

Riina Alho

TUULIVOIMALLA JA AURINKOENERGIALLA TUOTETUN SÄHKÖN YMPÄRISTÖVAIKU- TUKSET

Kandidaatintyö
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Tarkastaja: Heidi Kalliojärvi
Kesäkuu 2024

TIIVISTELMÄ

Riina Alho: Tuulivoimalla ja aurinkoenergialla tuotetun sähkön ympäristövaikutukset
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Sähkötekniikka
Kesäkuu 2024

Tuulivoimalla ja aurinkoenergialla tuotetun sähkön osuus kokonaistuotannosta kasvaa jatkuvasti. Sähköntuotannossa Suomessa vuonna 2023 aurinkoenergia kasvattikin kapasiteettiaan eniten ja tuulivoima oli toiseksi suurin uusiutuvan energian tuotantomuodoista heti vesivoiman jälkeen. Koska tuulivoima ja aurinkoenergia ovat vähäpäästöisiä tapoja tuottaa sähköä, ovat ne tärkeässä roolissa yhteiskunnan tähdätessä täysin hiilineutraaliin sähköntuotantoon. Hiilineutraaliutta kohti mennään hitaasti, sillä fossiilisia polttoaineita käytetään edelleen sähköntuotantoon, vaikka ne ovat eniten ympäristöä kuormittavia. Fossiilisten polttoaineiden käyttö on saatava loppumaan, ja niitä korvataan tuulivoiman ja aurinkoenergian lisäksi myös muilla uusiutuvilla energialähteillä, kuten vesivoimalla. Päästöjä sekä muita ympäristövaikutuksia kuitenkin syntyy väistämättä myös uusiutuvien energialähteiden avulla tuotetun sähkön elinkaaren aikana.

Tässä työssä selvitettiin tuulivoimalla ja aurinkoenergialla tuotetun sähkön ympäristövaikutuksia kirjallisuuteen perehtyen. Aineistoa etsiessä pyrittiin löytämään mahdollisimman uusia tieteellisiä julkaisuja, jotka kertoisivat tuoreinta tietoa liittyen tuulivoimaan ja aurinkoenergiaan sekä niillä tuotetun sähkön ympäristövaikutuksiin.

Sekä tuulivoiman että aurinkoenergian osalta perehdyttiin sähköntuotantoteknologiaan, voimaloiden elinkaareen, hiilijalanjälkeen ja muihin ympäristövaikutuksiin sekä hieman sähköntuotannon historiaan. Elinkaaritarkasteluun kuului molempien voimaloiden osalta suunnittelu ja rakennus, käyttö ja huolto sekä purku. Ympäristövaikutuksia pohdittiin ihmisten ja eläinten sekä muun ympäristön, kuten kasvillisuuden näkökulmasta.

Sekä tuuli- että aurinkovoimaloita tarkasteltiin tällä hetkellä suosituimman teknologian näkökulmasta. Tuulivoimaloista tällä hetkellä suosituin on vaak-akselinen ja kolmilapainen voimala, kun taas aurinkovoimaloissa suosituin teknologia on valosähköilmiöön perustuva, jossa aurinkokennojen valmistusmateriaalina on yksikiteinen pii.

Tuulivoimalan elinkaari on noin 20–25 vuotta, mutta vaihtamalla kuluvia osia säännöllisesti, saadaan elinkaari pidennettyä jopa 35 vuoteen. Vastaavasti yhden aurinkopaneelin keskimääräinen elinkaari on noin 30 vuotta. Tuulivoimaa voidaan rakentaa maalle ja merelle, ja yleensä sähköä tuotetaan sähköverkkoon. Aurinkosähköä taas hyödynnetään nykyään paljon pientuotantona esimerkiksi omakotitalojen ja kauppojen katoilla, mutta myös teollisen mittakaavan tuotanto eli aurinkopuistot, joissa sähköä tuotetaan sähköverkkoon, on lisääntynyt.

Molempien työssä käsiteltyjen sähköntuotantomuotojen osalta ympäristövaikutukset ovat suurimmat voimalan lähialueen eläimistöön, maaperään ja kasvillisuuteen. Tuulivoiman osalta lisäksi vaikutuksia kokevat ihmiset, jotka voivat kokea tuulivoimalan melun ja ulkonäön häiritseväksi. Negatiivisten vaikutusten lisäksi ympäristövaikutukset voivat myös olla positiivisia, esimerkiksi voimalat voivat tarjota uudenlaista suojaa tietyille eläinlajeille. Tuulivoiman hiilijalanjälki on noin 11–12 g CO₂ekv./kWh, kun taas aurinkoenergialla tuotetun sähkön hiilijalanjälki on noin 52–53 g CO₂ekv./kWh.

Avainsanat: tuulivoima, aurinkoenergia, hiilijalanjälki, ympäristövaikutukset, uusiutuvat energialähteet

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. UUSIUTUVAN ENERGIAN TUOTANTO.....	3
2.1 Tuulivoima	3
2.2 Aurinkoenergia	5
3. ELINKAAREN TARKASTELU	8
3.1 Tuulivoimala	8
3.1.1 Tuulivoimalan suunnittelu ja rakentaminen.....	8
3.1.2 Tuulivoimalan käyttö- ja huoltotyöt	9
3.1.3 Tuulivoimalan purku.....	10
3.2 Aurinkovoimala	11
3.2.1 Aurinkovoimalan rakentaminen	11
3.2.2 Aurinkovoimalan käyttö- ja huoltotyöt.....	12
3.2.3 Aurinkovoimalan purku.....	13
4. MUUT YMPÄRISTÖVAIKUTUKSET	14
4.1 Hiilijalanjälki	14
4.2 Vaikutukset ihmisiin ja eläimiin	15
4.3 Vaikutukset muuhun ympäristöön	16
5. YHTEENVETO.....	18
LÄHTEET	20

1. JOHDANTO

Maailman koko ajan kasvava energiantuotanto on tullut haastetuksi pahenevan ilmastonmuutoksen ja luonnonvarojen ehtymisen myötä. Uusiutumattomista energialähteistä, kuten fossiilisista polttoaineista ja ydinvoimasta, ensin mainittu on yksi suurimmista ongelmista ilmastonmuutoksessa. Kasvava tietoisuus ilmastonmuutoksen syistä on johtanut pyrkimykseen päästä eroon fossiilisista polttoaineista energiantuotannossa ja siivittänyt uusiutuvan energiantuotannon kehitystä. Uusiutuvat energialähteet, kuten tuuli- ja vesivoima sekä aurinkoenergia, tarjoavat mahdollisuuden vähäpäästöisempään ja ympäristöä enemmän säästävään energiantuotantoon. Vuonna 2028 tuotetun sähkön oletetaan olevan 42 % uusiutuvilla energialähteillä tuotettua, josta 25 prosenttiyksikköä on tuulivoimalla ja aurinkoenergialla tuotettua [1].

Ajatus täysin päästöttömästä energian tuotannosta ei kuitenkaan ole vielä mahdollinen, sillä esimerkiksi tuotannon rakentaminen vaatii vielä päästöjä tuottavaa toimintaa. Päästötön energiantuotanto vaatiikin vielä paljon teknologista kehitystä ja investointeja niin rakentamisen, ylläpidon kuin purkamisen osalta. Tuulivoiman hiilidioksidipäästöt ovat pienimpiä kaikista energiantuotantomuodoista. Aurinkoenergialla tuotetun sähkön hiilidioksidipäästöt verrattuna fossiilisiin polttoaineisiin ovat pienet, mutta vaatii vielä teknologista kehitystä, jotta se voisi haastaa tuulivoiman päästöjen tasolla. [2]

Tuulivoiman ja aurinkoenergian käytön ympäristövaikutukset sähköntuotannossa riippuvat monista tekijöistä ja vaikuttavia tekijöitä ovat esimerkiksi voimaloiden sijainti, koko ja niissä käytetyt materiaalit. Energiantuotannon vaikutuksia ympäristöön voidaan tarkastella monesta eri näkökulmasta, kuten luonnon monimuotoisuuden, eläinten ja ihmisten näkökulmista. Usein käydäänkin keskustelua esimerkiksi siitä, millaista meluhaittaa tuulivoimaloista aiheutuu tai miten voimaloiden takia joudutaan karsimaan metsää.

Tässä työssä tarkastellaan tuulivoimalla ja aurinkoenergialla tuotetun sähkön ympäristövaikutuksia. Ensimmäisenä perehdytään uusiutuvan energiantuotannon osaluista tarkemmin tuulivoimaan ja aurinkoenergiaan. Seuraavaksi tarkastellaan tuulivoimaloiden ja aurinkovoimaloiden elinkaarta niiden rakentamis-, käyttö- ja huolto- sekä purkuvaiheen osalta. Elinkaaritarkastelusta jatketaan tuulivoimalla ja

aurinkoenergialla tuotetun sähkön ympäristövaikutusten tarkasteluun hiilijalanjäljen sekä ihmisten, eläinten ja ympäröivän luonnon kannalta.

2. UUSIUTUVAN ENERGIAN TUOTANTO

Tässä luvussa käsitellään sähkön tuotantoa tuulivoiman ja aurinkoenergian avulla. Tuulivoima ja aurinkoenergia ovat uusiutuvia energialähteitä, joiden kasvihuonekaasupäästöt ovat fossiilisiin polttoaineisiin verrattuna pienemmät. Tuulivoiman ja aurinkoenergian lisäksi uusiutuvia energialähteitä on esimerkiksi vesivoima. Uusiutuvan energian tuotannosta ja sen lisäämisestä saatavia hyötyjä ovat energian tuotantovarmuuden kasvaminen, energian omavaraisuuden ja työllisyyden lisääntyminen sekä alan teknologian kehittyminen [3].

2.1 Tuulivoima

Tuulivoimaa on hyödynnetty jo reilu tuhat vuotta sitten esimerkiksi merillä purjehtimiseen, viljan jauhamiseen ja veden pumppaamiseen. Ensimmäisen sähköä tuottavan tuuliturbiinin kehitti James Blyth vuonna 1887, mutta vasta viime vuosikymmenten aikana tuulivoimasta on tullut sähköntuotannossa yksi eniten kehittyvistä ja suosituimmista. [4]

Tuulta voidaan hyödyntää ilman huolta sen loppumisesta. Tuulta syntyy auringon lämmittäessä maapalloa epätasaisesti, jolloin lämpötila- ja ilmanpaine-erot saavat aikaan näitä eroja tasaavia ilmavirtauksia eli tuulta [5]. Tuulivoimalan pääkomponentteja ovat torni, perustukset, roottori eli lavat ja napa sekä konehuone. Turbiini kääntyy automaattisesti tuulen suuntaan, jotta tuotanto saataisiin suuremmaksi. Tuulen osuessa tuulivoimalan lapoihin ne alkavat pyöriä. Hidaskäyntinen akseli alkaa pyöriä lapojen pyörimisnopeudella. Useimmissa turbiineissa on vaihteisto, jonka avulla pyörimisnopeus muutetaan generaattorille sopivaksi moninkertaistamalla hidaskäyntisen akselin pyörimisnopeus yli 100-kertaiseksi suurnopeusakseliin. Tämä kaikki on yhdistetty generaattoriin. Generaattorissa pyörimisestä aiheutunut liike-energia muutetaan sähköksi. Tuotettu sähkö on vaihtosähköä. Muuntajalla muunnetaan sähkö sopivaan muotoon jännitteen ja taajuuden osalta, ja lopulta sähkö johdetaan sähköverkkoon. [[6], [7]]

Tuulivoimaa voidaan rakentaa niin maalle kuin merelle. Merellä tuulisuus on suurempaa, jolloin myös sähköntuotanto on suurempaa. Voimalan sähköntuoton määrä riippuu monesta asiasta, päätekijöitä ovat tuulen nopeus, lapojen pyyhkäisyypinta-ala ja ilmantiheys [7]. Voimala tulee sijoittaa mahdollisimman tuuliselle paikalle ja koska tuulen nopeus vaikuttaa tuotetun sähkön määrään, on tunnettava alueen tuuliolosuhteet ja sen perusteella tarkoin mietittävä, millä korkeudella maan- tai merenpinnasta voimalan lavat sijaitsevat

[8]. Tuulipuistossa täytyy ottaa huomioon yksittäisten turbiinien väliset etäisyydet, jotta turbiinien lavat eivät osu toisiinsa tai aiheuta muuta haittaa toiminnalle.

Tuulisuuden ollessa 10–15 m/s voimala saavuttaa nimellistehonsa, mutta tuotantoa on myös tuulen nopeudella 3–25 m/s. Tuulisuuden noustessa liian korkeaksi, yli 25 m/s, voimala pysäyttää itsensä, jotta vältettäisiin suuremmat laitteiden rikkoutumiset. [8] Tuulienergiaa varastoimalla saadaan taattua se, että tuulettomina ajanhetkinäkin saadaan hyödynnettyä tuulivoimaa. Varastointitekologioita ovat esimerkiksi akut ja korkeaenergiset superkondensaattorit. [7]

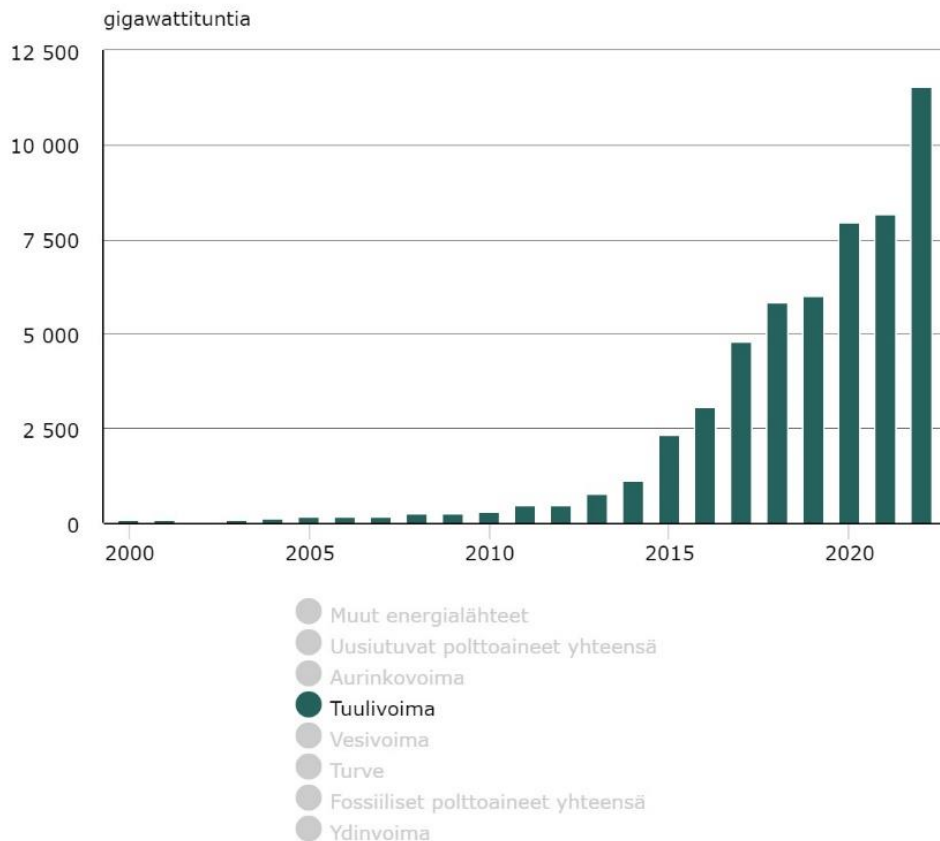
Kun sähköä tuotetaan pientuotantona, on yksittäiset tuulivoimalat yhdistetty suoraan sähkökäyttöpaikkaan eikä sähköverkkoa tarvitse vahvistaa. Sen sijaan tuulipuistoissa, jossa tuulivoimaloita on useampi samalla alueella, sähköä tuotetaan sähköverkkoon ja verkkoa täytyy vahvistaa. [9]

Tuulivoimaloita on monia eri kokoisia ja muotoisia. Akseli voi olla pysty- tai vaakasuuntainen ja lapojen määrä vaihtelee. Nykyään suosituin tapa on rakentaa vaaka-akselisia voimaloita, joissa on kolme lapaa [7]. Tuulivoimalan osat ovat kehittyneet huomasti vuosien saatossa. Vielä 40 vuotta sitten roottorin halkaisija oli keskimäärin 15 metriä, kun taas nykyään halkaisijat ovat 150 metrin luokkaa. Samoin napakorkeus on kasvanut 20 metristä 150–175 metriä korkeisiin voimaloihin. [10]

Voimalan osien kokojen kasvaminen on johtanut hyötysuhteen ja tuottavuuden kasvuun. Nykyisin rakennettavat tuulivoimalat ovat yleisimmin teholtaan 4–6 MW, mutta suurimmat saatavilla olevat maa- ja merituulivoimalat ovat teholtaan 8–12 MW [[6], [7]]. Tuulipuistojen tehot ovat 10 MW:sta satoihin MW:hin. Verrattaessa maa- ja merituulivoimaa, tuottaa merellä oleva yksittäinen turbiini yleensä enemmän sähköä kuin maalla sijaitseva turbiini.

Suomen sähköntuotannossa tuulivoima on viime vuosina kasvattanut rooliaan merkittävästi, ja vuonna 2023 tuulivoima olikin uusiutuvista energialähteistä yksi suurimmista tuotantotavoista. Sähköä käytettiin noin 80 TWh verran ja siitä 18,2 % eli noin 14,5 TWh oli tuotettu tuulivoimalla. Uusiutuvista energialähteistä vain vesivoiman osuus oli suurempi tuotannon ollessa 18,8 % kokonaisenergiasta. [11] Kuvassa 1 on esitetty tuulivoimalla tuotetun sähkön kehitys Suomessa vuosien 2000 ja 2022 välillä.

Sähkön tuotanto energialähteen mukaan 2000-2022



Kuva 1. Tuulivoimalla tuotetun sähkön kehitys [12]

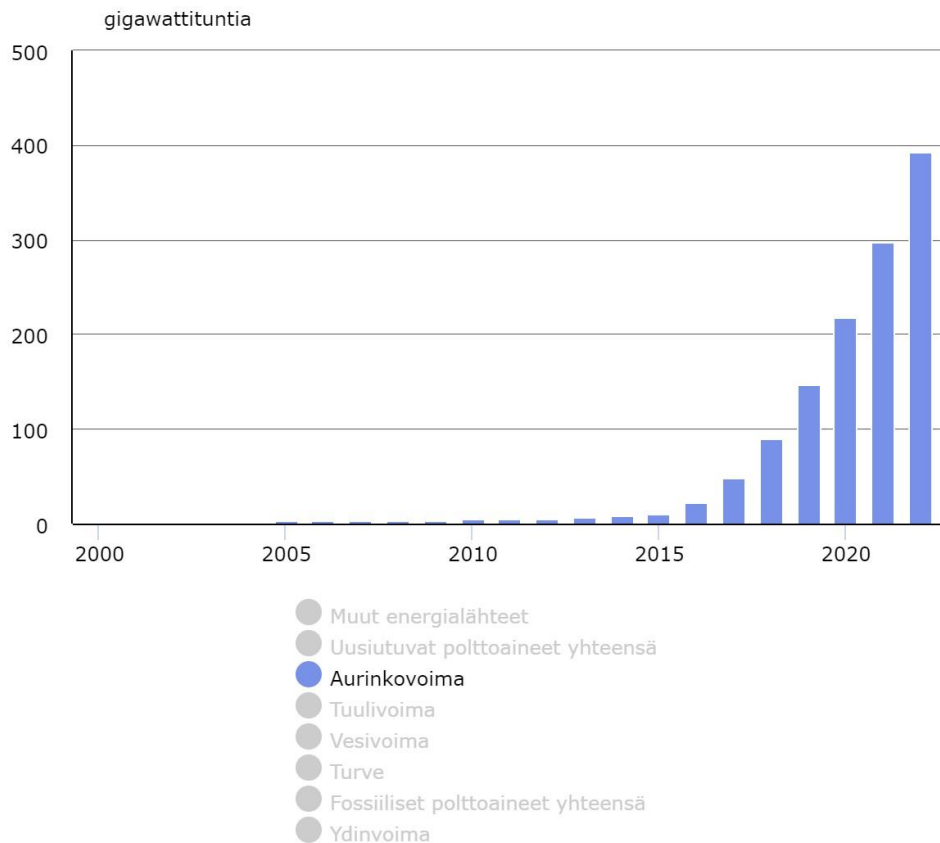
2.2 Aurinkoenergia

Aurinkoenergian avulla sähköä on tuotettu jo 1950-luvulla satelliiteissa ja avaruusluotaimissa. Nykyään sitä hyödynnetään monissa paikoissa, kuten kotien sähkötuotannossa, ulkovaloissa ja veden pumppauksessa. [13] Yleisesti aurinkosähköä pidetään tuulivoiman tapaan vähäpäästöisenä sähköntuotantomuotona, mutta päästöjä kuitenkin syntyy muun muassa rakennusprosesseissa. Aurinkovoimalan takaisinmaksuaika on lyhyt, vain noin 0,5–1,5 vuotta riippuen asennuksen tyypistä ja paikasta. [14]

Maapallolle tulevan Auringon säteilyenergia on noin 170 000 TW, josta noin puolet saavuttaa maanpinnan. Auringon maanpinnalle tulevan säteilyn sisältämä energiamäärä riittäisi muutamassa tunnissa kattamaan koko maapallon vuoden energiantarpeen. [15] Kuitenkaan nykyteknologialla hyödyksi saatava Auringon säteilyn määrä on pieni. Suomessa vuonna 2023 noin 0,8 % sähköstä tuotettiin aurinkoenergialla eli noin 80 TWh:n kokonaistuotannosta se oli noin 0,64 TWh [11]. Aurinkoenergia kasvattaa osuuttaan säh-

köntuotannossa vauhdilla, sillä 2/3 uusiutuvan energian kapasiteetin lisäyksistä on aurinkosähköä [16]. Kuvasta 2 voidaan tarkastella sähköntuotannon kehitystä Suomessa vuosien 2000 ja 2022 välillä aurinkosähkön osalta.

Sähkön tuotanto energialähteen mukaan 2000-2022



Kuva 2. Aurinkoenergialla tuotetun sähkön kehitys [12]

Aurinkosähköä tuotetaan aurinkokennoilla. Aurinkokennoja kytketään sarjaan noin 40–70 kappaletta, jolloin niistä muodostuu aurinkopaneeleita. Paneelit voidaan kytkeä sarjaan tai rinnan riippuen halutusta jännitteestä ja tehosta. [14] Aurinkopaneeleita voi yhdessä järjestelmässä olla muutamista paneeleista miljooniin. Aurinkopaneelien elinikä voi olla yli 30 vuotta. Aurinkovoimala koostuu paneeleista sekä erilaisista oheislaitteista, kuten vaihtosuuntaajasta eli invertteristä, katkaisijoista ja sähkön varastointiin tarkoitettuista akuista. [17]

Aurinkokennoja voidaan valmistaa monista eri materiaaleista. Valmistusmateriaalia valittaessa täytyy ottaa huomioon paneelin sijoitusalueella vallitsevat olosuhteet. Eri materiaaleilla valmistettujen kennojen hyötysuhteet vaihtelevat, minkä takia jotkin valmistusmateriaaleista ovat suositumpia kuin toiset. Kiteinen pii, ja erityisesti yksikiteinen pii, on

yleisin valmistusmateriaali. [18] Muita valmistusmateriaaleja ovat esimerkiksi galliumarsenidi (GaAs) ja kadmiumtelluridi (CdTe) [17].

Kennon toiminta perustuu valosähköilmiöön, jossa valo muutetaan puolijohdemateriaalien pn-liitoksen avulla sähköksi. P-tyypin puolijohdeosassa on aukko varauksenkuljettajana ja n-tyypissä elektroni. Auringonsäteilyn sisältämät fotonit vapauttavat puolijohdemateriaalista elektroneja johtavuusvyölle ja syntyneitä aukkoja valenssivyölle. Varauksenkuljettajat eli elektronit ja aukot liikkuvat sähkökentän vaikutuksesta kennon vastakkaisille pinnoille. Yhdistämällä nämä pinnat ulkoisen kuorman kanssa saadaan aikaan tasasähköä. [19] Tuotettu sähkö voidaan hyödyntää suoraan tasasähköä hyödyntävissä laitteissa. Tasasähkö voidaan myös muuttaa vaihtosähköksi invertterin avulla käytettäväksi vaihtosähköä hyödyntäviin laitteisiin. Aina kun tuotettu sähkö halutaan tuottaa sähköverkkoon, se on muutettava vaihtosähköksi. Jos tuotettua sähköä ei hyödynnetä heti sen tuottamisen jälkeen, on se viisasta varastoida. Varastointi tapahtuu esimerkiksi akkujen avulla.

Aurinkoenergialla tuotettavan sähkön lisääntymisen voi parhaiten havaita rakennusten katoille sijoitettujen aurinkopaneelien määrän kasvusta viime vuosikymmenen aikana. Paneeleita voi sijoittaa myös esimerkiksi maanpinnalle. Paneelien määrän kasvuun on vaikuttanut ensisijaisesti se, että aurinkosähköjärjestelmien hinnat ovat laskeneet. Hintojen laskemiseen on vaikuttanut teknologian kehittyminen [20], joka jatkuu vilkkaana tulevaisuudessakin.

Aurinkosähköä voidaan tuottaa omaan tarpeeseen tai sitä voidaan tuottaa sähköverkkoon. Kun aurinkosähköä tuotetaan omaan tarpeeseen eli esimerkiksi kauppojen, teollisuuslaitosten tai omakotitalojen tarpeeseen, kutsutaan sitä pientuotannoksi. Pientuotannon avulla lisätään energiaomavaraisuutta ja vähennetään verkosta otettavan sähkömäärää. Pientuotantona aurinkosähköä voidaan myös käyttää helposti paikoissa, joissa ei ole välttämättä ollenkaan yhteyttä sähköverkkoon eikä sähköntarve ole huomattavan suuri. Tällaisia kohteita ovat esimerkiksi kesämökit ja erämaakohteet. Teollisen mittakaavan tuotannossa aurinkosähköä tuotetaan suurissa keskitetyissä aurinkopuistoissa. Näin tuotettu sähkö johdetaan yleensä sähköverkkoon, sillä tuotetun sähkömäärä on huomattavasti suurempi kuin pientuotannossa. [21]

3. ELINKAAREN TARKASTELU

3.1 Tuulivoimala

Tuulivoiman elinkaarta tarkastellaan suunnittelu- ja rakennusvaiheen, käyttö- ja huoltovaiheen sekä purkamisvaiheen näkökulmista. Kaikissa vaiheissa täytyy ottaa huomioon turvallisuus sekä ympäristönäkökulmat. Ympäristönäkökulmia käsitellään tarkemmin luvussa 4. Yksittäisen tuuliturbiinin elinkaari on noin 20–25 vuotta, mutta vaihtamalla komponentteja ajoissa uusiin saadaan turbiini kestäväksi jopa 35 vuotta [22].

3.1.1 Tuulivoimalan suunnittelu ja rakentaminen

Tuulivoimahankkeeseen tarvitaan aloite, joka voi tulla esimerkiksi maanomistajilta, energiayhtiöltä tai paikallisilta yrittäjiltä. Hankkeessa on monia vaiheita ennen kuin itse rakentaminen voi alkaa. Hanke aloitetaan esiselvityksellä ja sopivan alueen etsimisellä. Hankkeesta täytyy neuvotella eri tahojen kanssa, jotka liittyvät hankkeen sijoitusalueeseen. Näitä tahoja ovat kunta, maanomistaja ja verkonhaltija. Puolustusvoimilta pitää pyytää lausunto, ja ELY-keskukselta päätös, sovelletaanko kyseisessä hankkeessa ympäristövaikutusten arviointimenettelyä (YVA). Alueella pitää suorittaa tuulimittaukset ja alue pitää kaavoittaa tuulivoimakäyttöön. Hankkeeseen kuuluu myös aikataulutusta, erilaisten lupien hakeminen, verkkoliityntäsopimuksen teko, rahoitussuunnittelu ja hankkeesta tiedottaminen. Vakuutus-, takuu- ja huoltoasiat on myös mietittävä etukäteen. Hankkeen saattaminen alusta loppuun vie useamman vuoden. [23]

Suunnittelun jälkeen aloitetaan rakentaminen. Rakentamisen lähtökohtana on maanrakennustyöt sekä komponenttien valmistus, kuljetus ja asennus. Maanrakennustöihin kuuluu voimala-alueen rakentaminen ja sähköaseman ja kaapeleiden asennus.

Voimalan komponenttien kuljetus vaatii ammattitaitoiset henkilöt, jotta vältetään ylimääräisiltä komponenttien korjaus- tai huoltotöiltä. Kuljetukset tapahtuvat erikoiskuljetuksina yleensä meriteitse ja maanteitse. Kuljetuskalusto toimii fossiililla polttoaineella, joten päästöttömyyteen ei kuljetuksen osalta ole vielä päästy. Koska tornit ovat kokonaisuudessaan yleensä yli 150 metriä korkeita ja todella painavia, on ne tuotava paikalle osissa. Suomessa sijaitsevien tuulivoimaloiden lavat ovat vuonna 2019 olleet pisimmillään noin 75 metriä [24] ja ne kuljetetaan voimala-alueelle kokonaisina. Lapojen kuljetukselle tulee tällöin pituutta melkein 100 metriä.

Maatuulivoimalan rakennustyöt alkavat rakentamispaikan kasvillisuuden raivaamisella ja mahdollisen tuulivoimalalle vievän tien raivaamisella, hoitamisella tai vahvistamisella. Maatuulivoimalan pystytys alkaa perustusten valamisesta. Betonista valmistettujen perustusten päälle kootaan ensin torni. Tuulivoimalan torni on valmistettu yleensä teräksestä tai teräksestä ja betonista. Koska tavoitellaan mahdollisimman korkeaa tornia, on torni koottava paikan päällä useasta osasta. Tällä varmistetaan myös se, että torni saadaan kuljetettua mahdollisimman helposti paikalle. Tornin päälle nostetaan konehuone yleensä kokonaisuutena. Konehuoneen runko on terästä ja sitä ympäröivä sekä suojaava kerros lasikuitua. Roottori voidaan koota valmiiksi ennen nostamista kiinni konehuoneeseen tai se voidaan koota lapa kerrallaan korkeuksissa. Lavat ovat yleisimmin materiaailtaan komposiittia, mutta lasikuitu sekä hiilikuitu tai puu yhdessä epoksin tai polyesterin kanssa ovat myös käytettäviä materiaaleja. [[24], [25]] Tuulivoimalat yhdistetään tuulipuiston sähköaseman kautta sähköverkkoon. Tarkasteltaessa tuulivoimalan elinkaaren aikana syntyneitä kasvihuonekaasupäästöjä huomataan, että suurimmat päästöt aiheutuvat voimalan komponenttien valmistuksesta [26].

Merituulivoimalan rakentaminen on haastavaa vallitsevien meriolosuhteiden ja voimalan koon ja painon takia. Voimalan perustukset voivat olla joko kelluvia tai merenpohjassa. Perustusten päälle kootaan muut voimalan osat kuten maavoimaloissa. [27] Koska merellä on välillä jäätävät olosuhteet, pitää mahdolliset jääkuormat ottaa huomioon voimalan komponentteja suunniteltaessa. Merellä olevien tuulivoimaloiden välillä kulkee sähkökaapeliverkko ja yksi pidempi merikaapeli tuulipuistolta rantaan. Kun tuulipuisto on suuri ja kaukana rannasta, pitää merelle rakentaa lisäksi sähköasema tai useampi.

3.1.2 Tuulivoimalan käyttö- ja huoltotyöt

Tuulivoiman käyttötyöt tarkoittavat toimintaa, joka johtaa sähkön tuotantoon tuulivoimalassa. Nykypäivänä suurin osa toiminnasta on automatisoitua, joten konkreettista ihmisen tekemää käyttötyötä on vain vähän. Käyttötyöhön kuuluu myös valvonta, jota tehdään erilaisten suurten vaurioiden ehkäisemiseksi.

Käytönvalvonnan kautta voidaan havaita erilaisia huoltotarpeita. Käytönvalvontaa tehdään vuorokauden ympäri, jotta mahdolliset viat huomataan ajoissa. Vikatilanteen sattuessa verkosta irrotettu voimala pyritään mahdollisimman nopeasti saamaan takaisin kiinni sähköverkkoon. Huoltoja tehdään suunnitelmallisesti ja ennakoivasti, jolloin tietyt kuluvat komponentit vaihdetaan uusiin niiden iän perusteella. Tämä perustuu voimalalle tehtyyn huoltostrategiaan, joka on tehty jo hankesuunnittelun aikana [28]. Teknologian

kehittyessä on myös alettu käyttää droneja kunnontarkastuksissa, mikä lisää turvallisuutta ja tehokkuutta [29].

Tuulivoimalan huoltotöitä saa tehdä vain siihen ajantasaisen koulutuksen saaneet, sillä huoltotyöt ovat erikoisosaamista vaativia. Ajantasaisiin koulutuksiin kuuluu koulutukset esimerkiksi voimalan huollosta, korkealla työskentelystä ja ensiavusta. [28]

Tuulivoimalan käyttötyöt ovat koko elinkaaren vähiten päästöjä tuottava vaihe. Fossiilisten polttoaineiden käytöstä ei kuitenkaan päästä tässäkään vaiheessa kokonaan eroon, sillä henkilöstön ja varaosien kuljettaminen tuulivoimalan alueelle tapahtuu useimmiten polttomootoreilla varustetulla kuljetuskalustolla. Myös tuulivoimalan toiminnan vaatimat öljyt ja muut voiteluaineet ovat yleisimmin fossiiliperäisiä. [26]

3.1.3 Tuulivoimalan purku

Tuulivoimalan purkaminen tehdään käänteisessä järjestyksessä rakentamiseen verrattuna. Purkamisen ohella tavoitteena on minimoida jätteen syntyminen. Koko tuulivoimalasta noin 85–90 % voidaan kierrättää [22]. Vaikeimmin kierrätettäviä komponentteja ovat komposiitista valmistetut komponentit, kuten lavat [30]. Koska tuulivoimaa rakennetaan kasvavissa määrin lisää, lisääntyy myös tulevaisuudessa purettavien voimaloiden määrä ja sitä kautta kierrätettävän jätteen määrä. Tämän takia on pyrittävä vielä parempaan kierrätysasteeseen. Tuulivoimalan purkaminen voi aiheuttaa syntyvän jätteen lisäksi erilaisia ympäristöllisiä vaikutuksia, kuten häiritsevää ääntä, maaperän häiriintymistä ja lisääntyviä kasvihuonekaasupäästöjä [30].

Tuulivoimalasta puretut osat on mahdollista prosessoida kolmella eri tavalla. Ensimmäinen tapa on uudelleenkäyttö, jossa jokin osa voidaan hyödyntää johonkin muuhun tarkoitukseen kuin tuulivoiman tuottamiseen. Toinen tapa on erotella eri materiaalit ja prosessoida ne siten, että materiaalia voi käyttää jonkin uuden tuotteen valmistuksessa. Uusi tuote voi olla tuulivoimalan osa tai johonkin muuhun tarkoitukseen oleva osa. Kolmas ja viimeinen tapa on komponentin loppusijoitus, jossa komponentti viedään kaatopaikalle, poltetaan tai jätetään paikoilleen maan sisään. [30]

Koska puretun tuulivoimalan alueella on jo valmiiksi rakennetut tiet, yhteys sähköverkkoon ja tiedot alueen tuulisuudesta, on mahdollista, että puretun voimalan paikalle rakennetaan uusi voimala. Usein tällaisen korvaavan turbiinin teho ja koko on suurempi kuin vanhan. Jos alueelle ei rakenneta uutta voimalaa, on huolehdittava alueen kunnostamisesta mahdollisimman lähelle sitä, mitä se oli ennen voimalan rakentamista. Kunnostamiseen liittyy esimerkiksi maanrakennusta ja kasvillisuuden istutusta. [30]

3.2 Aurinkovoimala

Tämän kappaleen alaluvuissa käsitellään piistä valmistettujen paneelien muodostaman aurinkovoimalan elinkaarta. Aurinkovoimalan elinkaareen kuuluu raaka-aineiden louhinta, jalostaminen ja kuljetus, osien kuljetus aurinkovoimala-alueelle, asennus, käyttö- ja huoltotyöt sekä lopuksi purkaminen ja kierrätys. Aurinkovoimalan toiminta ei tarvitse fossiilisia polttoaineita, mutta voimalan komponenttien valmistus vaatii. Paneelien valmistuksessa syntyy eniten hiilidioksidipäästöjä. [17] Uusilla materiaaleilla, rakenteilla ja sovelluksilla on mahdollista vähentää aurinkosähkön koko elinkaaren aikana syntyneitä negatiivisia ympäristövaikutuksia. Nämä kehityskohteet auttavat vähentämään jätettä, energian käyttöä, negatiivisia vaikutuksia ihmisten terveyteen ja ympäristön saastumista. [31]

3.2.1 Aurinkovoimalan rakentaminen

Kun aurinkovoimalaa aletaan suunnitella, pitää olla selvillä, millaiselle alueelle ja kuinka iso voimala halutaan rakentaa. Jos kohteessa on jo valmiiksi verkkoliittymä, on järkevintä kytkeä aurinkosähkölaitteita verkkoon. Tällöin aurinkosähköä voidaan hyödyntää samoissa laitteissa kuin verkkosähköäkin. Kun verkkoliittymää ei ole, tehdään yleensä kannattavuuslaskelmat verkkoon liittymisestä tai liittymättömyydestä. Kohteen ollessa maantieteellisesti kaukana sähköverkosta voi liittyminen tulla kalliiksi siihen nähden, kuinka paljon sähköä käyttöpaikassa kulutettaisiin. [32]

Ennen paneelin asennusta tulee olla mietittynä paneelin ilmansuunta, kallistuskulma, varjostusten mahdollisuus sekä se, onko kiinteä vai aurinkoa seuraava asennus parempi. Myös paneelien oma paino sekä tuuli- ja lumikuorma on otettava huomioon [14] ja varmistuttava, että paneelin tausta on hyvin tuulettuva. Jos paneeli ei pääse tuulettumaan, lämpenee paneeli liikaa, ja sitä kautta hyötysuhde laskee. [33] Nämä edellä mainitut tekijät vaikuttavat siihen, kuinka paljon sähköä saadaan tuotettua niin päivä- kuin vuositasollakin. Paneelit kannattaakin siis sijoittaa mahdollisimman aurinkoiselle paikalle.

Paneelin yksittäiset sarjakytkenät liitetään kytkentärasiaan, joka sisältää esimerkiksi ohitusdiodeja, ylijännitesuojia ja sensoreita, jotka suojaavat paneelia. Kytkentärasia liitetään sähköverkkoon liitetyissä kohteissa invertteriin ja liittämättömissä kohteissa latausohjaimen tai akkuun. [14] Invertteri kytketään turvakytken kautta sähköpääkeskukseen ja siitä sähkömittarin kautta mahdolliseen sähköverkkoon [34]. Kun asennus

tehdään rakennuksen katolle, käytetään telineitä, jotta paneelien kallistuskulma ja ilman-suunta saadaan halutuiksi. Isommat aurinkosähköjärjestelmät asennetaan yleensä maahan, jolloin pitää kiinnittää enemmän huomiota varjostuksiin, kuin katolle asennettaessa.

Kun aurinkovoimalaa rakennetaan maahan, aiheutuu siitä erilaisia haittoja. Maata joudutaan mahdollisesti muokkaamaan, jotta saadaan voimala tukevasti maahan ja oikeaan asentoon. Myös alueen kasvillisuutta saatetaan joutua poistamaan ja rakentamaan voimalalle johtava tie. Nämä voivat johtaa maaperän ja veden laadun heikkenemiseen. Alueella voi esiintyä eroosiota sekä vesivirtaukset voivat saastua, pohjavedet vähentyä ja tulvien riski kasvaa. Voimalan rakentaminen vaatii riippuen rakentamispaikasta myös vettä pölynsitomiseen. [35]

3.2.2 Aurinkovoimalan käyttö- ja huoltotyöt

Aurinkovoimala ei vaadi huomattavia käyttötoimenpiteitä, sillä se toimii itsenäisesti. Riittävän tarkka toiminnan seuranta ja valvonta auttavat saavuttamaan mahdollisimman pitkän toimintaiän voimalalle. Tarkalla seurannalla ja valvonnalla mahdolliset viat ja muut ongelmat huomataan ja korjataan nopeammin, eivätkä voimalan osat näin ollen ehdi rikkoutua kokonaan. Nykypäivänä voimaloiden toiminnan tarkastelu on helppoa, sillä seuranta- ja valvontajärjestelmät ovat automatisoituja. Kun voimalan infrastruktuurista ja laitteista pidetään hyvää huolta, on seurauksena voimalan käyttöiän pidentyminen minimaalisella arvonalaskulla ja vaurioilla [36].

Huonot käyttö- ja huoltotavat johtavat myös ympäristön kuormittumiseen, sillä mahdolliset käyttö- ja huoltotöiden laiminlyönnit voivat johtaa voimalan osien rikkoutumiseen. Pahimmassa tilanteessa on ostettava paljon uusia osia tai kokonaan uusi voimala. Jotta tällaiset tilanteet vältettäisiin, on hyvä tehdä yleisiä ja tarkempia tarkastuksia läpi voimalan käyttöiän.

Yleisillä tarkastuksilla tarkastetaan helposti nähtäviä asioita, kuten katolle asennetun voimalan telineiden kunto, maahan asennetun voimalan alapuolisen maan mahdollinen eroosio, kaapeleiden kiinnitykset ja siisteys voimalan alueella [36]. On myös hyvä seurata voimalan yleistä toimintaa mahdollisella puhelin- tai muulla sovelluksella. Paneelit likaantuvat helposti ilmassa olevan pölyn, puunlehtien ja muun takia, joten paneelit on puhdistettava niiden parhaan toiminnan mahdollistamiseksi. Puhdistus on tehtävä mahdollisimman hyvälaatuisella vedellä tai puhdistusaineilla, käyttäen hyvää ja pehmeää harjaa [36].

Tarkempiin tarkastuksiin kuuluu esimerkiksi invertterin ja muuntajan toiminnan testaaminen kokeilla, suojalaitteiden toiminnan testaaminen ja voimalan turvallisuuden varmistaminen ulkopuolisille, käyttäjille sekä eläimille [36]. Mahdollisten akkujen kunto ja veden poistumistiet on myös syytä tarkistaa.

3.2.3 Aurinkovoimalan purku

Aurinkovoimalan osat voivat tulla elinkaarensa päähän monesta eri syystä. Ne voivat rikkoutua esimerkiksi kuljetuksen tai asennuksen aikana, sään takia tai iän puolesta. Rikkoutuneet osat täytyy vaihtaa uusiin. Osia voidaan vaihtaa myös esimerkiksi niiden takuuajan päätyttyä tai siksi, että markkinoille on tullut uusi, parempi teknologia. Joissakin tilanteissa tai maissa osien kierrätysprosessi vaatii enemmän rahaa kuin suoraan kaatopaikalle vieminen. [31] Näin ollen raha on esteenä kestävän kierrättämisen onnistumiselle. Koska asennetun aurinkosähkön tuotantokapasiteetti kasvaa vauhdilla, kasvaa myös tulevaisuudessa käyttöiän lopussa olevien paneelien määrä. Tämän takia on kehitettävä kierrätys- ja materiaalien talteenottotapoja. [20]

Aurinkopaneelien kierrätystasoa on kolme. Näitä ovat fyysinen, lämpö- ja kemikaalinen kierrätys. Fyysinen kierrätys tarkoittaa sitä, että paneelit puretaan poistamalla niin paneelin kehys kuin kytkentärasiat ja kaapelitkin. Purkamisen jälkeen yksittäiset osat murskataan ja tutkitaan myrkyllisyyden varalta, jotta ne voidaan kierrättää oikein. Kehyksen kuntoa voidaan parantaa sekondaarimetallurgialla ja näin ollen käyttää kehys uudelleen. Myös esimerkiksi lasi ja alumiini voidaan käyttää uudelleen. Lämpö- ja kemikaalikierrätyksessä paneelin pii otetaan talteen lämmön avulla ja puhdistetaan erilaisten kemikaalien avulla. Talteenotettu pii voidaan käyttää uudestaan uuden aurinkopaneelin valmistuksessa. [20]

Kierrätysysteemit eivät kuitenkaan ole kaikki luontoa säästäviä. Kemikaalisessa kierrätyksessä kemikaalit ovat ihmisen terveydelle haitallisia ja osa kemikaaleista aiheuttaa vaarallisia päästöjä. Myös lämpökäsittely aiheuttaa päästöjä. [20]

4. MUUT YMPÄRISTÖVAIKUTUKSET

Tuuli- ja aurinkoenergian ympäristövaikutuksia arvioidaan seuraavaksi hiilijalanjäljen avulla sekä konkreettisten ympäristövaikutusten osalta. Ympäristövaikutuksia arvioidaan lisäksi jo aiemmin tuulivoiman kohdalla mainitulla YVA-menettelyllä, jota voidaan myös käyttää aurinkovoimalahankkeeseen, jos sen arvioidaan aiheuttavan merkittäviä ympäristövaikutuksia tai se ylittää laissa määritellyt rajoitteet [37].

4.1 Hiilijalanjälki

Hiilijalanjäljen avulla kuvataan ilmastokuormaa, joka aiheutuu jostakin tietystä toiminnasta. Tällaista toimintaa voi olla esimerkiksi erilaiset palvelut, tuotteet ja investoinnit. Ilmastokuorma tarkoittaa kasvihuonekaasupäästöjä, jotka vapautuvat ilmakehään ja lämmittävät sitä. Kasvihuonekaasuja ovat esimerkiksi hiilidioksidi (CO₂), dityppioksidi (N₂O) ja metaani (CH₄). Hiilijalanjälki määritetään yleensä elinkaaren ajalta, jolloin otetaan huomioon kaikki välilliset ja välittömät päästöt. Jotta hiilijalanjäljessä saadaan huomioitua erilaiset ilmastoja lämmittävät vaikutukset, ilmoitetaan se hiilidioksidiekvivalenttina. Hiilijalanjäljen määrittämiseen käytetään päästökertoimia, jotka kuvaavat syntyvien päästöjen määrää suhteessa tuotetun tuotteen tai palvelun määrään. [38] Sähköntuotannossa päästökerroin on ilmoitettu usein muodossa g CO₂ekv./kWh.

Sähkön tuottaminen tuulivoimalla mielletään usein päästöttömäksi, sillä sähköä tuottavat tuuliturbiinit eivät itsessään tuota päästöjä. Kuitenkin, kun otetaan huomioon koko sähkön tuotantoketju, kasvihuonekaasupäästöjä ja muuta haittaa ympäristölle syntyy. Tuulivoiman elinkaaren kasvihuonekaasupäästöt maa- ja merivoimalan osalta eroavat hieman. Maavoimalan kasvihuonekaasupäästöjen mediaani on noin 11 g CO₂ekv./kWh vaihteluvälillä 7–56 g CO₂ekv./kWh. Merivoimalan päästöjen mediaani taas on 12 g CO₂ekv./kWh vaihteluvälillä 8–35 g CO₂ekv./kWh. [39] Itse voimalan osat aiheuttavat noin 90 % kaikista elinkaaren aikana aiheutuvista kasvihuonekaasupäästöistä [40]. Vertailun vuoksi mainittakoon, että kivihieillä tuotetun energian kasvihuonekaasupäästöt voivat olla jopa 1000 g CO₂ekv./kWh [2].

Kun tarkastellaan aurinkosähkön tuottamista koko voimalan elinkaaren ajalta, ovat Euroopan alueella kasvihuonekaasupäästöt noin 37 g CO₂ekv./kWh sekä maa- että kattovoimalan tapauksessa. Globaali keskiarvo maavoimalalle on noin 52 g CO₂ekv./kWh ja kattovoimalalle 53 g CO₂ekv./kWh. [40] Vaihteluväli on laajimmillaan 18–180 g CO₂ekv./kWh koskien suuria aurinkovoimaloita ja 26–60 g CO₂ekv./kWh kattovoimaloilla

[39]. Noin puolet piistä valmistetun paneelin kasvihuonekaasupäästöistä aiheutuu piin tuottamisesta. Loput vaikutukset suurimmasta pienempään liittyvät paneelin kokoonpanoon, kennojen valmistukseen, voimalan rakentamiseen, inverttereihin, sähköverkkoon liittämiseen, käyttöön sekä huoltoon, käytöstä poistoon ja maaperustuksiin. [40]

4.2 Vaikutukset ihmisiin ja eläimiin

Tuulivoiman rakentaminen herättää usein keskustelua alueen asukkaissa. Esimerkiksi Huittisten Taraskalliolle rakennettavan tuulipuiston suunnittelu alkoi jo vuonna 2015, mutta ensimmäinen suunnitelma kariutui kuntalaisten vastustukseen. Vastustuksen seurauksena rakennettavien voimaloiden määrää vähennettiin, korkeuksia madallettiin ja sijainnit suunniteltiin uudestaan. [41]

Koska tuulivoimalat ovat isoja ja korkeita, voivat ne aiheuttaa alueen asukkaille visuaalista ja äänellistä haittaa. Esimerkiksi auringon paistaessa pyörivät tuuliturbiinin lavat aiheuttavat liikkuvia varjoja, jotka lähellä asuvat ihmiset voivat kokea häiritseväksi välkynnäksi. Pyörivä turbiini aiheuttaa myös äänihaittaa. Ääntä syntyy lapojen halkoessa ilmaa ja mekaanisten osien, kuten generaattorin ja vaihteiston toiminnasta. [33] Noin 350 metriä tuulivoimalasta kuultava ääni vastaa jääkaapin käymisääntä [42]. Melurasitusta pyritään vähentämään suunnittelemalla voimala aerodynaamisemmaksi ja äänieristämällä konehuone.

Esimerkiksi aiemmin mainitun Taraskallion tuulipuistohankkeen suunnittelussa on otettu huomioon alueella elävien liito-oravien sekä lintujen lisääntymis- ja levähdysalueet [41]. Lintujen osalta suurimmat vaikutukset ovatkin törmäysriski sekä muidenkin eläinlajien osalta elinympäristön muutos. Merituulivoiman rakentaminen aiheuttaa haittaa meren eläimille. Esimerkiksi kalojen ja hylkeiden ravinnon hankinta sekä lisääntyminen voivat häiriintyä merituulivoimalan rakentamisen seurauksena. Rakentamisella voi myös olla positiivisia vaikutuksia meren eläimille ja kasveille tarjoamalla uusia suojapaikkoja. [43]

Elinympäristön pirstoutuminen ja heikkeneminen aurinkovoimalan rakentamisen myötä vaikuttaa alueen biodiversiteettiin ja jotkut eläinlajit voivat hävitä jopa kokonaan. Toisaalta myös muuttuneen ympäristön takia uusia eläinlajeja voi muuttaa alueelle. Erityisesti lintujen kuolleisuus nousee alueelle rakennetun aurinkovoimalan takia, sillä linnut voivat törmätä voimalan rakenteisiin ja kuolla. [33] Nämä vaikutukset pätevät myös tuulivoimalan kohdalla.

Aurinkovoimalat ovat hiljaisia eivätkä ne liiku, joten ne eivät aiheuta merkittävää äänellistä tai visuaalista haittaa ympäristölleen. Ainoastaan rakennus- ja purkuvaiheessa melua voi syntyä lähinnä voimalaan liittyvästä työmaaliikenteestä, eikä melu ole jatkuvaa.

Työmaaliikenne yhdessä maanmuokkauksen sekä muun maa-aineksen käsittelyn kanssa voi toisaalta aiheuttaa erilaisia ilmanlaatuvaikutuksia synnyttämällä hetkellisiä pölypäästöjä.

Muita vaikutuksia sekä tuuli- että aurinkovoimaloista aiheutuu välillisesti. Esimerkiksi työmaaliikenne vähentää liikenneturvallisuutta ja tulipaloriski kasvaa mahdollisten sähkövarastojen myötä. Onnettomuustilanteessa työkoneiden polttoaineet ja öljyt voivat joutua maaperään sekä alueen pohja- ja pintavesiin, jolloin ne saastuvat.

Positiivisia vaikutuksia verrattuna uusiutumattomiin energialähteisiin sekä tuuli- että aurinkoenergialla ovat esimerkiksi vedenkulutuksen pieneneminen sekä jo aiemmin mainitut päästöjen vähentäminen ja työllisyyden kasvu. Myös sähkön hintojen lasku on yksi positiivisista vaikutuksista.

4.3 Vaikutukset muuhun ympäristöön

Tuulivoimala vaatii tilaa ja siksi maankäytön on oltava mahdollisimman tehokasta. Riippuen tuulivoimalan rakennuspaikasta voi olla tarpeellista poistaa puustoa. Voimala-alueen rakentaminen, mukaan lukien perustusten kaivaminen paikoilleen, teiden rakentaminen ja kasvillisuuden raivaaminen vaikuttavat ympäröivään luontoon. Rakennustyömaan hukkavesi sekä erilaiset öljyt voivat imeytyä maaperään ja aiheuttaa ympäristöongelmia [42], mutta näiden osuus muutenkin pienistä ympäristövaikutuksista on olematon. Myös esimerkiksi kasvillisuuden poisto voi vaikuttaa säähän muuttamalla sateita ja sitä kautta aiheuttaa maaperän eroosiota [42].

Tuulivoimalat aiheuttavat sähkömagneettisia kenttiä, jotka voivat häiritä radio- ja televisioyhteyksiä. Koska tuulivoiman tuotanto vaihtelee vallitsevien sääolosuhteiden mukaan, voi myös sähköverkon toiminta häiriintyä. Tätä tuotantovaihtelua tasataan säätövoimalla. [44]

Suuren kokoluokan aurinkovoimalat rakennetaan yleensä paikkaan, joka vaatii maanmuokkaamista. Maanmuokkaus vaikuttaa ympäröivään kasvillisuuteen, luontoon ja elinympäristöön negatiivisesti. Tietyllä alueella elävät kasvit voivat ympäristön muokkauksen takia hävitä jopa kokonaan. Vaikutukset kasvillisuuteen aurinkovoimala-alueella ovat yleensä paikallisia ja alueen ympäröivä luonto säilyy ennallaan. Aurinkovoimalan elinkaaren päättyessä alueen tyypillinen lajisto ei kuitenkaan välttämättä palaudu täysin ennalleen. Tämä johtuu alueelle tehdyistä maanmuokkauksista, jolloin maaperän ominaisuudet sekä pinta- ja pohjavedet ovat mahdollisesti muuttuneet.

Aurinkovoimala varjostaa maata, mikä johtaa ympäristön kykyyn heijastaa auringonvaloa, jolloin paikalliset lämpötilat ja sademäärät muuttuvat. Tämä aiheuttaa tuulen nopeuden ja haihtuvan veden kokonaismäärän muutosta. Muutosten voimakkuus riippuu alueesta ja aurinkovoimalan koosta. [33] Metsäiselle alueelle voimalan rakentaminen ei aiheuta suuria muutoksia varjoisuuden osalta.

Sekä tuuli- että aurinkovoimalan tapauksessa voimala-alueen maa voi olla alun perin esimerkiksi metsäteollisuuden tai maatalouden käytössä. Tällöin voimalan rakentaminen vie tilaa näiltä elinkeinoilta. Kun voimala tulee käyttöikänsä päähän ja se puretaan, voidaan maata taas käyttää sen alkuperäiseen tarkoitukseen.

5. YHTEENVETO

Tässä työssä käsiteltiin tuulivoimalla ja aurinkoenergialla tuotetun sähkön aiheuttamia ympäristövaikutuksia. Työ tehtiin kirjallisuuteen perehtymällä. Sekä tuulivoima että aurinkoenergia ovat uusiutuvan energian lähteitä, mikä tarkoittaa sitä, etteivät ne lopu kesken, vaikka niiden kulutus olisikin suurta. Näillä uusiutuvan energian lähteillä korvataan perinteisiä fossiilisia polttoaineita, jotka kuormittavat ympäristöämme liikaa.

Tarkastelun kohteena olivat nykymarkkinoilla olevat suosituimmat teknologiat. Tuulivoiman osalta tämä tarkoittaa vaaka-akselista voimalatyyppiä, jossa on kolme lapaa. Tuulivoimalan osat ovat kehittyneet teknologian kehittyessä vuosien saatossa kymmenistä metreistä yli sataan metriin, jonka seurauksena myös hyötysuhde on kasvanut. Aurinkovoimaloiden suosituin teknologia tällä hetkellä on valosähköilmiöön perustuva, valmistusmateriaalinaan yksikiteinen pii, mutta kehitystyötä muiden teknologioiden parissa tapahtuu koko ajan. Aurinkovoimaloiden määrän kasvuun on vaikuttanut teknologian kehittyminen, jonka seurauksena voimaloiden hinnat ovat laskeneet.

Sekä tuuli- että aurinkovoimalan elinkaaret vastaavat toisiaan pääpiirteiltään. Elinkaari alkaa hankkeen suunnittelulla, josta edetään rakentamisvaiheeseen. Kun voimala on saatu rakennettua, voidaan aloittaa sen käyttö. Käyttötöiminnan ohella tarvitaan huoltotöitä, jotta voimala saadaan kestävästi pidempään. Kun voimala on tullut elinkaarensa päähän syystä tai toisesta, pitää se purkaa ja kierrättää. Yleensä voimaloiden osat pyritään kierrättämään uudelleen käytettäväksi, mutta vielä nykypäivänä kierrätyksen ollessa kallista osia päätyy kaatopaikalle. Elinkaaren aikana suurimmat negatiiviset ympäristövaikutukset aiheutuvat voimalan rakentamisesta. Tuulivoimalan elinkaari on noin 20–25 vuotta ja aurinkovoimalan paneelien noin 30 vuotta.

Ympäristövaikutuksia voidaan arvioida hiilijalanjäljen avulla. Mitä pienempi hiilijalanjälki, sitä pienemmät kasvihuonekaasupäästöt. Fossiilisilla polttoaineilla on suurin hiilijalanjälki, jopa 1000 g CO₂ekv./kWh, kun taas tuulivoiman vastaava luku on 11–12 g CO₂ekv./kWh ja aurinkoenergian 52–53 g CO₂ekv./kWh. Tuulivoiman osalta luku sisältää sekä maa- että merivoimalan ja aurinkoenergian luku on globaali keskiarvo maavoimalalle sekä kattovoimalalle.

Ympäristövaikutuksia voidaan havaita myös konkreettisesti. Sekä tuulivoiman että aurinkoenergian vaikutukset ulottuvat yleensä vain voimalan läheisyyteen. Suurimmat vaikutukset koskettavat sekä ihmisiä että eläimiä, mutta lisäksi myös kasvillisuutta ja maaperää. Voimaloiden rakentamisen seurauksena eläinten asuinympäristöt muuttuvat, josta

voi olla sekä haittaa että myös hyötyä riippuen eläinlajista. Tuulivoiman osalta suurimmat konkreettiset vaikutukset ympäristöön ovat visuaalinen sekä voimalan toiminnasta syntyvästä melusta aiheutuva haitta lähistöllä asuville. Tällaista haittaa ei yleensä koeta aurinkovoimalan tapauksessa.

Tulevaisuudessa molempien tässä työssä käsiteltyjen uusiutuvien energialähteiden osuus sähköntuotannossa kasvaa suhteessa fossiilisiin polttoaineisiin. Teknologioiden on kuitenkin vielä kehityttävä, jotta saavutetaan täysin hiilineutraali sähköntuotanto. Tämä vaatii innovaatioita, tutkimusta ja kehitystä.

LÄHTEET

- [1] Renewables 2023, IEA, 2024, pp.15. Saatavissa (viitattu 5.2.2024): <https://www.iea.org/reports/renewables-2023>. Lisenssi: CC BY 4.0
- [2] Tuulivoiman ilmastovaikutukset, Suomen Tuulivoimayhdistys ry, 2023, päivitetty 31.5.2023. Saatavissa (viitattu 5.2.2024): https://tuulivoimayhdistys.fi/media/2023_ilmastovaikutukset_interact.pdf
- [3] Uusiutuva energia Suomessa, Työ- ja elinkeinoministeriö, n.d. Saatavissa (viitattu 7.2.2024): <https://tem.fi/uusiutuva-energia>
- [4] P. Gipe, E. Möllerström, An overview of the history of wind turbine development: Part I—The early wind turbines until the 1960s, Wind Engineering, 2022. Saatavissa (viitattu 1.3.2024): <https://doi-org.lib-proxy.tuni.fi/10.1177/0309524X221117825>
- [5] J. Vuorela, Tiedätkö, mistä tuuli syntyy? – 10 tuulesta temmattua faktaa, Helen Oy, 2019. Saatavissa (viitattu 9.2.2024): <https://www.helen.fi/artikkelit/2019/tuuli>
- [6] Tuulivoimateknologia, Motiva Oy, 2023, päivitetty 11.4.2023. Saatavissa (viitattu 9.2.2024, 1.3.2024): <https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva-energia/tuulivoima/tuulivoima-suomessa/tuulivoimateknologia>
- [7] Wind Basics, WindEurope, n.d. Saatavissa (viitattu 23.2.2024, 1.3.2024): <https://windeurope.org/about-wind/wind-basics/>
- [8] Tuulivoimatuotannon vaihtelevuus, Suomen Tuulivoimayhdistys ry, n.d. Saatavissa (viitattu 12.2.2024): <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoimatuotanto/tuulivoimatuotannon-vaihtelevuus>
- [9] Voimalan sijoittaminen, Motiva Oy, n.d., päivitetty 27.5.2021. Saatavissa (viitattu 30.5.2024): <https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva-energia/tuulivoima/tuulivoima-suomessa/voimalan-sijoittaminen>
- [10] Tuulivoimatekniikka, Suomen tuulivoimayhdistys ry, n.d. Saatavissa (viitattu 1.3.2024): <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoimatekniikka/tuulivoimatekniikka-2>
- [11] Energiavuosi 2023 Sähkö, Energiateollisuus ry, 2024, päivitetty 30.1.2024. Saatavissa (viitattu 12.2.2024): https://energia.fi/wp-content/uploads/2024/01/Sahkovuosi-2023_paivitetty.pdf
- [12] Sähkön ja lämmön tuotanto, Tilastokeskus, 2023 (päivitetty 20.12.2023). Saatavissa (viitattu 26.4.2024): <https://stat.fi/julkaisu/cl8mo29omxf8t0dukky5aa8i1>
- [13] Aurinkosähkösovellukset muissa kuin rakennuskohteissa, Motiva Oy, n.d. (päivitetty viimeksi 31.1.2024). Saatavissa (viitattu 26.3.2024): https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva-energia/aurinkosahko/aurinkosahkojarjestelmat/aurinkosahkosovellukset_muissa_kuin_rakennuskoh-teissa

- [14] S. Valkealahti, Solar modules and systems, Tampereen yliopisto (Foundations of Solar Power), 2022. Luentomateriaali, vaatii käyttöoikeuden. Saatavissa (viitattu 22.2.2024): https://moodle.tuni.fi/pluginfile.php/3966841/mod_resource/content/2/6%20Solar%20modules%20and%20systems.pdf
- [15] S. Valkealahti, Solar radiation, Tampereen yliopisto (Foundations of Solar Power), 2022. Luentomateriaali, vaatii käyttöoikeuden. Saatavissa (viitattu 17.2.2024): https://moodle.tuni.fi/pluginfile.php/3966837/mod_resource/content/2/2%20Solar%20radiation.pdf
- [16] Discover Solar, SolarPower Europe, n.d. Saatavissa (viitattu 17.2.2024): <https://www.solarpowereurope.org/about/discover-solar>
- [17] M.K.H. Rabaia, M.A. Abdelkareem, E.T. Sayed, K. Elsaid, K.-J. Chae, T. Wilberforce, A.G. Olabi, Environmental impacts of solar energy systems: A review, Science of The Total Environment, Volume 754, 2021. Saatavissa (viitattu 26.3.2024): <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969720355182>
- [18] Aurinkosähköteknologiat, Motiva Oy, n.d. (päivitetty viimeksi 31.1.2024). Saatavissa (viitattu 22.2.2024): https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/aurinkosahkojarjestelmat/aurinkosahkoteknologiat
- [19] S. Valkealahti, Solar cell basics, Tampereen yliopisto (Foundations of Solar Power), 2022. Luentomateriaali, vaatii käyttöoikeuden. Saatavissa (viitattu 22.2.2024): https://moodle.tuni.fi/pluginfile.php/3966840/mod_resource/content/2/5%20Solar%20cell%20basics.pdf
- [20] M.S Chowdhury, K.S Rahman, T. Chowdhury, N. Nuthammachot, K. Techato, M. Akhtaruzzaman, S.K. Tiong, K. Sopian, N. Amin, An overview of solar photovoltaic panels' end-of-life material recycling, Energy Strategy Reviews, Volume 27, 2020. Saatavissa (viitattu 28.3.2024): <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211467X19301245>
- [21] Aurinkovoima, Energiateollisuus ry, n.d. Saatavissa (viitattu 17.2.2024): <https://energia.fi/energiatietoa/energiantuotanto/sahkontuotanto/aurinkovoima/>
- [22] Wind energy and environment, WindEurope, n.d. Saatavissa (viitattu 9.2.2024): <https://windeurope.org/about-wind/wind-energy-and-the-environment/>
- [23] Tuulivoimahankkeen suunnittelu ja toteutus, Suomen tuulivoimayhdistys ry, n.d. Saatavissa (viitattu 1.3.2024): <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoimahanke/tuulivoimahankkeen-suunnittelu-ja-toteutus>
- [24] Tuulivoimaloiden rakenne, Suomen tuulivoimayhdistys ry, n.d. Saatavissa (viitattu 1.3.2024): <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoimatekniikka/tuulivoimaloiden-rakenne>

- [25] Tuulipuiston rakentaminen ja voimaloiden pystytys, Suomen tuulivoimayhdistys ry, n.d. Saatavissa (viitattu 1.3.2024): <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoimahanke/tuulipuiston-rakentaminen-ja-voimaloiden-pystytys>
- [26] J.K. Kaldellis, D. Apostolou, Life cycle energy and carbon footprint of off-shore wind energy. Comparison with onshore counterpart, Renewable energy, Volume 108, 2017. Saatavissa (viitattu 20.3.2024): <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148117301258>
- [27] Kysymyksiä ja vastauksia merituulivoimasta, OX2, n.d. Saatavissa (viitattu 1.3.2024): <https://www.ox2.com/fi/suomi/teknologiat-ja-palvelut/merituulivoima/kysymyksiä-ja-vastauksia-merituulivoimasta/>
- [28] Takuut ja huollot, Suomen tuulivoimayhdistys ry, n.d. Saatavissa (viitattu 21.3.2024): <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoimahanke/takuut-ja-huollot>
- [29] T. Hannuksela, Tuulivoimaloiden tarkastukset uudella tasolla: Dronet tehostavat turvallisuutta ja tehokkuutta, sisällä ja ulkona, Tuulivoima-lehti 1/2024, Suomen tuulivoimayhdistys ry, 2024. Saatavissa (viitattu 21.3.2024): <https://www.e-julkaisu.fi/sty/tuulivoima/1-2024/#pid=1>
- [30] U.S. Department of Energy, Wind Energy End-of-Service Guide, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy Wind Energy Technologies Office: WINDEXchange, 2023. Saatavissa (viitattu 21.3.2024): <https://windexchange.energy.gov/end-of-service-guide>
- [31] End-of-Life Management for Solar Photovoltaics, Solar Energy Technologies Office, n.d. Saatavissa (viitattu 27.3.2024): <https://www.energy.gov/eere/solar/end-life-management-solar-photovoltaics>
- [32] Verkkoon kytketty vai verkkoon kytkemätön järjestelmä, Motiva Oy, n.d. (päivitetty viimeksi 2.8.2022). Saatavissa (viitattu 26.3.2024): https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/hankinta_ja_asennus/verkkoon_kytetty_vai_verkkoon_kytkeaton_jarjestelma
- [33] Aurinkopaneelien asentaminen, Motiva Oy, n.d. (päivitetty viimeksi 11.1.2023). Saatavissa (viitattu 27.3.2024): https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/hankinta_ja_asennus/aurinkopaneelien_asentaminen
- [34] Verkkoon liitetty aurinkosähköjärjestelmä, Motiva Oy, n.d. (päivitetty viimeksi 31.1.2024). Saatavissa (viitattu 27.3.2024): https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/jarjestelman_valinta/tarvittava_laitteisto/verkkoon_liitetty_aurinkosahkojarjestelma
- [35] A. Dhar, M. A. Naeth, P. D. Jennings, M. G. El-Din, Perspectives on environmental impacts and a land reclamation strategy for solar and wind energy systems, Science of The Total Environment, Volume 718, 2020. Saatavissa (viitattu 4.4.2024): <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969719345930>

- [36] Smooth operation and maintenance, as easy as 1-2-3!, CleanMax, n.d. Saatavissa (viitattu 28.3.2024): <https://www.cleanmax.com/solar-update/smooth-operation-and-maintenance-as-easy-as-1-2-3.php>
- [37] Aurinkovoimarakentaminen, Ympäristöministeriö, n.d. Saatavissa (viitattu 29.4.2024): <https://ym.fi/aurinkovoimarakentaminen>
- [38] CO2-termit tutuiksi, OpenCO2net Oy, n.d. Saatavissa (viitattu 16.4.2024): <https://www.openco2.net/fi/co2-tietoa>
- [39] S. Schlömer, T. Bruckner, L. Fulton, E. Hertwich, A. McKinnon, D. Perczyk, J. Roy, R. Schaeffer, R. Sims, P. Smith, and R. Wisner, Annex III: Technology-specific cost and performance parameters. In: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2014. Saatavissa (viitattu 25.4.2024): https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_annex-iii.pdf
- [40] Carbon Neutrality in the UNECE Region: Integrated Life-cycle Assessment of Electricity Sources, UNECE, 2022. Saatavissa (viitattu 25.4.2024): https://unece.org/sites/default/files/2022-04/LCA_3_FINAL%20March%202022.pdf
- [41] L. Haavisto, Tuulivoimalahankkeen osayleiskaavaluonnos nähtäville Huitisissa – Taraskalliolle nousemassa neljä kokonaiskorkeudeltaan maksimissaan 260 metristä tuulivoimalaa, Alueviesti, 2024. Saatavissa (viitattu 10.4.2024): <https://alueviesti.fi/2024/02/24/tuulivoimalahankkeen-osayleiskaavaluonnos-nahtaville-huitisissa-taraskalliolle-nousemassa-nelja-kokonaiskorkeudeltaan-maksimissaan-260-metrissa-tuulivoimalaa/>
- [42] M. S. Nazir, N. Ali, M. Bilal, H. M. N. Iqbal, Potential environmental impacts of wind energy development: A global perspective, Current Opinion in Environmental Science & Health, Volume 13, pages 85-90, 2020. Saatavissa (viitattu 26.4.2024): <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2468584420300039>
- [43] Vedenalaiset vaikutukset, Motiva Oy, n.d. (päivitetty viimeksi 30.7.2021). Saatavissa (viitattu 15.4.2024): https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/tuulivoima/tuulivoiman_ymparisto- ja_muut_vaikutukset/vedenalaiset_vaikutukset
- [44] Tuulivoiman ympäristö- ja muut vaikutukset, Motiva Oy, n.d. (päivitetty viimeksi 29.7.2021). Saatavissa (viitattu 15.4.2024): https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/tuulivoima/tuulivoiman_ymparisto- ja_muut_vaikutukset