

Laura Kylmälä

**UUSIUTUVIIN ENERGIALÄHTEISIIN
PERUSTUVA SÄHKÖNTUOTANTO –
SKENAARIOT JA NIIDEN
REALISTISUUS**

Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Kandidaatintyö
Syyskuu 2020

TIIVISTELMÄ

Laura Kylmä: Uusiutuviin energialähteisiin perustuva sähköntuotanto – skenaariot ja niiden realismi (Renewable energy-based electricity generation – scenarios and their realism)
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Ympäristö- ja energiatekniikan tutkinto-ohjelma
Elokuu 2020

Ilmastonmuutos on yhä ajankohtaisempi puheenaihe, sillä sen on arvioitu muuttuvan melko pian hallitsemattomaksi ilman merkittäviä toimenpiteitä. Energiantuotannon ollessa yksi suurimmista saastuttajista, on hiilineutraali sähköntuotanto avainasemassa ilmastonmuutoksen hillitsemisessä. Tässä työssä esitellään uusiutuviin energialähteisiin perustuvia sähköntuotannon skenaarioita ja pohditaan niiden realismia. Lisäksi tutustutaan pääpiirteittäin sääriippuvaisiin sähköntuotantoteknologioihin.

Sääriippuvaiset sähköntuotantotavat, eli tuulivoima ja aurinkosähkö, ovat suuressa roolissa uusiutuviin energialähteisiin perustuvissa sähköntuotannon skenaarioissa. Jotta sähkön tarve pystyttäisiin täyttämään joka hetki, täytyy sääriippuvaisen sähköntuotannon vaihtelevuutta kompensoida. Tuotannon ylijäämäenergia voidaan esimerkiksi varastoida myöhempää käyttöä varten. Sähkön varastointitekologioita ovat muun muassa pumpattu vesivoima, paineilma, akut ja Power-to-Gas-teknologia.

Työssä esitellään kolme maailmanlaajuista ja kolme Euroopan-laajuista skenaariota, joissa kaikissa vuoden 2050 sähköntuotanto perustuu täysin uusiutuviin energialähteisiin. Skenaarioiden toteutumiseen vaikuttavia tekijöitä ovat muun muassa mallinnuksessa tehdyt oletukset eri teknologioiden kehittämisestä sekä vallitseva taloustilanne.

Työssä tehtyjen vertailujen ja pohdintojen perusteella huomataan, että osassa esitellyistä skenaarioista arviot vuodelle 2020 eivät ole toteutumassa. Lisäksi joissakin skenaarioissa on puutteellisesti käsitelty sitä, kuinka sähköntuotannon vaihtelun kompensointi toteutettaisiin skenaarion mukaisessa sähköenergiajärjestelmässä, mikä vähentää skenaarion uskottavuutta. Näiden havaintojen perusteella ei kuitenkaan voida suoraan arvioida, kuinka hyvin skenaarioiden arviot vuodelle 2050 tulevat toteutumaan.

Avainsanat: Uusiutuva energia, sähköntuotannon skenaariot, sääriippuvainen sähköntuotanto

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	4
2. TAUSTATIETOA SÄHKÖNTUOTANNOSTA	5
2.1 Sähköntuotanto tällä hetkellä	5
2.2 Ilmasto- ja energiavoitteet	7
3. SÄÄRIIPPUVAISET SÄHKÖNTUOTANTOTAVAT	9
3.1 Tuulivoima	9
3.2 Aurinkosähkö	11
3.3 Sähköenergian varastointitekologioita	13
4. SÄHKÖNTUOTANNON SKENAARIOITA	16
4.1 Maailmanlaajuisia skenaarioita	16
4.2 Euroopan-laajuisia skenaarioita	19
5. SKENAARIOIDEN REALISTISUUS	21
5.1 Tuulivoiman parametrit	21
5.2 Aurinkoenergian parametrit	23
5.3 Skenaarioiden realistisuus	26
5.3.1 Tasatut sähköntuotannon kustannukset	26
5.3.2 Ydinvoima	26
5.3.3 Muita huomioita	27
6. YHTEENVETO	28
LÄHTEET	30

LYHENTEET JA MERKINNÄT

ADV E[R]	Advanced Energy [R]evolution -skenaario
CSP	engl. concentrated solar power, keskittävä aurinkovoima
E[R]	Energy [R]evolution -skenaario
EREC	engl. European Renewable Energy Council, Eurooppalainen uusiutuvan energian järjestö
EU	Euroopan unioni
IEA	engl. International Energy Agency, Kansainvälinen energiajärjestö
IPCC	engl. Intergovernmental Panel on Climate Change, hallitustenvälinen ilmastomuutospaneeli
IRENA	engl. International Renewable Energy Agency, Kansainvälinen uusiutuvan energian järjestö
LCOE	engl. levelized cost of electricity, tasattu sähköntuotannon kustannus
LUT	engl. Lappeeranta University of Technology, Lappeenrannan teknillinen yliopisto
PtG	Powet-to-Gas-teknologia
RLI	engl. Reiner Lemoine Institut, Reiner Lemoine -tutkimuslaitos
VTT	Teknologian tutkimuskeskus VTT
WNA	engl. World Nuclear Association, Maailman ydinenergiajärjestö
YK	Yhdistyneet kansakunnat

<i>A</i>	pinta-ala
<i>c</i>	valonnopeus
<i>C</i>	päästökaupasta aiheutuvat lisäkustannukset
<i>D</i>	käytöstä poiston kustannukset
<i>F</i>	polttoainekustannukset
<i>E</i>	energia
<i>h</i>	Planckin vakio
<i>m</i>	massa
<i>O</i>	käyttökustannukset
<i>P</i>	teho
<i>r</i>	korkokanta
<i>t</i>	aika
<i>u</i>	tuulen nopeus
λ	säteilyn aallonpituus
ρ	tiheys

1. JOHDANTO

Maapallon keskilämpötilan vaihtelu on luonnollista, mutta tämän hetken ilmastonmuutosta pidetään ihmisen aiheuttamana. Teollistumisesta lähtien kasvihuonekaasujen määrä on lisääntynyt ilmakehässä aiheuttaen ilmaston lämpenemistä. Lämpenemisen haittavaikutuksia ovat muun muassa luonnon monimuotoisuuden väheneminen, äärimmäisten sääilmiöiden lisääntyminen ja jäätiköiden sulaminen. (Mathez & Smerdon 2018)

Suurin osa maapallon hiilidioksidipäästöistä syntyy energiantuotannon yhteydessä. Jotta ilmastonmuutos saataisiin hillittyä vaarattomalle tasolle, vaatii se suuria muutoksia energiantuotantorakenteeseen. Vaarattomuuden saavuttamiseksi energiantuotannon tulisi siirtyä kohti hiilineutraaliutta. (Mathez & Smerdon 2018) Monet maat ovatkin asettaneet tavoitteeksi tuottaa sähkönsä täysin uusiutuvilla energialähteillä vuoteen 2050 mennessä (Hansen et al. 2019).

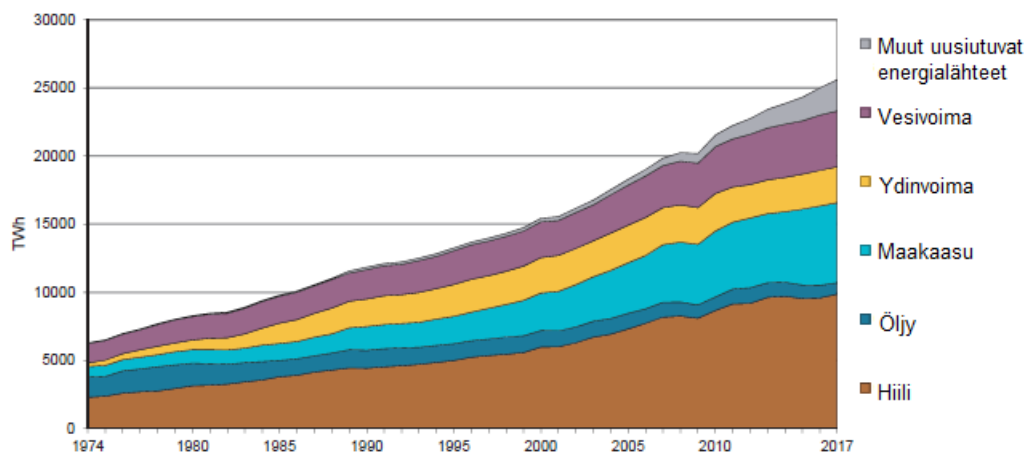
Tämän työn aiheeksi valikoitui uusiutuviin energialähteisiin perustuva sähköntuotanto ja siihen liittyvät skenaariot. Työn tavoitteena on selvittää, minkälaisia sähköntuotannon skenaarioita on olemassa sekä pohtia niiden realistisuutta. Tarkastelun kohteeksi valitut skenaariot sellaisia, joissa kaikki tai lähes kaikki sähköstä tuotettaisiin uusiutuvilla energialähteillä vuonna 2050. Realistisuuden arvioimiseksi eri skenaarioita vertaillaan toisiinsa. Lisäksi pohditaan, mitä haasteita skenaarioiden toteutumisella voisi olla.

Aluksi työssä käsitellään tämän hetken sähköntuotantoa sekä energiantuotannolle asettuja ilmasto- ja energiatavoitteita. Taustoituksen jälkeen esitellään sääriippuvaiset sähköntuotantotavat ja sähkön varastointiteknologiat pääpiirteiltään. Tämän jälkeen siirytään skenaarioiden esittelyyn. Lopuksi vertaillaan eri skenaarioita ja pohditaan niiden realistisuutta.

2. TAUSTATIETOA SÄHKÖNTUOTANNOSTA

2.1 Sähköntuotanto tällä hetkellä

Koko maailman sähköntuotanto energialähteittäin on esitettyä kuvassa 1. Kuvaajan perusteella voidaan huomata sähköntuotannon kasvaneen vuosien 1974–2017 suhteellisen tasaisesti vajaasta 7 000 TWh:sta yli 25 000 TWh:iin. Fossiilisten polttoaineiden eli hiilen, öljyn ja maakaasun osuus sähköntuotantokapasiteetissa on pysynyt suunnilleen noin 60 %:n suuruisena koko tarkasteluajanjakson ajan. Vuonna 2017 uusiutuvien energianlähteiden osuus sähköntuotannosta oli noin 25 %, fossiilisten polttoaineiden noin 65 % ja ydinvoiman noin 10 %.



Kuva 1. Maailman sähköntuotannon kehitys energialähteittäin, muokattu lähteestä (IEA 2019).

Euroopan sähköntuotannon osuus koko maailman sähköntuotannosta on suurin piirtein 14 %. Vuonna 2018 Euroopassa tuotetun sähkön kokonaismäärä oli reilu 3 500 TWh. Sekä uusiutuvien energialähteiden että fossiilisten polttoaineiden osuudet sähköntuotannosta olivat suunnilleen 40 %. Loput tuotannosta katettiin ydinvoimalla. (IEA 2019)

Tasattu sähköntuotannon kustannus (LCOE, engl. levelized cost of electricity) kuvaa sähköntuotannon kustannuksia suhteessa tuotettuun sähkön määrään. Sitä voidaan hyödyntää muun muassa sähkön hinnoittelussa ja eri tuotantomuotojen kilpailukyvyn arvioinnissa. (Ameli & Kammen 2014) LCOE voidaan laskea yhtälöllä

$$LCOE = \frac{\sum_t (I_t + O\&M_t + F_t + C_t + D_t)(1+r)^{-t}}{\sum_t E_t (1+r)^{-t}}, \quad (1)$$

jossa t on vuosi, I_t investointikustannukset, $O\&M_t$ käyttö- ja ylläpitokustannukset, F_t polttoainekustannukset, C_t päästökaupasta aiheutuvat lisäkustannukset, D_t käytöstä poistamisen kustannukset, E_t tuotetun sähkön määrä ja r on korkokanta. Alaindeksi t viittaa siihen, että muuttujan arvo on vuodelta t . (de Jong et al. 2015) Muuttujat C_t ja F_t eivät kosketa kaikki tuotantomuotoja, sillä päästökauppa ei aiheuta kustannuksia hiilineutraaleille tuotantotavoille, kuten uusitutuville energianlähteille ja ydinvoimalle, eikä esimerkiksi tuulivoimalle muodostu lainkaan polttoainekustannuksia.

Taulukkoon 1 on koottu uusiutuvien energianlähteiden keskimääräiset tasatut sähkön tuotannon kustannukset vuonna 2018. Vertailuksi siihen on myös merkitty LCOE:n vaihteluväli fossiilisilla polttoaineilla tuotetulle sähkölle. Kuten taulukosta voidaan huomata, vuonna 2018 kaikkien muiden uusiutuvien energianlähteiden paitsi keskittävän aurinkovoiman (CSP, engl. concentrated solar power) keskimääräiset LCOE:t osuivat fossiilisten polttoaineiden kustannusten vaihteluvälille, mikä tekee niistä kilpailukykyisiä energialähteitä.

Taulukko 1. *Eri energialähteiden sähköntuotannon kustannukset vuonna 2018, muokattu lähteestä (IRENA 2019).*

Energialähde	LCOE [€/MWh]
Biomassa	57
Geoterminen energia	66
Vesivoima	43
Aurinkokennoteknologia	78
Keskittävä aurinkovoima	170
Merituulivoima	117
Maantuulivoima	52
Fossiiliset polttoaineet	46–161

LCOE:ta voidaan myös hyödyntää koko sähköenergiajärjestelmän taloudellisen kannattavuuden arvioinnissa. Koko energiajärjestelmän LCOE voidaan laskea esimerkiksi, kun eri teknologioiden LCOE:t suhteutetaan niiden tuotantomääriin.

2.2 Ilmasto- ja energiatavoitteet

Ilmasto- ja energiatavoitteita on monen laajuisia. Ne voivat esimerkiksi olla maailmanlaajuisia, paikallisia tai järjestökohtaisia. Usein suuremman mittakaavan tavoitteet vaikuttavat pienemmän mittakaavan tavoitteisiin. Esimerkiksi Euroopan Unionin (EU) päämäärät vaikuttavat sen jäsenmaiden tavoitteisiin ja Yhdistyneiden Kansakuntien (YK) päämäärät vastaavasti EU:n tavoitteisiin. (Liobikiené & Butkus 2017)

YK on toisen maailmansodan jälkeen perustettu kansainvälinen yhteistyöjärjestö, jonka tavoitteita ovat muun muassa kestävän kehityksen ja ihmisoikeuksien edistäminen sekä rauhan ja turvallisuuden ylläpitäminen (Pintealä 2018). Ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi luotiin YK:n ilmastonsuojelun puitesopimus Rio de Janeirossa vuonna 1992. Sen pääasiallisena tavoitteena on saada ilmakehän kasvihuonekaasupitoisuudet sellaiselle tasolle, ettei niistä aiheutuisi vaaraa maapallon ilmastolle. (Greene 2000)

Kioton pöytäkirja luotiin täydentämään YK:n ilmastonsuojelun puitesopimusta vuonna 1997. Siinä 1990-luvun teollisuusmaat lupautuivat vähentämään 5,2 % kuuden eri kasvihuonekaasun päästöjä vuosien 2008–2012 aikana. Verrokkina toimi vuosi 1990. Kioton pöytäkirjaa on kritisoitu muun muassa sen takia, että sopimus koski vain tiettyjä maita, jolloin päästöt saattoivat jopa kasvaa joillakin alueilla. Lisäksi sopimukseen sitoutuneella maalla oli mahdollisuus päästä päästötavoitteensa myös paikallisen päästöjen vähentämisen lisäksi päästökaupoilla, yhteistoteutuksella ja puhtaan kehityksen mekanismilla. Näiden joustomekanismien avulla sopimuksen ulkopuolisia maita saatiin osallisiksi Kioton pöytäkirjaan, vaikkei heille suoraan kohdistettu vähennystavoitteita. (Almer & Winkler 2017)

Vuonna 2015 hyväksyttiin Pariisin ilmastopopimus, joka astuu voimaan vuonna 2020 (Almer & Winkler 2017). Se täydentää, kuten Kioton pöytäkirjakin, YK:n ilmastonsuojelun puitesopimusta. Pariisiin ilmastopopimuksessa maapallon keskilämpötilan nousulle asetettiin rajaksi 1,5 °C:n nousu esiteollisesta ajasta. Tällä tavoitteella pyritään estämään kriittiseksi koetun 2 °C:n nousu, joilloin ilmastonmuutoksen vaikutusten arvioidaan muuttuvan hallitsemattomiksi. Jotta tavoitteeseen päästäisiin, tulisi IPCC:n (engl. Intergovernmental Panel on Climate Change) tekemän ilmastopoportin mukaan noin vuoteen 2050 mennessä saavuttaa maailmanlaajuinen hiilineutraalius. (Allen et al. 2018)

Myös EU on asettanut ilmasto- ja energiatavoitteita. Vuodelle 2020 EU asetti tavoitteeksi vähentää 20 % kasvihuonekaasupäästöjä vuoden 1990 tasosta, nostaa 20 %:iin uusiutuvien energialähteiden osuus energiantuotannosta ja parantaa 20 % energiatehokkuutta. Pitkän tähtäimen tavoitteena EU:lla on saavuttaa hiilineutraalius vuoteen 2050

mennessä, mikä on linjassa Pariisin ilmastopöytäkirjan tavoitteen kanssa. Hiilineutraaliuden saavuttamiseksi kasvihuonekaasupäästöjä pitäisi vähentää sellaiselle tasolle, että ne olisivat suuruudeltaan enintään 20 % vuoden 1990 tasosta. (Liobikiené & Butkus 2017)

3. SÄÄRIIPPUVAISET SÄHKÖNTUOTANTOTAVAT

Sääriippuvaisella sähköntuotannolla tarkoitetaan tuotantomuotoja, joiden tuotantomäärä on vahvasti sidoksissa johonkin sääilmiöön. Tällaisia energialähteitä ovat tuuli- ja aurinkovoima. Esimerkiksi öisin ei saada tuotettua aurinkosähköä eikä tyynellä säällä tuulivoimaa.

Tuuli- ja aurinkovoima ovat merkittävimpiä uusiutuvia energialähteitä vesivoiman ohella. Jotta näiden sähköntuotantomuotojen tuotantokapasiteettia voitaisiin kasvattaa huomattavasti, täytyy energiasysteemin kyetä kompensoimaan niiden tehontuotannon vaihtelua. Tätä sähköntuotannon joustavuutta voidaan lisätä esimerkiksi varastoimalla tuotettua energiaa, lisäämällä mahdollisuutta naapurimaiden väliseen sähkökaupankäyntiin, hyödyntämällä kysyntäjoustoa tai käyttämällä myös muita energialähteitä sähköntuotannossa. (Deason 2018)

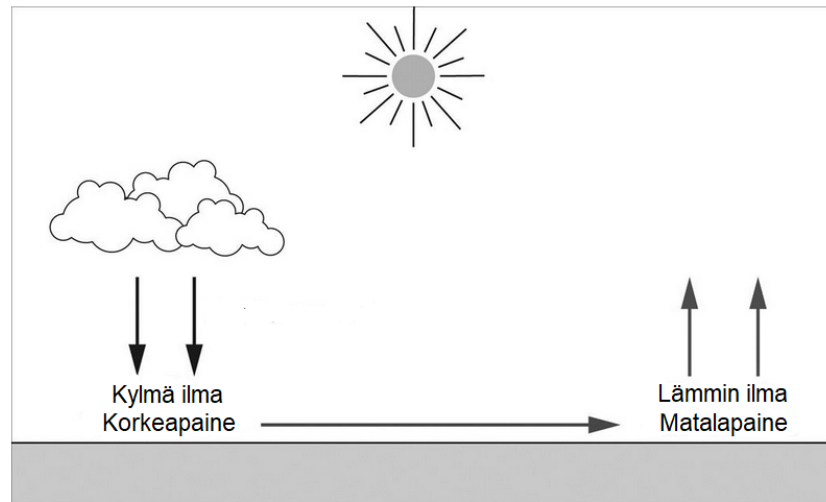
3.1 Tuulivoima

Tuuli on ilman liikettä, joka on seurausta ilman paine-eroista. Paine-eroja syntyy, kun aurinko lämmittää maapalloa epätasaisesti. Näin ollen tuulen energia on peräisin aurinkosta. Kuvassa 2 on havainnollistettu tuulen syntymistä. Kylmä ilma on raskaampaa kuin lämmin ilma, jolloin ilma painuu alaspäin ja syntyy korkeapaineen alue. Lämmin ilma puolestaan kohoaa ylöspäin synnyttäen matalapaineen alueen. Alueiden välinen paineero saa ilmamassan virtaamaan korkeapaineesta kohti matalapainetta.

Tuulivoima perustuu tuulen liike-energian hyödyntämiseen. Tuuli saa liikkeellään turbiinin lavat pyörimään. Muodostunut mekaaninen energia pyörittää turbiinin generaattoria, jolloin sähkömagneettisen induktion ansiosta energiaa muuttuu sähköksi. Turbiinin menevän tuulen teho saadaan laskettua kaavalla

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A \bar{u}^3, \quad (2)$$

jossa ρ on ilman tiheys, A turbiinin lapojen pyyhkäisyypinta-ala ja \bar{u} tuulen keskinopeus. (Tong 2010)



Kuva 2. Havainnekuva tuulen muodostumisesta, muokattu lähteestä (Breeze 2019).

Yhtälöstä 2 voidaan huomata, että suuremman tehon saavuttamiseksi, kannattaa tuulivoimalan sijainti valita tuulisuuden perusteella. Merellä tuulen nopeudet ovat tyypillisesti 20 % korkeammat kuin maalla (Tong 2010). Suurin osa tuulivoimaloista rakennetaan kuitenkin maalle, koska meriolosuhteet asettavat haasteita sekä tuulivoimalan rakentamiselle että sen materiaalien kestävyydelle (Breeze 2019).

Turbiiniin menevää tuulen liike-energiaa ei pystytä kokonaan muuttamaan mekaaniseksi energiaksi. Betzin laki kertoo teoreettisen ylärajan tuulivoimalan hyötysuhteelle. Sen suuruus on noin 59,3 %. Turbiinissa tapahtuvien aerodynaamisten häviöiden takia todellisuudessa vain 30–45 % tuulen liike-energiasta voidaan muuttaa mekaaniseksi energiaksi. Lisäksi generaattorissa tapahtuu häviöitä, jotka vaikuttavat tuulivoimalan kokonaisyötysuhteeseen aerodynaamisten häviöiden lisäksi. (Tong 2010)

Tuulivoimalan lapojen optimaalisena lukumääränä pidetään kolmea. Lapojen pyörimisnopeus on sitä suurempi, mitä vähemmän lapoja on. Roottorin pyöriminen on kuitenkin epästabiilimpaa yksi- ja kaksilapaisilla tuulivoimaloilla, mikä aiheuttaa mekaanista rasitusta. Kun lapojen määräksi valitaan kolme, päästään sopivaan tasapainoon kustannusten ja suorituskyvyn kanssa. (Breeze 2019)

Vuonna 2017 tuulivoiman osuus koko maailman sähköntuotannosta oli 4,4 % (IEA 2019). Vuosien 2010–2019 aikana maatuulivoiman asennettu kapasiteetti kasvoi noin 178 GW:sta 594 GW:iin ja merituulivoiman noin 3 GW:sta 28 GW:iin (IRENA 2020). Arvion

(IEA 2013) mukaan tuulivoiman sähköntuotanto-osuus voitaisiin nostaa 15–18 %:iin vuoteen 2050 mennessä, jos tuulivoiman kapasiteetti jatkaa nykyisenlaista kasvuaan. Tämän saavuttamiseksi vuosittain rakennettavan tuulivoimankapasiteetin tulisi nousta tämänhetkisestä noin 65 GW:sta 104 GW:iin vuoteen 2050 mennessä. Tällöin tuulivoiman tuotantokapasiteetti olisi yhteensä noin 2 800 GW.

3.2 Aurinkosähkö

Aurinko tuottaa energiansa fuusioreaktioilla. Auringon fuusioreaktiossa kaksi vetymolekyyliä yhdistyy yhdeksi heliumatomiksi. Heliumin massa on pienempi kuin vetymolekyylien, jolloin reaktion massahäviö vapautuu energiana. Vapautuva energia voidaan laskea yhtälöllä

$$E = mc^2, \quad (3)$$

jossa m on reaktion massahäviö ja c valon nopeus. Auringosta energiaa säteilee muualle avaruuteen sähkömagneettisena säteilynä. (Tiwari et al. 2016)

Maan ilmakehässä Auringon säteilyn teho pinta-alayksikköä kohden on 1376 W/m^2 . Ilmakehässä osa säteilystä absorboituu, osa siroaa ja osa pääsee muuttumattomana sen läpi, minkä seurauksena säteilyn teho laskee ja sen suuruus on maanpinnalla keskimäärin 1000 W/m^2 . (Messenger & Ventre 2010)

Aurinkokenno (engl. photovoltaic cell) on aurinkosähköteknologia, jossa auringonvalon energia muutetaan suoraan sähköksi. Sen toiminta perustuu valosähköiseen ilmiöön, jossa auringonvalon fotonit absorboituu atomiin. Fotonin sisältämä energia voidaan laskea yhtälöllä

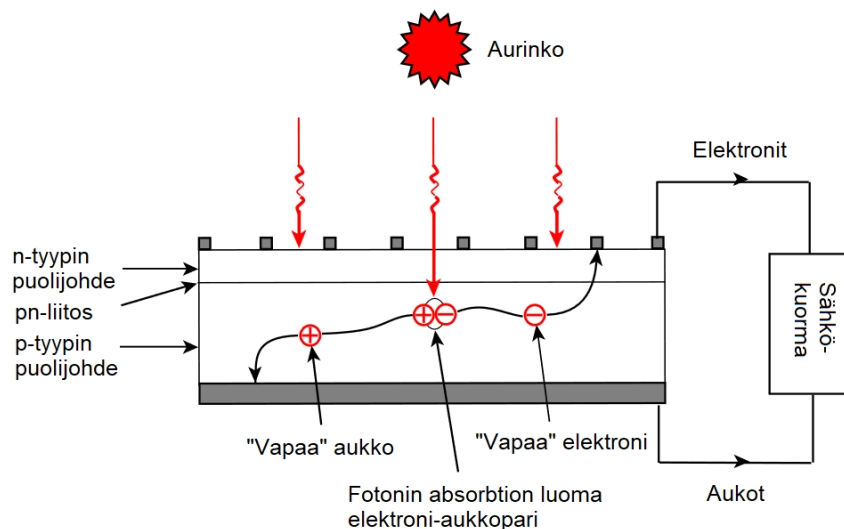
$$E = \frac{hc}{\lambda}, \quad (4)$$

jossa h on Planckin vakio ja λ valon aallonpituus. Jotta fotonit voi absorboitua atomiin, täytyy sen energian olla suurempi kuin atomin energiatasojen välinen energia. Valosähköisessä ilmiössä atomiin syntyy yksi elektroni–aukopari, kun fotonin energia virittää elektronin ylemmälle energiatasolle. Virittymisen seurauksena elektronin aiemmalle energiavälille syntyy positiivisesti varattu aukko. (Messenger & Ventre 2010)

Kuvassa 3 on esitettyä aurinkokennon toimintaperiaate. Kennon materiaalina käytetään puolijohteita, kuten piitä. Sähköntuotannon mahdollistamiseksi käytössä on kahdentyypp-

pisiä puolijohdemateriaaleja. Kiteisessä piikennossa on käytössä n- ja p-tyyppin puolijohdet. N-tyyppin puolijohde seostetaan epäpuhtausatomilla, joka luovuttaa materiaalille ylimääräisen elektronin. P-tyyppin puolijohde seostetaan epäpuhtausatomilla, joka luovuttaa materiaalille ylimääräisen aukon. Kun nämä puolijohdemateriaalit yhdistetään, syntyy pn-liitos. Puolijohdeiden seostuksessa ionisoituneet epäpuhtausatomit luovat liitoskohtaan sähkökentän, joka lajittelee valosähköisessä ilmiössä syntyneet varaukset eri puolille materiaalia. Syntyneen varausjakauman avulla saadaan synnytettyä virta kennon ulkoiseen virtapiiriin. (Archer & Green 2015)

Kaupallisten yksittäisten aurinkokennojen hyötysuhde vaihtelee 4–38 %:n välillä. Kennoilla, joissa käytetään kolmea tai neljää liitosta, hyötysuhde voi olla jopa 30–38 %. Yleisimmin käytetyillä kiteisillä piikkennoilla hyötysuhde on noin 14–22 %. Suuremman sähköntuotannon aikaansaamiseksi kennoja kytketään sarjaan ja rinnan, sillä yksittäisen aurinkokennon jännite on hyvin pieni. Kun kennot kytketään tällä lailla moduuleiksi, niiden kokonaishyötysuhde laskee. Kiteisille piimoduuleille hyötysuhde on noin 11–19 %. (Guerrero-Lemus & Martínez-Duart 2013)



Kuva 3. Havainnekuva aurinkokennon toimintaperiaatteesta, muokattu lähteestä (Archer & Green 2015, s. 21).

CSP on aurinkosähköteknologia, jossa auringon säteilyenergia muutetaan lämmöksi. Siinä peilien tai linssien avulla auringonsäteitä keskitetään polttopisteeseen, jossa säteilyn energia muutetaan lämpöenergiaksi johonkin väliaineeseen. Lämpöenergia voidaan

muuttaa sähköenergiaksi höyry- tai kaasuprosessissa. Lämmönsiirtoaine, kuten vesi-höyry tai lämmin ilma, pyörittää turbiinia, jolloin energia muuttuu mekaaniseksi energiaksi. Kun turbiinin akseliin on liitettyä generaattori, energiaa muuttuu edelleen sähköksi. (Romero & González-Aguilar 2014)

CSP:llä tuotetun sähkön hyötysuhde vaihtelee noin 8–35 %:n välillä riippuen käytetystä teknologiasta. Kehittyneimmät CSP-teknologiat ovat parabolinen kouru (engl. parabolic trough), parabolinen peiliantenni (engl. parabolic dish), aurinkotorni (engl. tower) ja lineaarinen Fresnel heijastin (engl. linear Fresnel reflector). (Guerrero-Lemus & Martínez-Duart 2013)

Aurinkosähköteknologioiden kustannukset ovat laskeneet viime vuosina radikaalisti. Isoin muutos on tapahtunut aurinkokennoteknologian kustannuksissa, mutta myös CSP:n kustannukset ovat laskeneet. (Hansen et al. 2019) Vuonna 2017 aurinkosähkön osuus koko maailman sähköntuotannosta oli 1,8 % (IEA 2019). Vuosien 2010–2019 aikana aurinkokennoteknologian tuotantokapasiteetti on kasvanut noin 40 GW:sta 580 GW:iin ja CSP:n 1 GW:sta 6 GW:iin (IRENA 2020). Aurinkokennoteknologioiden kustannusten odotetaan jatkavan laskuaan (Hansen et al. 2019), minkä takia myös tuotantokapasiteettien odotetaan jatkavan nopeaa kasvuaan.

3.3 Sähköenergian varastointiteknologioita

Sähköenergian varastointiteknologiat voidaan jaotella sen perusteella, kuinka pitkäaikaisesti energiaa voidaan niihin varastoida. Seuraavaksi esitellään teknologioita, joissa varastointi onnistuu useista tunneista päiviin. (Díaz-González 2016)

Pumpattu vesivoima on varastointiteknologioista kypsä. Sen toimintaperiaate on hyvin yksinkertainen. Kysynnän ollessa alhainen vettä pumpataan sähkön avulla korkeammalla olevaan altaaseen. Kun vesi päästetään virtaamaan takaisin alemmalle altaalle, sen potentiaalienergiaa muutetaan takaisin sähköksi generaattoria pyörittävän turbiinin avulla. Pumpatun vesivoiman hyötysuhde on noin 65–85 %. (Gallo et al. 2016)

Eräs toinen tapa varastoida energiaa on puristaa ilmaa mekaanisella työllä ja varastoida syntynyt paineilma maanalaiseen onkaloon tai maanpäälliseen säiliöön. Paineilmavaraston energia saadaan muutettua takaisin sähköksi kaasuturbiinilla. Tämän varastointiteknologian hyötysuhde on keskimäärin 71 %. (Díaz-González 2016)

Tuotettu sähköenergiaa voidaan varastoida kemialliseksi energiaksi myös akkuihin. Perinteisiä akkuja ovat muun muassa lyijy- ja litiumioniakut. Hapetus-pelkistysreaktioiden

avulla energiaa voidaan muuttaa takaisin sähköksi. Perinteisten akkujen lisäksi sähköä voidaan varastoida myös esimerkiksi virtausakkuihin. Virtausakku eroaa perinteisestä akusta siten, että sen elektrolyytit virtaavat kennon läpi kennon ulkopuolisesta varastosta. Näin pyritään pidentämään akun purkuaikaa. Akut toimivat tyypillisesti 70–90 %:n hyötysuhteella. (Melhem 2013)

Power-to-Gas (PtG) on yksi lupaavimmista sähkön varastointitekniologioista. Vesi hajotetaan vedyksi ja hapeksi elektrolyysillä. Tuotettu vety voidaan hyödyntää suoraan sellaisenaan, varastoida, siirtää maakaasuputkistoon tai muuttaa synteettiseksi maakaasuksi. Vety voidaan varastoida metallihydrideihin tai säiliöihin joko paineistettuna kaasuina tai nestemäisessä olomuodossa. (Boudellal 2018) PtG-tekniologian hyötysuhde riippuu hyvin paljon siitä, kuinka monta kertaa energiaa täytyy muuttaa muodosta toiseen ja mitä varastointitekniikkaa käytetään. Esimerkiksi, jos elektrolyysillä tuotettu vety hyödynnetään sähköntuotannossa suoraan, on prosessin hyötysuhde noin 40 %. (Díaz-González 2016)

Edellisessä aluvuossa esitelty CSP-laitos voidaan myös suunnitella siten, että se varastoi keräämäänsä energiaa lämpövarastoon eikä muunna sitä suoraan sähköksi. Varastointimateriaalina voidaan käyttää esimerkiksi sulia suoloja tai mineraaliöljyjä. Lämpövarasto toimii noin 60 % hyötysuhteella. (Guerrero-Lemus & Martínez-Duart 2013)

Useimpia esitellyistä tekniologioista ei käytetä vielä yleisesti sähkön varastoinnissa joutuen niiden teknologisesti kehittymättömyydestä tai korkeista investointikustannuksista (Melhem 2013). Tällä hetkellä esimerkiksi pumpatun vesivoiman asennettu kapasiteetti on noin 121 GW (IRENA 2020) ja paineilman noin 440 MW (Díaz-González 2016).

Jotta tulevaisuudessa voitaisiin hyödyntää suuremmissa mittakaavassa erilaisia varastointitekniologioita sääriippuvaisen sähköntuotannon vaihteluiden kompensointiin, täytyisi niiden kustannusten laskea huomattavasti. Varastointitekniologioihin tehtävien suurien investointien houkuttelevuutta vähentää muun muassa se, ettei niiden ylläpidosta saada välttämättä riittävää korvausta, jotta toiminta olisi kannattavaa. (Ferreira et al. 2013)

Pumpatun vesivoiman lisäksi lupaavimpia varastointitekniologioita ovat PtG ja paineilma, jotka soveltuvat hyvin pidempiaikaiseen sähkön varastointiin. Pidempiaikaisia sähkövarastoja voidaan hyödyntää varsinkin alueilla, joilla sähkön tarve vaihtelee suuresti eri vuodenaikojen välillä. (Gallo et al. 2016) Teknologisesti PtG olisikin jo riittävän kehittynyt tekniologia, mutta korkeiden kustannusten takia sille ei kehittynyt kovin laajoja markki-

noita. Toisaalta laajempien markkinoiden muodostuminen laskisi investointikustannuksia. (Schulce et al. 2017) Pumpatun vesivoiman kapasiteetin kasvattamista puolestaan estää teknologian maantieteelliset vaatimukset (Melhem 2013).

4. SÄHKÖNTUOTANNON SKENAARIOITA

Tässä luvussa esitellään pääpiirteittäin työssä tarkasteltavat sähköntuotannon skenaariot. Esittelyssä on sekä globaaleja että Euroopan skenaariota. Skenaarioiden tarkastelussa kiinnitetään erityisesti huomiota sääriippuvaisten tuotantotapojen käytön osuuksiin sähköntuotannossa sekä niiden hyödyntämisestä aiheutuvan tuotannon vaihtelun kompensointiin. Lisäksi tarkastellaan, minkälaisia oletuksia skenaarioissa on tehty kustannusten kehittymiselle.

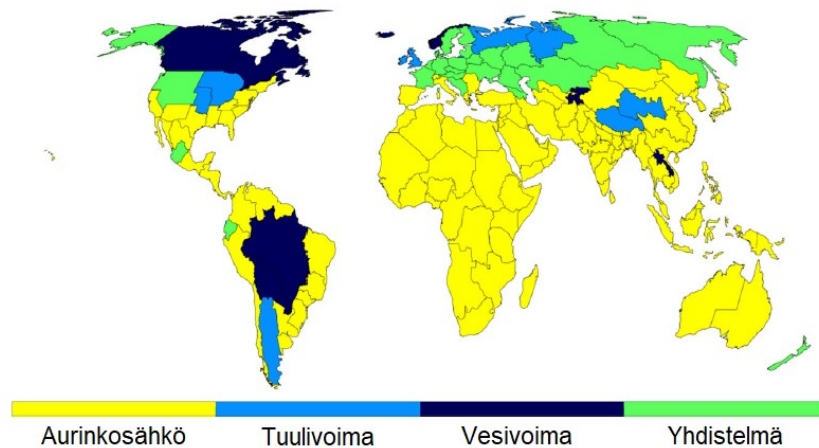
4.1 Maailmanlaajuisia skenaarioita

Maailmanlaajuisista skenaarioista esittelyssä on kolme eri skenaariota. Kaikissa näissä kolmessa skenaariossa sähköntuotanto perustuu täysin uusiutuviin energialähteisiin vuonna 2050.

Advanced Energy [R]evolution -skenaario (ADV E[R]) on globaali energiaskenaario, jonka Greenpeace, Global Wind Energy Council ja SolarPower Europe ovat tehneet yhteistyössä. Tavoitteena tässä skenaariossa on saavuttaa täysin uusiutuviin energialähteisiin perustuva energijärjestelmä vuoteen 2050 mennessä. Mallinnus suoritettiin Mesap/Planet-simulaatiolla vuosille 2012–2050. Tutkimuksessa mallinnettiin myös ADV E[R] -skenaarion lisäksi Energy [R]evolution -skenaario (E[R]), jonka tavoitteeksi puolestaan asetettiin hiilidioksidipäästöjen hillitseminen 4 Gt/a tasolle, jolloin maapallon keskilämpötilan nousu pystyttäisiin yhä pitämään alle 2 °C:n. (Teske et al. 2015) Koska E[R]-skenaariossa vuoden 2050 sähköntuotanto ei perustu täysin uusiutuviin energialähteisiin, sitä ei käsitellä tässä työssä tämän enempää.

Lappeenrannan teknillisen yliopiston (LUT, engl. Lappeenranta University of Technology) ja Energy Watch Groupin tekemän tutkimuksen mukaan lähes kaikki maailman sähköstä voitaisiin tuottaa sääriippuvaisilla sähköntuotantotavoilla (Ram et al. 2019). Tutkimuksessa mallinnettuun skenaarioon viitataan tästä eteenpäin lyhenteellä LUT. Skenaario mallinnettiin LUT Energy System Transition mallilla viiden vuoden ajanjaksoissa vuosille 2015–2050. Sen tavoitteena oli löytää kustannusoptimaalinen energijärjestelmä, jossa hyödynnetään kunkin alueen olosuhteisiin parhaiten sopivia energialähteitä ja joka noudattaa Pariisin ilmastopöytäkirjasta hiilittömällä maapallon keskilämpötilan nousun 1,5 °C:een. (Ram et al. 2019) Kuvassa 4 on esitetty sähköntuotannon pääenergiälähteet maailman eri alueille vuonna 2050. Vihreillä alueilla ei ole yksittäistä energialähdettä, jonka osuus olisi yli 50 % sähköntuotannosta. Kuten kuvasta voidaan

huomata, suuressa osaa maailmaa voitaisiin hyödyntää pääenergianlähteenä aurinkosähköä.



Kuva 4. LUT-skenaarion mukaiset pääenergianlähteet maailman eri alueilla vuonna 2050, muokattu lähteestä (Ram et. al 2019).

Kolmas maailmanlaajuinen skenaario, jota tässä työssä tarkastellaan, on Teknologian tutkimuskeskus VTT:n mallintama. Pursiheimo et al. (2019) tekemässä tutkimuksessa mallinnettiin TIMES-VTT-mallilla vuosille 2010–2050 neljä eri skenaariota, joissa kaikissa tavoitteena on saavuttaa täysin uusiutuviin energialähteisiin perustuva energiajärjestelmä. Erona skenaarioissa on niissä määritellyt ylä- ja alarajat biomassan ja sähköajoneuvojen käytölle. Tässä työssä tarkastellaan skenaariota, jossa biomassan hyödyntämistä on selvästi rajoitettu ja jossa vähintään 80 % ajoneuvoista on sähkökäyttöisiä vuonna 2050. Skenaarioon viitataan tästä eteenpäin lyhenteellä VTT.

Taulukkoon 2 on koottu perustietoja skenaarioiden mukaisista sähköenergiajärjestelmistä. Sulkuihin on merkitty skenaarion lukemat Euroopan alueelle. Euroopan lukemat VTT-skenaarioon on arvioitu sähköntarpeen ja tuotantokapasiteettien suhteiden avulla, sillä niitä ei ole suoraan kerrottu artikkelissa. VTT-skenaariossa ei myöskään ole tehty tarkempaa tarkastelua energiajärjestelmän kustannuksille eri parametrien arviointiin liittyvien epävarmuustekijöiden takia. (Pursiheimo et al. 2019)

Kuten taulukosta 2 voidaan huomata, ADV E[R] -skenaariossa sähköntuotannon on arvioitu olevan suunnilleen puolet pienempää kuin muissa skenaarioissa vuonna 2050. Lisäksi aurinkoenergian osuus sähköntuotannosta on selvästi pienempi. Kustannuksiltaan

edullisimmaksi skenaarioksi on arvioitu olevan LUT-skenaario. LUT-skenaarion mukaan skenaarion mukainen energiajärjestelmä olisi jopa edullisempi kuin nykyisenlainen (Ram et al. 2019). ADV E[R] -skenaariossa puolestaan on arvioitu kustannusten kasvavan, vaikkakin uusiutuvien energianlähteiden hyödyntämisessä säästettäisiinkin huomattavasti polttoainekustannuksissa (Teske et al. 2015).

Taulukko 2 *Maailmanlaajuisten skenaarioiden mukaiset sähköenergiajärjestelmät vuonna 2050, koottu useammasta lähteestä (Teske et al. 2015; Ram et al. 2019; Pursiheimo et al. 2019).*

Suure	ADV E[R]	LUT	VTT
Sähköntuotanto [TWh]	67 500 (5 700)	130 400 (17 400)	120 000 (8 700)
Aurinkoenergian osuus [%]	41 (26)	76 (62)	77 (41)
Tuulivoima osuus [%]	33 (41)	20 (32)	12 (41)
LCOE [€/MWh]	76 (79)	53 (56)	-
Vuosikustannukset [mrd. €/a]	4 800 (480)	2 300 (270)	-
Investointikustannukset [mrd. €/a]	1 050 (118)	1 920 (280)	-

Siirtyminen kohti uusiutuviin energialähteisiin perustuvaa sähköntuotantoa ei tapahdu hetkessä. Tyypillistä kaikille skenaarioille on, että mallinnuksen alkupuolella maakaasun hyödyntäminen sähköntuotannossa saattaa jopa lisääntyä (Teske et al. 2015; Ram et al. 2015; Pursiheimo et al. 2019). Maakaasulla tällöin paikataan hiilivoiman luopumisesta aiheutuvaa hetkellistä aukkoa sähköntuotannossa. Yhteistä skenaarioille on myös se, että niissä ydinvoiman käytöstä on tarkoitus luopua kokonaan noin vuoteen 2050 mennessä. Luopumista perustellaan ydinvoiman turvallisuusriskeillä ja ydinjätteen hävittämisen ongelmallisuudella. Oletuksena on kuitenkin, että olemassa olevat ydinvoimalat saavat toimia käyttökänsä loppuun saakka, mutta uusia investointeja ei tehdä ydinvoimalle. (Teske et al. 2015; Ram et al. 2015; Pursiheimo et al. 2019)

Skenaarioissa on otettu huomioon sääriippuvaisten sähköntuotantotapojen tuotannon vaihtelu. ADV E[R] -skenaariossa sähkön tarpeessa on huomioitu siirtöhäviöt sekä vedyn ja synteettisten polttoaineiden valmistus, mutta muutoin sähkönvarastointitekniikoiden käyttöä ei ole tarkasteltu. Koska skenaariossa suurin piirtein puolet aurinkosähköstä katettaisiin CSP:llä, voitaneen olettaa sen yhteydessä hyödynnettävän lämpövarastoja sähkön varastoinnissa. (Teske et al. 2019) LUT-skenaariossa hyödynnetään

pääosin akkuteknologiaa ja varastointia paineilmaan. Sähkön varastoinnin kapasiteetti olisi skenaarion mukaan noin 64 TWh vuonna 2050. (Ram et al. 2019) VTT-skenaarion mukaan puolestaan vastaava kapasiteetti olisi 68–70 TWh, joka olisi lähinnä paineilma-tekniologiaa (Pursiheimo et al. 2019). Molemmissa skenaarioissa hyödynnetään myös PtG-tekniologiaa, mutta LUT-skenaariorissa sitä käytetään lähinnä lämpöenergian varastona (Ram et al. 2019).

4.2 Euroopan-laajuisia skenaarioita

Myös Euroopan skenaarioista on esittelyssä kolme eri skenaariota, jotka perustuvat täysin uusiutuviin energialähteisiin. ADV E[R] – ja LUT-skenaariorissa on tehty myös alueelliset tarkastelut Euroopalle (Teske et al. 2015, Ram et al. 2019). Niitä ei kuitenkaan tässä esitellä tarkemmin, sillä niiden tämän työn kannalta oleellimmat tiedot ovat kootuna taulukkoon 2.

LUT:n tutkimusryhmän tekemässä tutkimuksessa (Child et al. 2019) Euroopan sähkön tuotannon kehittymisestä mallinnettiin kaksi eri skenaariota, Regions ja Area. Regions-skenaariorissa alueiden mallinnettiin toimivan itsenäisesti, kun taas Area-skenaariorissa niiden väliset siirtoyhteydet ovat mahdollisia. Kuten LUT-skenaarior, myös nämä skenaariot on simuloitu LUT Energy System Transition -mallilla viiden vuoden ajanjaksoissa vuosille 2015–2050. Tässä työssä tarkastellaan näistä skenaarioista tarkemmin vain Area-skenaarioria.

RE-thinking -skenaarior on European Renewable Energy Council:n (EREC) tekemä tutkimus, jossa on esitetty EU:lle reitti täysin uusiutuviin energialähteisiin perustuvaan sähköenergiajärjestelmään. Skenaarior on mallinnettu vuosille 2010–2050. Tutkimuksessa ei ole sen tarkemmin kerrottu, mitä mallia mallinnukseen on käytetty, mutta päästövähennysten laskennassa on hyödynnetty ainakin GEMIS-mallia. (Zervos et al. 2010) Tästä eteenpäin malliin viitataan lyhenteellä EREC.

Kolmas skenaarior on Pleßmann & Blechinger (2017) mallintama skenaarior, jonka määränpääksi asetettiin kasvihuonepäästöjen vähentämistavoitteiden täyttäminen. Tutkimuksessa keskityttiin erityisesti uusiutuviin energialähteisiin perustuvaan sähköntuotantoon sekä teknologioihin, joilla voidaan lisätä tuotannon joustavuutta. Reiner Lemoine - tutkimuslaitos (engl. Reiner Lemoine Institute, RLI) toimi tutkimuksen rahoittajana ja tässä työssä skenaariorin viitataan jatkossa lyhenteellä RLI. Skenaarior mallinnettiin elesplan-m -työkalulla vuosille 2016–2050. Malli tehtiin sillä ajatuksella, että se olisi mahdollisimman yksinkertainen ja riittävän realistinen.

Skenaarioiden mukaisten sähköenergiajärjestelmien perustiedot vuodelle 2050 on koottu taulukkoon 3. Taulukoista 2 ja 3 voidaan huomata, että tuulivoiman osuus sähköntuotannosta olisi suhteessa suurempaa Euroopassa kuin koko maailmassa. Euroopassa sääolosuhteet ovat sellaiset, ettei aurinkosähköä voida hyödyntää niin laajasti kuin maailmalla yleisesti. Sähköntuotantomäärät on arvioitu suunnilleen yhtä suuriksi kaikissa muissa skenaarioissa paitsi LUT-skenaariota. Siinä tuotantomäärän on arvioitu olevan yli kaksikertainen verrattuna muihin skenaarioihin. LCOE:n perusteella edullisin skenaario on Area. EREC-skenaariossa ei ole tosin laskettua arvoa LCOE:lle.

Taulukko 3 Euroopan skenaarioiden mukaiset sähköenergiajärjestelmät vuonna 2050, koottu useammasta lähteestä (Child et al. 2019, Zervos et al. 2010, Pleßmann & Blechinger 2017).

Suure	Area	EREC	RLI
Sähköntuotanto [TWh]	5 700	4 980	6 000
Aurinkoenergian osuus [%]	41	35	20
Tuulivoima osuus [%]	37	31	64
LCOE [€/MWh]	51	-	90
Vuosikustannukset [mrd. €/a]	276	-	-
Investointikustannukset [mrd. €/a]	-	70	12

Kuten maailmanlaajuisissa skenaarioissa, myös Euroopan skenaarioissa on huomioitu sähköntuotannon joustavuuden toteutus. Toisin kuin globaaleissa skenaarioissa, niissä on kiinnitetty enemmän huomioita alueiden välisiin siirtoyhteyksiin. EREC-skenaariossa on mainittu sähköntuotannon joustavuuden tarve, mutta sen toteutusta ei ole sen tarkemmin tarkasteltu (Zervos et al. 2010). Vuonna 2050 Area-skenaariossa sähköntarpeesta noin 1 220 TWh katettaisiin varastointitekniologioiden avulla. Eniten niistä hyödynnettäisiin akkuteknologiaa ja kaasuväistöjä. (Child et al. 2019) RLI-skenaariossa vastaavasti 1 160 TWh sähköntarpeesta katettaisiin varastointitekniologioilla. Noin 85 % asennetusta varastointikapasiteetista olisi PtG-teknologiaa. (Pleßmann & Blechinger 2017) Vuonna 2050 Area-skenaariossa siirtokapasiteetti olisi 260 GW ja RLI-skenaariossa 360 GW (Child et al. 2019, Pleßmann & Blechinger 2017).

5. SKENAARIOIDEN REALISTISUUS

Tässä luvussa vertaillaan ensin skenaarioissa tehtyjä oletuksia eri teknologioiden parametrien kehityksestä. Tarkastelussa on skenaarioiden oletukset teknologioiden tuotantokapasiteettien, investointikustannusten ja käyttöikien kehittymisestä. Tuotantokapasiteettien kohdalla vertailu tehdään skenaarioiden arvioiden ja todellisten arvojen välillä. Näin on tehty esimerkiksi Clack et al. (2017) tekemässä artikkelissa Jacobson et al. (2015) skenaarion realistisuudesta. Parametrien vertailun jälkeen arvioidaan tarkemmin skenaarioiden realistisuutta.

5.1 Tuulivoiman parametrit

Tuulivoiman kohdalla vertailu suoritetaan tuotantokapasiteeteille ja investointikustannuksille. Tuulivoimalan käyttöikänä kaikissa skenaarioissa, joissa niitä on tarkasteltu, on käytetty 25 vuotta (Ram et al. 2019, Child et al. 2019, Pleßmann & Blechinger 2017), joten tarkemmalle vertailulle ei ole tarvetta.

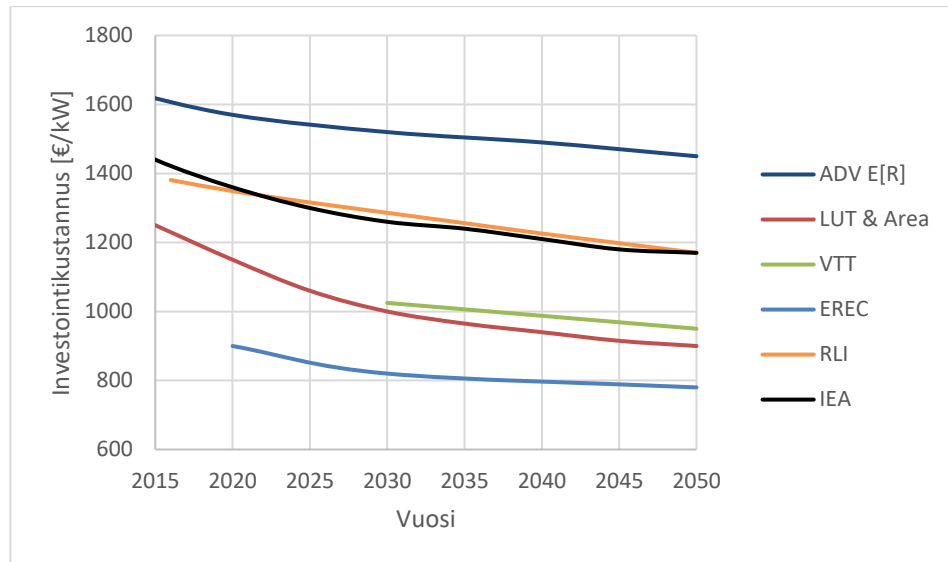
Taulukkoon 4 on koottu eri skenaarioiden arviot tuulivoiman tuotantokapasiteetista vuodelle 2020. Lisäksi taulukkoon on merkitty arvion erotus vuoden 2019 toteutuneeseen kapasiteettiin. Erotus kertoo, kuinka paljon kapasiteetin on kasvettava, jotta skenaarion tavoitteeseen päästäisiin. Negatiivinen lukema tarkoittaa, että tavoitteeseen on jo päästy. Euroopan osuudet maailmanlaajuisten skenaarioiden lukemista on merkitty sulkuihin.

Vuonna 2019 tuulivoimaa oli asennettu maailmanlaajuisesti noin 620 GW, josta noin 196 GW sijaitsi Euroopassa. Viime vuosina tuulivoiman kapasiteetin vuosittainen kasvu on ollut maailmalaajuisesti suurin piirtein 40–80 GW ja Euroopassa 10–15 GW. (IRENA 2020) Taulukosta 4 voidaan huomata maailmanlaajuisten skenaarioiden arvioiden tuulivoiman kapasiteetista vuodelle 2020 olevan selvästi liian suuriksi arvioituja, kun taas Euroopan skenaarioissa osassa skenaarioissa kapasiteetti on jopa arvioitu pienemmäksi, mitä se vuonna 2019 on ollut. Erityisesti VTT:n arvio vaikuttaisi olevan epärealistisen suuri, sillä sen mukaan vuonna 2020 kapasiteetin tulisi yli kaksinkertaistua, jotta haluttuun tavoitteeseen päästäisiin.

Taulukko 4 *Tuulivoiman tuotantokapasiteetit vuonna 2020. koottu useammasta lähteestä (Teske et al. 2015, Ram et al 2019, Pursiheimo et al. 2018, Child et al. 2019, Zervos et al. 2010, Pleßmann & Blechinger 2017).*

Skenaario	Kapasiteetti 2020 [GW]	Ero vuoteen 2019 [GW]
ADV E[R]	820 (210)	200 (14)
LUT	830 (190)	210 (-6)
VTT	1 520	900
Area	250	54
EREC	180	-16
RLI	190	-6

Kuvaan 5 on koottu eri skenaarioiden arviot maatuulivoiman investointikustannusten kehittymisestä. Tässä työssä esiteltyjen skenaarioiden lisäksi mukaan vertailuun on otettu Kansainvälisen energiajärjestön (engl. International Energy Agency, IEA) (2013) ennuste kustannuksen kehittymiselle. Kuten kuvaajasta voidaan havainnoida, EREC on arvioinut kustannusten olevan selvästi matalimmat koko tarkasteluvälin. International Renewable Energy Agency (IRENA) (2019) raportoi maatuulivoiman investointikustannusten olleen 1 190 €/kW vuonna 2018. Tätä lukemaa lähimmäksi osui LUT-skenaarion arvio. IEA:n arvion kanssa samoilla linjoilla on puolestaan RLI-skenaario. Eri skenaarioiden arvioiden välillä voidaan huomata olevan suurta hajontaa. Huomion arvoista on kuitenkin, että kaikkien skenaarioiden käyrä on melko loiva.



Kuva 5. Maatuulivoiman investointikustannukset eri skenaarioissa vuosina 2015–2050, koottu useammasta lähteestä (Ram et al. 2019, Teske et al. 2015, Pursiheimo et al. 2019, Zervos et al. 2010, Pleßmann & Blechinger 2017, IEA 2013).

Merituulivoiman investointikustannuksia ei kaikissa skenaarioissa ole käsitelty. Näissä skenaarioissa puhutaan pelkästään vain tuulivoimasta ja sillä todennäköisesti viitataan nimenomaan maatuulivoimaan. (Child et al. 2019, Pleßmann & Blechinger 2017) Esimerkiksi Area-skenaarion arvio tuulivoiman investointikustannusten kehittymisestä on sama kuin LUT-skenaarion arvio maatuulivoiman investointikustannuksista (Child et al. 2019, Ram et al. 2019). Vuonna 2050 LUT-skenaarion mukaan merituulivoiman investointikustannukset olisivat keskimäärin 2 280 €/kW (Ram et al. 2019). VTT-skenaarion vastaava arvio on 1 300 – 1 700 €/kW (Pursiheimo et al. 2019). Matalimmaksi kustannukset on arvioitu EREC-skenaariossa arvion ollessa noin 1 100 €/kW (Zervos et al. 2010) ja korkeimmaksi ADV E[R] -skenaariossa arviolla 2 320 €/kW (Teske et al. 2015).

5.2 Aurinkoenergian parametrit

Parametrien vertailu aurinkoenergialle suoritetaan tuotantokapasiteettien, investointi kustannusten ja teknologian käyttöiän suhteen. Eroavaisuuksia löytyy niin aurinkokennoteknologian kuin CSP:n arvoista.

Taulukkoon 5 on koottu vastaavat lukemat aurinkosähkölle, mitä tuulivoimalle on koottu taulukkoon 4. Vuonna 2019 aurinkoenergiaa oli asennettu maailmanlaajuisesti noin 586 GW. Kolmen viime vuoden perusteella kasvun perusteella voidaan olettaa kapasiteetin

kasvavan noin 100 GW vuonna 2020. (IRENA 2020). Tämän perusteella voidaan huomata taulukosta 5, että LUT-skenaarion arvion olevan selkeästi liian suuri, kun taas VTT-skenaariossa kapasiteetti on selkeästi arvioitu liian pieneksi. Vuonna 2010, josta VTT-skenaarion mallinnus alkaa, aurinkosähkön kapasiteetti oli 42 GW ja kapasiteetin kasvunopeus oli huomattavasti pienempää kuin nykyään (IRENA 2020). Skenaariossa on ilmeisesti oletettu aurinkosähkön kasvun olevan huomattavasti hitaampaa 2010-luvulla, mitä se todellisuudessa on ollut.

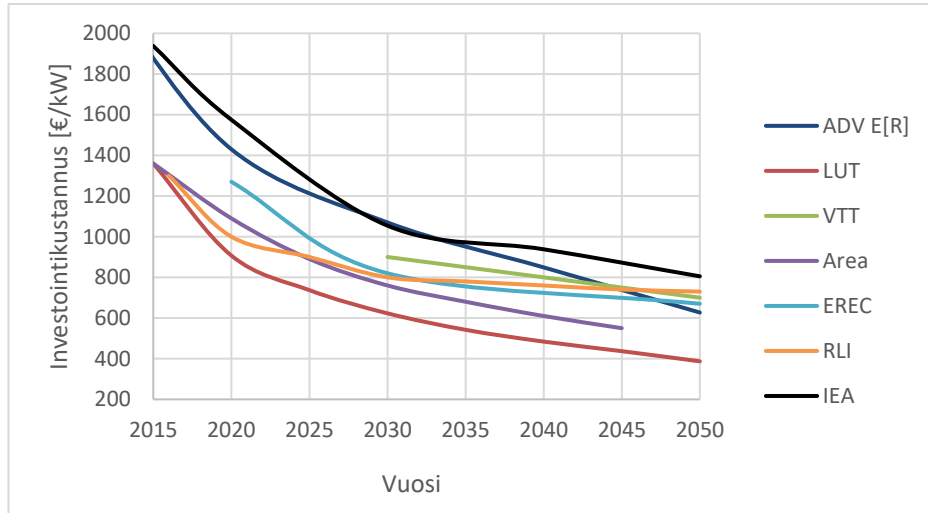
Taulukko 5 *Aurinkoenergian tuotantokapasiteetit eri skenaarioissa vuosina 2020, koottu useammasta lähteestä (Teske et al. 2015, Ram et al. 2019, Pursiheimo et al. 2018, Child et al. 2019, Zervos et al. 2010, Pleßmann & Blechinger 2017).*

Skenaario	2020 [GW]	Ero vuoteen 2019 [GW]
ADV E[R]	770 (180)	180 (40)
LUT	1 060 (210)	470 (70)
VTT	150	-440
Area	280	140
EREC	165	24
RLI	95	-45

Euroopassa aurinkoenergian kapasiteetti kasvoi vuonna 2019 noin 19 GW ja kapasiteettia oli tällöin yhteensä noin 141 GW. Aikaisemman kasvun perusteella voidaan arvioida kapasiteetin olevan noin 160 GW vuoden 2020 loppuun mennessä. (IRENA 2020) Euroopan skenaarioista ainoastaan EREC-skenaarion arvio osui suunnilleen tuohon arviointiin. Muiden skenaarioiden arviot olivat RLI-skenaariota lukuun ottamatta liian isoja. Jotta Area-skenaarion vuoden 2020 arvio toteutuisi, täytyisi kapasiteetin kasvaa vuonna 2020 yli seitsemän kertaa enemmän kuin vuonna 2019.

Eri skenaarioiden oletukset aurinkokennoteknologian investointikustannusten kehityksestä on koottu kuvaan 6. Kuten maatulivoiman kustannuksia vertailtaessa, myös tähän kuvaajaan on laitettu vertailun vuoksi myös IEA:n (2014) arvio kustannusten kehityksestä. IRENA:n (2019) arvioiden mukaan investointikustannus oli noin 1 030 €/kW vuonna 2018. Kuvan 6 perusteella LUT-skenaarion arvio on lähimpänä tätä lukua. LUT-skenaariossa investointikustannusten arvioitu olevan pienimmät koko tarkastelujakson

ajan, kun taas IEA ennustanut ne suurimmiksi. ADV E[R] -, VTT-, EREC- ja RLI-skenaarioiden arviot vuoden 2050 kustannuksista ovat suunnilleen yhtä suuret.



Kuva 6. Aurinkokennoteknologian investointikustannukset eri skenaarioissa vuosina 2015–2020, koottu useammasta lähteestä (Ram et al. 2019, Teske et al. 2015, Pursiheimo et al. 2019, Zervos et al. 2010, Pleßmann & Blechinger 2017, IEA 2014).

Sähköntuotannossa CSP:n hyödyntäminen esitellyissä skenaarioissa on vähäistä. ADV E[R] – ja EREC-skenaariot ovat oikeastaan ainoat skenaariossa, joissa sitä hyödynnetään mainittavasti. ADV E[R] -skenaariossa CSP:n osuus sähköntuotannosta on noin 21 % ja investointikustannusten arvioitiin olevan noin 4 190 €/kW vuonna 2050 (Teske et al. 2015) EREC-skenaariossa vastaavat lukemat ovat 8 % ja 2 200 €/kW. LUT-skenaariossa parabolisen peiliantennin vuoden 2050 investointikustannusten arvioitiin olevan noin 200 €/kW (Ram et al. 2019). Arvio vaikuttaa melko pieneltä ja sen perusteella voisi luulla CSP:n hyödyntämisen olevan suurempaa skenaariossa. On kuitenkin mahdollista, taulukossa on käytetty väärää yksikköä, sillä Area-skenaariossa on kustannukset ilmoitettu pinta-alaa kohden ja vuoden 2050 arvio kustannuksille on 140 €/m² (Child et al. 2019), joka on samaa suuruusluokkaa LUT-skenaarioiden lukeman kanssa.

Aurinkokennoteknologioiden käyttöikä on arvioitu RLI-skenaariossa olevan, tuulivoiman käyttöikä tavoin, 25 vuotta (Pleßmann & Blechinger 2017). LUT- ja Area-skenaarioissa käyttöikä oletetaan kasvavan 30 vuodesta 40 vuoteen tarkastelujakson aikana (Ram et al. 2019, Child et al. 2019). Wittenstein & Rothwell (2015) tekemässä tutkimuksessa on arvioitu RLI-skenaarioiden tavoin teknologian eliniän olevan 25 vuotta.

5.3 Skenaarioiden realistisuus

Monet eri asiat vaikuttavat skenaarion toteutumiseen. Vaikuttavia tekijöitä ovat muun muassa sen taloudellinen ja tekninen toteutettavuus. Skenaarion realistisuuteen vaikuttavat hyvin vahvasti siinä tehdyt oletukset esimerkiksi eri teknologioiden parametrien kehityksestä. Seuraavaksi tarkastellaan skenaarioiden realistisuuteen vaikuttavia tekijöitä.

5.3.1 Tasatut sähköntuotannon kustannukset

LCOE:ta voidaan hyödyntää sekä yksittäisten teknologioiden että kokonaisten energiasysteemien kilpailukyvyn arvioimisessa, kuten luvussa 2 kerrottiin. Yhtälön (1) mukaisesti sen suuruuteen vaikuttavia tekijöitä ovat muun muassa investointikustannukset, käyttöiät ja korkokanta. Lisäksi koko systeemin LCOE arvoon vaikuttavat eri teknologioiden osuudet sähköntuotannosta.

Korkokannalla otetaan huomioon sähköntuotannon kustannuksia laskettaessa rahan aika-arvo sekä investointiin liittyvät riskit. Korkokanta on yleensä sitä isompi, mitä isommat riskit teknologian investointiin liittyvät. (Hernández-Moro & Martínez-Duart 2013) Esitellyistä skenaarioista ainoastaan VTT-skenaariossa on kerrottu käytetty korkokanta. Siinä on käytössä 7 % korkokanta koko systeemille (Pursiheimo et al. 2019). García-Gusano et al. (2016) tekemän tutkimuksen mukaan olisi kuitenkin järkevämpää käyttää mallintamisessa jokaiselle teknologialle omaa korkokantaa, sillä jos kaikille teknologioille käyttää samaa korkokantaa, voi mallinnuksen tulos vääristyä.

Mitä pienempi LCOE on, sitä kilpailukykyisempi teknologia tai energiasysteemi on. LCOE:n arvo pienenee, kun kustannukset ja korkokanta pienenevät ja tuotantomäärä ja käyttöikä kasvavat. Aiemman teknologioiden parametrien vertailun perusteella LUT- ja Area-skenaarioissa aurinkokennoteknologian parametrit on asetettu sellaisiksi, että LCOE arvo laskee selvästi enemmän kuin muissa skenaarioissa, sillä investointikustannukset on arvioitu pienimmiksi ja käyttöiät suurimmiksi.

5.3.2 Ydinvoima

Kuten luvussa 4 kerrottiin, tässä työssä esitellyissä skenaarioissa on asetettu ydinvoiman käytöstä luopuminen vuoteen 2050 mennessä. Ydinvoimalan rakentaminen vaatii verrattain suuria investointikustannuksia (Pleißmann & Blechinger 2017), minkä takia on taloudellisesti kannattavaa antaa vanhojen voimaloiden toimia käyttöikänsä loppuun saakka, kuten työn skenaarioissa annetaankin.

Maailmalla on tällä hetkellä rakenteilla noin 55 uutta ydinvoimalaa, joista yhdeksän olisi tarkoitus aloittaa toimintansa tämän vuoden aikana (WNA 2020). Ydinvoiman käyttöikä on käytetty 40 vuotta esitellyissä skenaarioissa (Ram et al. 2019, Child et al. 2019, Pleßmann & Blechinger 2017). Joidenkin arvioiden mukaan voimaloiden elinikä voisi kuitenkin olla nykyään jopa 60 vuotta (Wittenstein & Rothwell 2015, WNA 2020). Oli sitten toteutunut käyttöikä 40 tai 60 vuotta, ei vastavalmistuneet ja rakenteilla olevat voimalat ole vielä päässeet elinikänsä loppuun vuonna 2050, johon mennessä skenaarioiden mukaan ydinvoimasta olisi luovuttu kokonaan. Täten esitellyt skenaariot lienevät tältä osin virheellisiä.

5.3.3 Muita huomioita

Uusiutuviin energialähteisiin perustuvan sähköenergiajärjestelmän luominen vaatii monilla alueilla suuria investointeja ja muutoksia sähköntuotantorakenteeseen. Alueilla, joilla tällä hetkellä tuotanto perustuu pääosin fossiilisten polttoaineiden käyttöön, investointien tarve on suuri muutoksen toteuttamiseksi. Eräs esimerkki tällaisesta maasta on Puola, jonka vuoden 2020 tavoite uusiutuvien energialähteillä tuotetun energian osuuden nostosta 15 %:iin tulee todennäköisesti epäonnistumaan (Turlej & Banaá 2018). Vaikka tavoite saavutettaisiinkin, voisi 30 vuotta olla liian lyhyt aika täysin uusiutuvan sähköenergiajärjestelmän luomiseen.

Vallitseva taloudellinen tilanne vaikuttaa merkittävästi skenaarion toteutumiseen. Siirtyminen kohti hiilineutraalia energiajärjestelmää on talouden kasvun ja ilmastomuutoksen hillitsemisen välillä tasapainoilua. Alueet voivat kohdata erilaisia talouskriisejä, joiden takia suunniteltuja hankkeita ja investointeja voidaan joutua toteuttamaan suunniteltua myöhemmin. Parhaillaan käynnissä oleva koronaviruspandemia voisi olla esimerkki tällaisesta kriisistä, joka voi vaikuttaa negatiivisesti esitettyjen skenaarioiden toteutumiseen, vaikkakin tilanteen myötä hetkellisesti kasvihuonekaasupäästöt ovatkin pienentyneet (Helm 2020).

Skenaarion realistisuuteen vaikuttaa lisäksi myös se, kuinka kokonaisvaltaisesti sen mallinnuksessa on eri asioita otettu huomioon. Esimerkiksi ADV E[R]-skenaariossa varastointiteknologiat esitellään pääpiirteissään, mutta sitä, miten niitä tarkalleen hyödynnetäisiin skenaarion mukaisessa sähköenergiajärjestelmässä, ei ole käsitelty (Teske et al. 2015). Tästä herää kysymys, onko niiden vaikutusta kokonaisinvestointeihinkaan huomioitu. Esitellyistä skenaarioista laajimmin eri osa-alueet huomioon otetaan LUT-, Area- ja RLI skenaarioissa, joissa esimerkiksi teknologioiden käyttöäkin on kiinnitetty huomiota.

6. YHTEENVETO

Tällä hetkellä vielä noin 60 % sähköstä tuotetaan fossiilisilla polttoaineilla. Ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi kuitenkin pitäisi siirtyä hyödyntämään niiden sijasta enemmän hiilineutraaleja energialähteitä sähköntuotannossa. Hiilineutraaleja energialähteitä ovat muun muassa uusiutuvat energialähteet ja ydinvoima.

Uusiutuviin energialähteisiin perustuvissa sähköntuotannon skenaarioissa sääriippuvaiset sähköntuotantotavat eli tuulivoima ja aurinkosähkö ovat suuressa roolissa. Tuulivoimassa tuulen liike-energia muutetaan voimalan turbiinin avulla sähköksi. Aurinkosähkötكنولوجياista aurinkokennoteknologia perustuu valosähköiseen ilmiöön ja CSP aurin gon säteilyenergian lämmön hyödyntämiseen. Jos näiden teknologioiden avulla tuotettaisiin tulevaisuudessa suurin osa sähköstä, ongelmaksi muodostuisi niiden tuotannon vaihteluiden kompensointi. Kompensoinnin tarve on suuri varsinkin alueilla, joilla sähkön tarve vaihtelee suuresti eri vuodenaikojen välillä. Sähköntuotannon joustavuutta voidaan parantaa esimerkiksi sähkön varastoinnilla ja siirtoyhteyksien lisäämisellä.

Työssä esiteltiin yhteensä kuusi uusiutuviin energialähteisiin perustuvaa sähköntuotannon skenaariota: kolme maailmanlaajuista ja kolme Euroopan-laajuista. Kaikille skenaarioille yhteistä oli sääriippuvaiden sähköntuotantotapojen suuret tuotanto-osuudet ja ydinvoimasta luopuminen. Eroavaisuuksia löytyi muun muassa siitä, kuinka hyvin muutokseen tarvittavat investointikustannukset tai sähköntuotannon vaihteluiden kompensointi on huomioitu.

Skenaarioiden realistisuuden arvioinnissa vertailtiin niissä tehtyjä oletuksia teknologioiden tuotantokapasiteeteista, investointikustannuksista ja käyttöistä. Oletusten tarkasteluiden lisäksi pohdittiin, minkälaisia muita haasteita skenaarioiden toteutumisella voisi olla.

Tuotantokapasiteetteja vertaillaessa huomattiin, että varsinkaan maailmanlaajuisten skenaarioiden arviot tuulivoiman ja aurinkosähkön vuoden 2020 kapasiteeteista eivät ole selkeästi osumassa oikeaan. Arviot vaikuttavat olevan pääosin liian suuriksi arvioitua, mutta VTT-skenaariossa aurinkosähkön kapasiteetti on arvioitu selkeästi liian pieneksi. Euroopan-laajuisten skenaarioiden kohdalla erot eivät olleet niin suuria. Skenaarioiden oletus ydinvoimasta luopumisesta vuoteen 2050 mennessä vaikuttaisi olevan myös virheellinen, sillä vasta valmistuneet ja rakenteilla olevat ydinvoimalat eivät ole vielä silloin päässeet käyttöikänsä loppuun.

Investointikustannusten ja käyttöikien vertailussa huomattiin, ettei kaikissa skenaarioissa ole lainkaan kerrottu mallinuksissa käytettyjä teknologioiden elinikiä ja, että LUT- ja Area-skenaarioissa tehdyt oletukset aurinkokennoteknologian parametreille olivat taloudellisemmat sekä käyttöikien että investointikustannusten osalta. Niissä esimerkiksi aurinkokennoteknologian eliniän oletettiin kasvavan 30 vuodesta 40 vuoteen, kun taas RLI-skenaariossa sen arvioitiin pysyvän 25 vuodessa. Osittain varmasti näiden oletuksen takia LUT- ja Area-skenaarioissa vuoden 2050 sähköenergiajärjestelmien sähköntuotannon kustannusten on arvioitu olevan nykyistä edullisemmat.

Taloustilanne ja varastointiteknologioiden kehitys vaikuttavat myös skenaarioiden toteuttavuuteen. Joillakin alueilla tarvittu sähköntuotantorakenteen muutos voi olla taloudellisesti mahdoton toteuttaa skenaarioiden mukaisessa aikataulussa ja mahdolliset talouskriisit voivat hidastaa muutosta entisestään. Varastointiteknologioiden kohdalla kapasiteettien lisäämistä estävät esimerkiksi niiden korkeat investointikustannukset.

Tämän työn perusteella on vaikea sanoa, mikä esitellyistä skenaarioista voisi olla realistisin. Niiden toteutumiseen liittyy useita eri epävarmuustekijöitä ja 30 vuodessa ehtii tapahtua monia yllättäviä käännteitä. Lopulta vasta tulevaisuus sen näyttää, millainen sähköenergiajärjestelmä vuonna 2050 on.

LÄHTEET

Allen, M.R., de Coninck, H., Dube, O.P., Hoegh-Guldberg, O., Jacob, D., Jiang, K., Revi, A., Rogelj, J., Roy, J. & Shindell, D. (2018). Technical summary. In: “Global warming of 1.5° C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5° C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty”. Intergovernmental Panel on Climate Change. pp. 27–46.

Almer, C. & Winkler, R. (2017). Analyzing the effectiveness of international environmental policies: The case of the Kyoto Protocol. *Journal of Environmental Economics and Management*. Vol. 82, pp. 125–151.

Archer, M. D. & Green, M. A. (2015). *Clean electricity from photovoltaics*. Second edition. London: Imperial College Press. 677 p.

Boudellal, M. (2018). *Power-to-gas: renewable hydrogen economy*. Berlin: De Gruyter. 212 p.

Breeze, P. (2019). *Power generation technologies*. Third edition. Oxford: Newnes. 462 p.

Child, M., Kemfert, C., Bogdanov, D. & Breyer, C. (2019). Flexible electricity generation, grid exchange and storage for the transition to a 100% renewable energy system in Europe. *Renewable Energy*. Vol. 139, pp. 80–101.

Clack, T.M., Qvist, S.A., Apt, J., Bazilian, M., Brandt, A.R., Caldeira, K., Davis, S., Diakov, V., Handschy, M.A., Hines, P.H.D., Jaramillo, P., Kammen, D.M., Long, J.C.S., Morgan, M.G., Reed, A., Sivaram, V., Sweeney, J., Tynan, G.R., Victor, D.G., Weyant, J.P. & Whitacre, J.F. (2017). Evaluation of a proposal for reliable low-cost grid power with 100% wind, water, and solar. *Proceeding of the National Academy of Sciences of the United States of America*. Vol. 114, pp. 6722–6727.

de Jong, P., Kiperstok, A. & Torres, E.A. (2015). Economic and environmental analysis of electricity generation technologies in Brazil. *Renewable & sustainable energy reviews*. Vol. 52, pp. 725–739.

Deason, W. (2018). Comparison of 100% renewable energy system scenarios with a focus on flexibility and cost. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 82, pp. 3168–3178

Díaz-González, F., Sumper, A. & Gomis-Bellmunt, O. (2016). *Energy storage in power systems*. England: John Wiley & Sons Ltd. 289 p.

Ferreira, H.L., Garde, R., Fulli, G., Kling, W. & Lopes, J.P. (2013). Characterisation of electrical energy storage technologies. *Energy (Oxford)*. Vol. 53, pp. 288–298.

Gallo, A.B., Simões-Moreira, J.R., Costa, H.K.M., Santos, M.M. & Moutinho dos Santos, E. (2016). Energy storage in the energy transition context: A technology review. *Renewable & sustainable energy reviews*. Vol. 65, pp. 800–822.

García-Gusano, D., Espegren, K., Lind, A. & Kirkengen, M. (2016). *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. Vol. 59, pp. 56–72

Greene, L.A. (2000). United nations framework convention on climate change. *Environmental Health Perspectives*. Vol. 108, p. 353.

Guerrero-Lemus, R. & Martínez-Duart, J. M. (2013). *Renewable Energies and CO₂ Renewable Energies and CO₂: Cost Analysis, Environmental Impacts and Technological Trends – 2012 Edition*. London: Springer London. 380 p.

Hansen, K., Breyer, C. & Lund, H. (2019). Status and perspectives on 100% renewable energy systems. *Energy*. Vol. 175, pp. 471–480.

Helm, D. (2020). The Environmental Impacts of the Coronavirus. *Environmental & resource economics*. Vol. 76, pp. 21–38.

Hernández-Moro, J. & Martínez-Duart, J.M. (2013). Analytical model for solar PV and CSP electricity costs: Present LCOE values and their future evolution. *Renewable & sustainable energy reviews*. Vol. 20, pp. 119–132.

IEA (2013). *Technology Roadmap – Wind energy* Energy 2013 edition. Paris: OECD Publishing. 58 p.

IEA (2014). *Technology Roadmap – Solar Photovoltaic Energy* 2014 edition. Paris: OECD Publishing. 55 p.

IEA (2019). *Electricity Information 2019*. Paris: OECD Publishing. 695 p.

- IRENA. (2019). *Renewable Power Generation Costs in 2018*. Abu Dhabi: IRENA. 85 p.
- IRENA. (2020). *Renewable capacity statistics 2020*. Abu Dhabi: IRENA. 48 p.
- Jacobson, M.Z., Delucchi, M.A., Cameron, M.A. & Frew B.A. (2015) Low-cost solution to the grid reliability problem with 100% penetration of intermittent wind, water, and solar for all purposes. *Proceeding of the National Academy of Sciences of the United States of America*. Vol. 112, pp. 15060–15065.
- Liobikienė, G. & Butkus, M. (2017) The European Union possibilities to achieve targets of Europe 2020 and Paris agreement climate policy. *Renewable Energy*. Vol. 106, pp. 298–309.
- Mathez, E.A. & Smerdon, J.E. (2018). *Climate change: the science of global warming and our energy future*. Second edition. New York: Columbia University Press. 487 p.
- Melhem, Z. (2013). *Electricity transmission, distribution and storage systems*. Philadelphia: Woodhead Pub. 512 p.
- Messenger, R.A. & Ventre, J. (2010). *Photovoltaic systems engineering*. Third edition. Florida: CRC Press. 464 p.
- Pinteală, G. (2018). UNITED NATIONS ORGANIZATION. *Quaestus*. No. 13, pp. 101–105.
- Pleißmann, G. & Blechinger, P. (2017). How to meet EU GHG emission reduction targets? A model based decarbonization pathway for Europe's electricity supply system until 2050. *Energy Strategy Reviews*. Vol. 15, pp. 19–32.
- Pursiheimo, E., Holttinen, H. & Koljonen, T. (2019). Inter-sectoral effects of high renewable energy share in global energy system. *Renewable Energy*. Vol. 136, p. 1119–1129.
- Ram, M., Bogdanov, D., Aghahosseini, A., Gulagi, A., Oyewo, A.S., Child, M., Caldera, U., Sadovskaia, K., Farfan, J., Barbosa LSNS., Fasihi, M., Khalili, S., Dalheimer, B., Gruber, G., Traber, T., De Caluwe, F., Fell, H.-J. & Breyer, C. (2019). *Global Energy System based on 100% Renewable Energy – Power, Heat, Transport and Desalination-Sectors*. Lappeenranta, Berlin: Lappeenranta University of Technology and Energy Watch Group. 299 p.
- Romero, M. & González-Aguilar, J. (2014). Solar thermal CSP technology. *Wiley interdisciplinary reviews. Energy and environment*. Vol. 3, pp. 42–59.

- Schulze, P., Holstein, J., van den Noort, A. & Knijp, J. (2017). Power-to-gas in a decarbonized European energy system based on renewable energy sources. *European Power to Gas*. 27 p.
- Teske, S., Sawyer, S. & Schäfer, O. (2015). *Energy [R]evolution – a suitable world energy outlook 2015*. Amsterdam: Greenpeace. 367 p.
- Tiwari, G.N., Tiwari, A. & Shyam. (2016). *Handbook of Solar Energy Theory, Analysis and Applications*. Singapore: Springer Singapore. 764 p.
- Tong, W. (2010). *Wind power generation and wind turbine design*. Southampton: WIT. 714 p.
- Turlej T. & Banaá M. (2018). RENEWABLE ENERGY IN POLAND. *International Multi-disciplinary Scientific GeoConference SGEM*. Vol. 18, pp. 713–720.
- Wittenstein, M. & Rothwell, G. (2015). *Projected Costs of Generating Electricity – 2015 edition*. Paris: International Energy Agency, Nuclear Energy Agency . 211 p.
- WNA (World Nuclear Association) (2020). *Plans For New Reactors Worldwide [Verkkoa-ineisto]*. [Viitattu 11.8.2020]. Saatavilla: <https://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/plans-for-new-reactors-worldwide.aspx>.
- Zervos, A., Lins, C. & Muth, J. (2010). *RE-thinking 2050 – A 100% Renewable Energy Vision for European Union*. Brussels: EREC. 74 p.