markkinamalli/#tuotteet>.

Giuntoli, Jacopo; Agostini, Alessandro; Edwards, Robert and Marelli, Luisa, 2017, *Solid and gaseous bioenergy pathways: input values and GHG emissions: Calculated according to the methodology set in COM (2016) 767, Version 2. Report EUR 27215 EN, European Commission, Joint Research Centre, Institute for Energy and Transport, Ispra Italy, 226 p. ISBN 9789279648106*

Hertwich, E.G., Gibon, T., Bouman, E.A., Arvesen, A., Suh, S., Heath, G.A., Bergesen, J.D., Ramirez, A., Vega, M.I., Shi, L., 2015. *Integrated life-cycle assessment of electricity-supply scenarios confirms global environmental benefit of low-carbon technologies. Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A. 112, 6277–6282.*
<https://doi.org/10.1073/PNAS.1312753111/-/DCSUPPLEMENTAL>.

Hirth L, Ueckerdt F, Edenhofer O. *Integration costs revisited – an economic framework of wind and solar variability. Renewable Energy 2015;74:925–39.*

Hurskainen, M., 2019. *Liquid organic hydrogen carriers (LOHC): Concept evaluation and techno-economics.* VTT Technical Research Centre of Finland. VTT Research Report No. VTT-R-00057-19, December 2019.
https://cris.vtt.fi/ws/portalfiles/portal/27082284/VTT_R_00057_19.pdf

IEA 2020, *Projected Costs of Generating Electricity 2020*, IEA, Paris
<https://www.iea.org/reports/projected-costs-of-generating-electricity-2020>

IEA PVPS, 2021. *Trends in Photovoltaic Power Applications.*
https://iea-pvps.org/trends_reports/trends-in-pv-applications-2021/.

IPCC 2022. *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Working Group III contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.*
<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>.

IRENA 2021, *Renewable Power Generation Costs in 2020*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Jun/IRENA_Power_Generation_Costs_2020.pdf

Jens, J., Wang, A., van der Leun, K, Peters, D., Buseman, M., *Extending the European Hydrogen Backbone, A European Hydrogen Infrastructure Vision Covering 21 Countries, April 2021, Guidehouse, The Netherlands.* https://gasforclimate2050.eu/wp-content/uploads/2021/06/European-Hydrogen-Backbone_April-2021_V3.pdf

Järventausta ym. (2015) *Kysynnän jousto - Suomeen soveltuvat käytännön ratkaisut ja vaikutukset verkkoyhtiöille (DR pooli): Loppuraportti*, <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-15-3485-0>.

Koljonen, T., Lehtilä, A., Honkatukia, J., & Markkanen, J. (2022). *Pääministeri Sanna Marinin hallituksen ilmasto- ja energiapolitiittisten toimien vaikutusarviot: Hiilineutraali Suomi 2035 (HIISI) -jatkokselvitys.* VTT Technical Research Centre of Finland. VTT Technology No. 402 <https://doi.org/10.32040/2242-122X.2022.T402>.

Lazard (2021). *Lazard's Levelized Cost of Energy Analysis - Version 15.0.*
<https://www.lazard.com/media/451905/lazards-levelized-cost-of-energy-version-150-vf.pdf>

Lehtilä A., Koljonen T., Laurikko J., Markkanen J., Vainio T. 2021. *Hiilineutraali Suomi 2035 – ilmasto- ja energiapolitiikan toimet ja vaikutukset: Energiajärjestelmän ja kasvihuonekaasujen kehitykset. Valtioneuvoston selvitys ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 2021:67, 81 p.* <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-383-318-0>.

Luonnonvarakeskus, 2021, *Finnish Statistical Yearbook of Forestry 2021.* Vahtera, Eeva, ed. Luonnonvarakeskus, 2021, Helsinki, 200 p. ISBN13 9789523803244 Available at <https://stat.luke.fi/>

Michaux S.P., 2021. *Assessment of the Extra Capacity Required of Alternative Energy Electrical Power Systems to Completely Replace Fossil Fuels*, GTK Open File Work Report 42/2021, 20.8.2021.

Nazir H., Luis C., Jose S., Prakash J., Muthuswamy N., Buan M., Flox C., Chavan S., Shi X., Kauranen P., Kallio T., Maia G., Tammeveski K., Lymperopoulos N., Carcadea E., Veziroglu E., Iranzo A. and Kannan A., *Is the H2 Economy realizable in the foreseeable future? Part III: H2 Usage Technologies, Applications, and Challenges and Opportunities*, *International Journal of Hydrogen Energy* 45 (2020) 28217–28239. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.07.256>

Ovaskainen, H. 2017. CO₂-eq emissions and energy efficiency in forest biomass supply chains – impact of terminals. https://metsateho.fi/wp-content/uploads/Tuloskalvosarja_2017_04b_CO2-eq_emissions_and_energy_efficiency_in_forest-biomass.pdf

Hannah Ritchie, Max Roser and Pablo Rosado (2020) - "Energy". Published online at OurWorldInData.org. <https://ourworldindata.org/energy>.

SHARC: Sustainable Hydrogen and Recovery of Carbon (2022). https://ec.europa.eu/clima/system/files/2022-04/if_pf%202022_sharc_en.pdf

Sivill, Leena; Bröckl, Marika; Semkin, Nikita; Ruismäki, Antti; Pilpola, Henriikka; Laukkanen, Olli; Lehtinen, Hannele; Takamäki, Saana; Vasara, Petri; Patronen, Jenni 2022, Vetytalous – mahdollisuudet ja rajoitteet, Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 2022:21, 232 p. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-383-413-2>.

SolarPower Europe (2021): EU Market Outlook for Solar Power 2021-2025. <https://www.solarpowereurope.org/insights/market-outlooks/market-outlook>.

Spath, P.L., Mann, M.K., Kerr, D.R. 1999. Life Cycle Assessment of Coal-fired Power Production Including contributions on process definition and data acquisition from: Life Cycle Assessment. NREL/TP-570-25119

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

Suomen tuulivoimayhdistys, 2022. <https://tuulivoimayhdistys.fi/>

Suomen virallinen tilasto (SVT): Kasviuonekaasut [verkkajulkaisu]. ISSN=1797-6049. 2020. Helsinki: Tilastokeskus. Saantitapa: http://www.stat.fi/ti/khki/2020/khki_2020_2021-12-16_tie_001_fi.html.

TEM, 2022, Energiatohokkuus. <https://tem.fi/energiatohokkuus>.

Tilastokeskus, 2022a, Energian hankinta ja kulutus. <https://www.stat.fi/tilasto/ehk>

Tilastokeskus, 2022b, Sähkön ja lämmön tuotanto. <https://www.stat.fi/tilasto/salatu>

Tilastokeskus, 2021a, Liikenteen energiankulutus. https://pxhopea2.stat.fi/sahkoiset_julkaisut/energia2021/html/suom0004.htm

Tilastokeskus, 2021b, Kasviuonekaasupäästöt. https://www.stat.fi/ti/khki/2020/khki_2020_2021-05-21_tie_001_fi.html

Tilastokeskus 2019, Suomen kasviuonekaasupäästöt 1990-2018. Helsinki 2019. <https://www.doria.fi/handle/10024/184294>.

Timilsina G.R. 2020, Demystifying the Costs of Electricity Generation Technologies, World Bank, Policy Research Working Paper 9303. <https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/34018/Demystifying-the-Costs-of-Electricity-Generation-Technologies.pdf>

Turunen, J., 2022, Ennuste: ladattavia autoja tulee arvioita nopeammin, Helsingin Sanomat, 17.2.2022

Tuuleenergia Assosiatsoon 2022. Radar system upgrade to enable establishment of wind farms to cost EUR 74.5 mln. <https://tuuleenergia.ee/radar-system-upgrade-to-enable-establishment-of-wind-farms-to-cost-eur-74-5-mln/?lang=en>.

UNECE, 2021, Life Cycle Assessment of Electricity Generation Options. Report, United Nations Economic Commission for Europe, United Nations, Geneva, 107 p.

Van Der Giesen, C., Meinrenken, C.J., Kleijn, R., Sprecher, B., Lackner, K.S., Kramer, G.J., 2017. Generation with humidity swing direct air capture of CO₂ versus mea-based postcombustion capture. *Environ. Sci. Technol.* 51, 1024–1034.
https://doi.org/10.1021/ACS.EST.6B05028/SUPPL_FILE/ES6B05028_SI_001.PDF

Wråke, Markus; Karlsson, Kenneth; Kofoed-Wiuff, Anders; Bolkesjø, Torjus Folsland; Lindroos, Tomi J.; Hagberg, Martin; Simonsen, Mikkel Bosack; Unger, Thomas Tennbakk, Eirik; Jåstad, Ogner; Lehtilä, Antti; Putkonen, Nelli and Koljonen, Tiina, 2021, *Nordic Clean Energy Scenarios: Solutions for Carbon Neutrality*. report, Nordic Energy Research, Nordic Council of Ministers, Copenhagen, 174 p.
<http://doi.org/10.6027/NER2021-01>

Whitaker, M., Heath, G.A., O'Donoghue, P., Vorum, M., 2012. Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Coal-Fired Electricity Generation. *J. Ind. Ecol.* 16, S53–S72.
<https://doi.org/10.1111/J.1530-9290.2012.00465.X>



LUT-yliopisto
Lappeenrannan kampus
Yliopistonkatu 34
53850 Lappeenranta, Finland

Lahden kampus
Mukkulankatu 19
15210 Lahti, Finland

Lisätietoja:
lut.fi/energiaselonteko

