

Jesse Christensen

# TUULIVOIMAN HYÖDYNTÄMISEN YMPÄRISTÖVAIKUTUKSET

Kandidaatintyö  
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta  
Toukokuu 2020

# TIIVISTELMÄ

Jesse Christensen: Tuulivoiman hyödyntämisen ympäristövaikutukset  
Tampereen yliopisto  
Sähkötekniikan tutkinto-ohjelma  
Kandidaatintyö  
Toukokuu 2020

---

Tuulivoima mielletään usein käytännössä päästöttömäksi sähköntuotantomuodoksi. Voimala ei käyttövaiheensa aikana tuotakaan juuri yhtään kasvihuonekaasupäästöjä, mutta muissa elinkaaren vaiheissa, etenkin rakentamisvaiheessa, päästöjä sen sijaan syntyy. Kasvihuonepäästöjen lisäksi tuulivoiman hyödyntämiseen liittyy myös muitakin ympäristövaikutuksia. Työn tarkoituksena onkin luoda kattava yleiskuva tärkeimmistä ympäristövaikutuksista sekä pohtia niiden merkitystä. Lisäksi tuulivoiman hiilijalanjälkeä vertaillaan muihin sähköntuotantomuotoihin.

Työssä arvioitavat ympäristövaikutukset ovat elinkaaren aikaiset päästöt, harvinaisten maametallien käytön haitat, tuulivoiman vaikutukset eläimiin sekä erikseen meluvaikutusten tarkastelu ihmisille kohdistuvan haitan kannalta. Lisäksi esitellään tuotteiden tai palveluiden ympäristövaikutusten arviointiin käytettävän elinkaariarvioinnin peruseriaatteet.

Työ osoittaa, että tuulivoiman hiilijalanjälki on hyvin pieni verrattuna fossiilisiin polttoaineisiin ja jopa muihin uusiutuviin tuotantomuotoihin. Offshore-voimaloiden hiilijalanjälki on hieman onshore-voimaloita suurempi, mutta silti pienempi kuin esimerkiksi vesivoimalla ja aurinkovoimalla. Tuulivoiman lisäämisen hyödyt päästöjen vähentämisessä ovat suurimmat silloin, kun tuulivoiman lisääminen korvaa fossiilisilla polttoaineilla tuotettua energiaa. Ajasta riippuvaisena tuotantona tuulivoiman lisääminen kuitenkin kasvattaa myös säätösähkön ja energian varastoinnin tarvetta, jolla on oma päästövaikutuksensa.

Suoravetoisten tuulivoimaloiden generaattoreissa tarvittavien harvinaisten maametallien käyttöön liittyy ympäristöriskejä. Huolimattomuus harvinaisten maametallien tuotannossa voi johtaa myrkyllisten yhdisteiden vapautumisen maaperään sekä haitallisiin pienhiukkaspäästöihin. Harvinaisia maametalleja tuotetaan Kiinassa käytännössä monopolituotantona, ja kaivostoiminnan vastuullisuus on ollut kansainvälisenä huolenaiheena. Ympäristövaikutusten minimointiin on viime vuosina onneksi herätty Kiinan viranomaisten keskuudessa, mutta monia kaivosalueita on turmeltunut huolimattoman louhinnan seurauksena.

Tuulivoimalat aiheuttavat joitakin vaikutuksia tuotantoalueen eläimistöön, lähinnä lintuihin ja lepakoihin. Suurimmat vaikutukset ovat lapoihin törmäämisen aiheuttamat kuolemat sekä elinympäristön muuttuminen. Työssä kuitenkin todettiin, että tuulivoimaloihin yhdistettävät lintujen ja lepakoiden kuolemat ovat hyvin pieni osa kokonaiskuolleisuudesta ja määrältään huomattavasti pienemmät kuin esimerkiksi fossiilisia polttoaineita hyödyntävien voimalaitosten aiheuttamat kuolemat. Lisäksi offshore-voimalat voivat muuttaa vedenalaisten ekosysteemien rakennetta sekä rakennusvaiheessa aiheuttaa meluhaittoja merinisäkkäille.

Edellä mainittujen vaikutusten lisäksi tuulivoimaloiden toiminta tuottaa laajakaistaista ääntä, josta kuultavan äänen taajuusalueilla olevalla melulla on joitakin häiritsevyysoikutuksia lähialueen asukkaisiin. Työssä osoittautui, että pieni osa tuotantoalueiden lähiasukkaista kokevat tuulivoimaloiden melun häiritseväksi etenkin ulkotiloissa. Tuulivoimaloiden sijoittamisessa onkin syytä huomioida meluvaikutukset läheisillä asutusalueilla, ja melun äänenvoimakkuudesta onkin valtioneuvoston toimesta säädetty laskennalliset ohjearvot, joita ei tule ylittää. Työssä todetaan myös, että luotettavan tutkimustiedon perusteella voidaan sanoa, että tuulivoimaloiden tuottama infraääni ei aiheuta ihmisten kokemaa terveysvaikutuksia, vaan koetut oireet liittyvät suurella todennäköisyydellä nocebo-vaikutuksiin eli psykologisiin syihin.

Avainsanat: Tuulienergia, ympäristövaikutukset, hiilijalanjälki, elinkaariarviointi

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. ELINKAARIARVIOINTI .....	2
3. TUULIVOIMALAN ELINKAARI.....	4
3.1 Voimalan rakentaminen .....	5
3.2 Käyttö ja huolto .....	6
3.3 Purkaminen ja kierrätys.....	7
4. TUULIVOIMAN PÄÄSTÖT .....	9
4.1 Tuulivoiman hiilijalanjälki .....	9
4.2 Välilliset päästövaikutukset .....	12
5. HARVINAISTEN MAAMETALLIEN KÄYTTÖ .....	15
6. VAIKUTUKSET ELOLLISEEN LUONTOON .....	18
6.1 Linnusto ja lepakot .....	18
6.2 Vedenalainen luonto .....	20
7. TUULIVOIMALAN ÄÄNI JA MELU .....	21
7.1 Kuultava ääni .....	21
7.2 Infraääni.....	23
8. YHTEENVETO.....	26
LÄHTEET .....	29

# 1. JOHDANTO

Viime vuosikymmenten aikana ihmisten aiheuttaman ilmastonmuutoksen merkitys on selvinnyt niin tiedeyhteisölle kuin tavallisille ihmisillekin. Ilmastonmuutos on kiistatta yksi suurimmista lähitulevaisuuden uhista. Ilmaston lämpenemisen aiheuttaa kasvihuonekaasujen, etenkin hiilidioksidin, määrän kasvu ilmakehässä. Tämän taustalla on maailman väestön ja energiankulutuksen räjähdysmäinen kasvu. Koska globaalisti hiilidioksidipäästöistä yli 40 % aiheutuu sähkön- ja lämmöntuotannosta [1], on sähköntuotannon hiilijalanjäljen pienentäminen ahkerasti kehityksen alla. Myös fossiilisten polttoaineiden varantojen rajallisuus ajaa uusiutuvien sähköntuotantomuotojen kehittämiseen. Yksi potentiaalisimmista ratkaisuista sähköntuotannon vaatimaan murrokseen on tuulivoima.

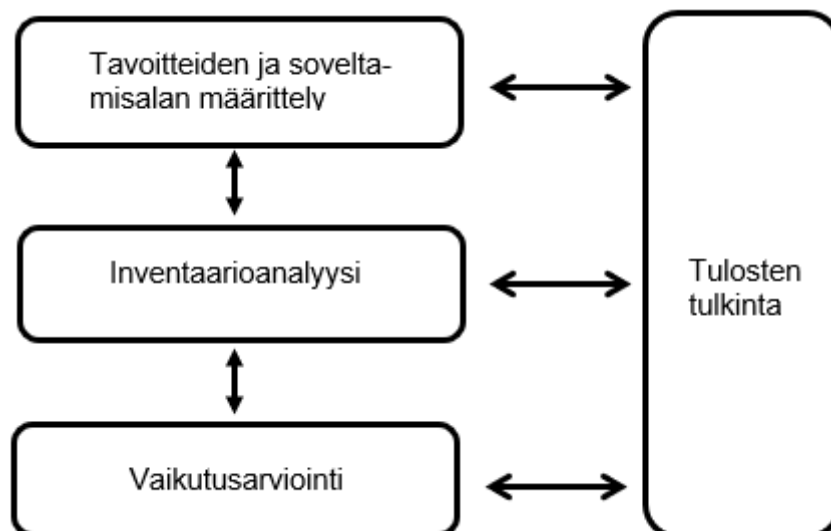
Tuulivoiman kapasiteetti on lisääntynyt viime vuosina räjähdysmäisesti ympäri maailmaa. Esimerkiksi Suomessa sen osuus omasta sähköntuotannosta oli vuonna 2018 hie- man alle 9 prosenttia, kun osuus vuonna 2010 oli vielä alle puoli prosenttia. [2,3] Tuuli- voiman kasvu on kuitenkin asettanut sen ympäristövaikutukset tiukan tarkastelun koh- teeksi. Tuulivoima mielletään yleisesti lähes päästöttömäksi tuotantomuodoksi, mikä on- kin totta sen käyttövaiheen osalta. Voimalan elinkaari sisältää kuitenkin kaikki vaiheet aina raaka-aineiden louhinnasta purkamiseen ja hävittämiseen, joista osaan liittyy pääs- töjä ja muita ympäristövaikutuksia. Myös tuulivoiman meluhaitat ja vaikutukset eläimiin ovat olleet paljon otsikoissa. Tämän kandidaatintyön tarkoituksena onkin objektiivisesti tarkastella tuulivoiman aiheuttamia ympäristövaikutuksia koko elinkaaren ajalta sekä vertailla elinkaaren kasvihuonepäästöjä muihin energiantuotantomuotoihin.

Työn alussa esitellään ympäristövaikutuksia tutkivan elinkaariarvioinnin käsite sekä sen peruseriaatteet. Luvussa kolme tarkastellaan tuulivoimalan elinkaarta ja eri vaiheiden päästölähteitä. Elinkaaren aikaisten kokonaispäästöjen suuruutta ja vertailua muihin tuo- tantomuotoihin vertaillaan luvussa neljä. Suoraan elinkaareen yhdistettävien päästöjen lisäksi luvussa arvioidaan myös välillisiä päästövaikutuksia. Luvussa viisi tutkitaan tie- tyssä voimalatyyppissä tarvittavien harvinaisten maametallien tuotannon ympäristövaiku- tuksia. Tuulivoimaloiden vaikutuksia elolliseen luontoon käsitellään luvussa kuusi. Vii- meinen asialuku käsittelee tuulivoimaloiden äänivaikutuksia niin kuultavan äänen kuin infraäänenkin osalta. Työn lopussa on vielä yhteenveto, jonka tarkoituksena on tiivistää esitellyt asiat sekä suorittaa joitakin kerrotuista tiedoista vedettäviä johtopäätöksiä.

## 2. ELINKAARIARVIOINTI

*Elinkaariarvioinnilla* (life cycle assessment, LCA) tarkoitetaan menetelmää, jolla tutkitaan tuotteen, prosessin tai palvelun ympäristövaikutuksia koko elinkaaren ajalta aina raaka-aineiden hankinnasta hävittämiseen asti [4]. Elinkaariarviointia voidaan käyttää avuksi esimerkiksi tuotteen kehittämisessä, päätöksenteossa pohjatietona tai yritysten markkinoinnissa [5]. Tuotteen elinkaari voisi koostua esimerkiksi seuraavista vaiheista: raaka-aineiden hankinta ja prosessointi, tuotteen valmistaminen ja jakelu, varsinainen käyttö ja huolto sekä tuotteen kierrätys tai lopullinen hävittäminen. Tässä työssä ei suoriteta elinkaariarviointia, mutta ympäristövaikutuksia tutkiessa LCA:n perusperiaatteet on hyvä tuntea etenkin, koska usean tässä työssä käytetyn lähteen data perustuu elinkaariarviointeihin.

Elinkaariarvioinnin periaatteita, pääpiirteitä ja vaatimuksia on standardoitu ISO 14000 -sarjaan. Merkittävimpiä standardeja tästä sarjasta ovat vuonna 2006 julkaistut ISO 14040- ja ISO 14044 -standardit sekä vuonna 2018 julkaistu ISO 14067 -standardi. ISO 14040 kattaa elinkaariarvioinnin periaatteet ja pääpiirteet, kun taas ISO 14044 tarjoaa elinkaariarvioinnin vaatimukset ja ohjeita arviointitekniikoiden käyttämiseen. ISO 14067 puolestaan on melko uusi standardi, joka antaa ohjeita ja vaatimuksia hiilijalanjalan laskemiselle. [4,5,6] ISO 14040-standardin mukaan elinkaariarviointi toteutetaan neljässä erillisessä vaiheessa, jotka on esitetty kuvassa 1.



**Kuva 1.** Elinkaariarvioinnin vaiheet [4]

Prosessin ensimmäinen vaihe on tavoitteiden ja soveltamisalan määrittely. Tavoitteiden määrittelyn yhteydessä todetaan elinkaariarvioinnin toteuttamisen syyt, odotukset sekä arvioinnin kohde. Soveltamisalan määrittely puolestaan sisältää järjestelmän rajauksen ja tutkimuksen laajuuden eli esimerkiksi arvioinnissa huomioitavien ympäristövaikutusten valinnan. Elinkaariarvioinnin yksityiskohtaisuus riippuu suuresti tutkimuksen tavoitteista. [5,7]

Elinkaariarvioinnin perustan muodostaa prosessin toinen vaihe, *inventaarioanalyysi*. Tässä vaiheessa tarkasteltavan kohteen elinkaari jaetaan *yksikköprosesseihin*, joiden syöte- ja tuotostiedot määritetään yksitellen. Yksikköprosessi on pienin inventaarioanalyysissä analysoitava osa, ja mukaan otettavat yksikköprosessit määräytyvät pitkälti systeemin rajauksen mukaan. Prosessin syötteitä voivat olla esimerkiksi komponentit, käsiteltäväksi menevä jäte tai luonnonvarat, kuten malmi. Tuotoksia puolestaan voivat olla esimerkiksi tuotteet, palvelut tai ilmansaasteet. Inventaarioanalyysin tarkoitus on siis määrällisesti tarkastella syötteiden ja tuotosten virtoja, jotta niitä voidaan hyödyntää prosessin seuraavissa vaiheissa. [4,5,7]

Prosessin kolmas vaihe on *vaikutusarviointi*, jossa tutkitaan inventaarioanalyysissä selvitettyjen syöte- ja tuotosvirtojen ympäristövaikutuksia. Vaikutusarviointi antaa siis niimensä mukaisesti tietoa prosessien vaikutuksista ympäristöön sekä arvioi vaikutusten vakavuutta ja merkitystä. [5,7]

Elinkaariarvioinnin viimeinen vaihe on tulosten tulkinta, jossa yhdistellään inventaarioanalyysin ja vaikutusarvioinnin tuloksia johtopäätösten saamiseksi. Tulokset esitetään sellaisessa muodossa, jossa niistä on mahdollisimman paljon hyötyä prosessin alussa määriteltyjen tavoitteiden kannalta. Elinkaariarvioinnin tarkoitus on lopulta siis tarjota päätöstentekijöille hyödyllistä dataa tarkastelukohteen ympäristövaikutuksista. [5,7]

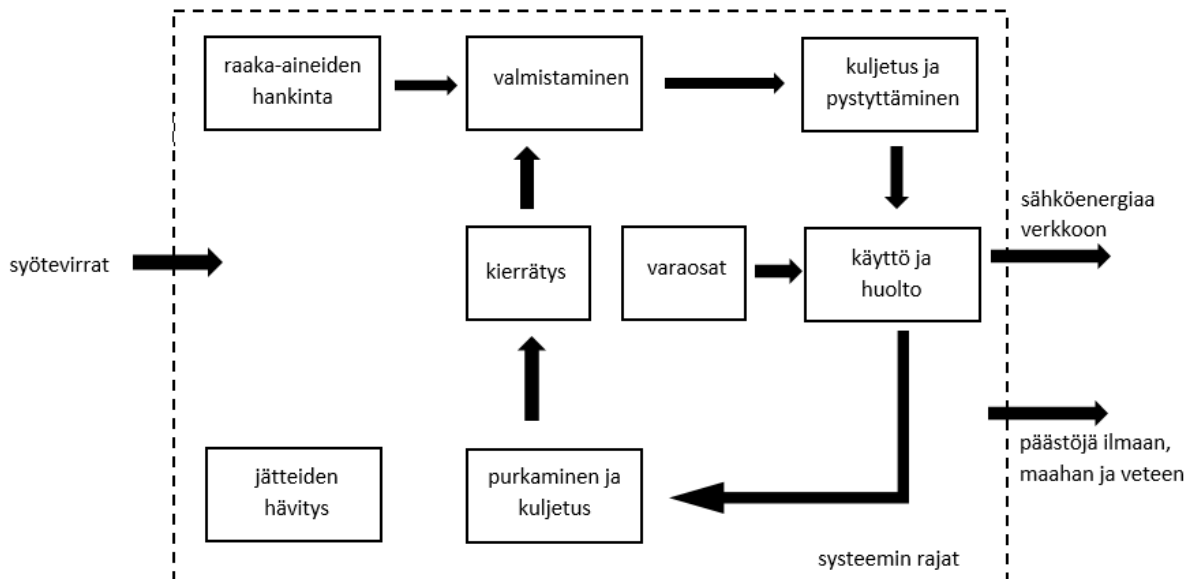
Elinkaariarviointeja voidaan suorittaa monilla eri lähestymistavoilla. Kaksi erilaista lähestymistapaa on kuitenkin vakiintunut elinkaariarvioiden pohjaksi: *attributional-* ja *consequential-*lähestymistavat. Attributional-lähestymistavassa tutkitaan tuotteelle tai palvelulle suoraan kohdistettavia ympäristövaikutuksia pysyvässä tilanteessa. Tässä lähestymistavassa voidaankin usein käyttää keskiarvodataa tutkimuksen pohjana. Consequential-lähestymistavassa sen sijaan ottaa huomioon syöte- ja tuotosvirtojen muutosten vaikutukset elinkaaren ympäristövaikutuksiin. Tämä lähestymistapa pyrkii siis ottamaan huomioon niin suorat kuin välilliset tekijät, jotka vaikuttavat tuotantoon ja kulutukseen ja siten ympäristövaikutuksiin. Näitä tekijöitä voivat olla esimerkiksi markkinavaikutukset ja rajallisten resurssien käyttö tuotannossa. [8]

### 3. TUULIVOIMALAN ELINKAARI

Tuulivoiman hyödyntämisen aiheuttamien päästöjen tarkka selvittäminen edellyttää voimalan elinkaaren kokonaisvaltaista ymmärtämistä. On tarkoituksenmukaista erotella elinkaari eri vaiheisiin, jotta voidaan selvittää, missä elinkaaren vaiheissa päästöjä syntyy. Vaiheiden erottelu mahdollistaa myös yksittäisten vaiheiden kehittämisen ympäristöystävällisempään suuntaan. Tässä luvussa tarkastellaan tyypillisen tuulivoimalan elinkaarta elinkaariajattelun mukaisesti ja pohditaan eri vaiheiden päästölähteitä.

Tarkastelussa keskitytään maalle rakennettavien vaaka-akselisten tuulivoimaloiden elinkaareen niiden hallitsevan markkinaosuuden vuoksi, unohtamatta kuitenkin merituulivoiman elinkaaren analysointia ja vertailua maalle rakennettaviin voimaloihin. Maalle rakennettavaa tuulivoimaa kutsutaan yleisesti englanninkielisen termin mukaan *onshore*-tuulivoimaksi, ja vastaavasti merelle rakennettavaa tuulivoimaa kutsutaan *offshore*-tuulivoimaksi. Näitä nimityksiä käytetään tässäkin työssä.

Tyypillisen tuulivoimalan elinkaari koostuu raaka-aineiden hankinnasta, valmistuksesta, kuljetuksesta, käytöstä, purkamisesta sekä kierrätyksestä tai hävittämisestä. Kuvassa 2 on esitetty nämä elinkaaren vaiheet ja niiden suhteet sekä systeemin energiavirrat. Syötevirroilla tarkoitetaan esimerkiksi ympäristöstä saatavaa energiaa tai materiaaleja.



**Kuva 2.** Tuulivoimalan elinkaari ja energiavirrat. Muokattu lähteestä [9].

Seuraavissa alaluvuissa käydään ympäristövaikutuksia ajatellen läpi tuulivoimalan elinkaaren päävaiheet: voimalan rakentaminen, käyttö ja huolto, sekä purkaminen ja kierrätys. Voimalan rakentamisvaiheeseen luetaan tässä yhteydessä mukaan raaka-aineiden hankinta, komponenttien valmistus, osien kuljetus sekä voimalan pystytys.

### 3.1 Voimalan rakentaminen

Kuten kuvasta 2 voidaan nähdä, tuulivoimalan elinkaaren ensimmäinen vaihe on raaka-aineiden hankinta. Voimalassa tarvittavat raaka-aineet riippuvat hieman voimalatyypistä, mutta yleisesti ottaen tuulivoimalan rakentamisessa tarvitaan lähinnä yleisiä materiaaleja [10]. Poikkeuksen luovat kestopagneeteilla varustetut tuulivoimalan generaattorit, joiden magneetit koostuvat harvinaisista maametalleista. Näiden ympäristövaikutuksia esitellään tarkemmin luvussa viisi.

Tyypillinen voimala koostuu yli 98-prosenttisesti vain kuudesta materiaalista: teräksestä, valuraudasta, lasikuidusta, muovista, kuparista sekä alumiinista. Koska itse torni koostuu lähinnä teräksestä, sen osuus materiaaleista on ylivoimaisesti suurin ja kattaakin yli kaksi kolmasosaa voimalan painosta. [10] Varsinaisen voimalan lisäksi materiaalia tarvitaan tornin perustuksiin. Perustukset tehdään yleensä betonista, joka valetaan laajalle alalle. Lisäksi pehmeällä maaperällä tarvitaan usein lisätukea, joka voidaan toteuttaa esimerkiksi maahan asennettavilla tukipaaluilla tai muokkaamalla maaperää. [11,12] Offshore-kohteissa käytetään yleensä *monopile*-perustuksia, jolla tarkoitetaan maahan upotettavia teräspaaluja. [13]

Tuulivoimalan tärkeimmät osat sekä niiden valmistamiseen tarvittavat päämateriaalit on esitetty taulukossa 1. Taulukkoon on otettu mukaan voimalan perustukset niihin tarvittavan suuren materiaalmäärän vuoksi, vaikka ne eivät varsinaisen voimalan osa olekaan.

**Taulukko 1.** Tuulivoimalan tärkeimmät osat sekä niiden päämateriaalit [9,12,14]

Voimalan osa	Päämateriaalit
Lavat	Lasikuitu (hiilikuitu), epoksi, balsapuu
Napa	Rauta (valurauta)
Naselli	Rauta, teräs, lasikuitu, kupari
Tasanteet ja tikkaat	Alumiini
Torni	Teräs
Perustukset	Betoni, teräs



Voimalan lavat ja napa muodostavat *roottoriksi* kutsutun kokonaisuuden. *Naselli* eli konehuone sisältää mm. generaattorin, vaihdelaatikon sekä muun toiminnan kannalta oleellisen mekaniikan ja elektroniikan. [12]

Vaikka voimalan rakentamiseen käytetyt materiaalit ovatkin enimmäkseen hyvin yleisiä, aiheutuu niiden valmistamisesta silti kasvihuonepäästöjä. Päästöjä syntyy etenkin raaka-aineiden louhinnasta ja jalostamisesta. Tuulivoimalan elinkaaren aikaisista kasvihuonekaasupäästöistä yli 90 % aiheutuu nimenomaan rakennusvaiheessa. Kahdessa eri kiinalaistutkimuksessa kohdistettiin valmistusvaiheeseen jopa 98 % voimalan elinkaaren aikaisista päästöistä [15,16]. Offshore-kohteissa rakentamisvaiheen osuus kokonaispäästöistä on pienempi, noin 80 % luokkaa. Ero johtuu hankalammasta sijainnista, joka vaatii joko laiva- tai helikopteri-yhteyttä jokaista huoltoa ja toimenpidettä varten käyttövaiheen aikana [13].

Itse komponenttien valmistamisen lisäksi päästöjä aiheutuu myös niiden kuljettamisesta rakennuskohteeseen. Nämä päästöt riippuvat luonnollisesti täysin kohteen sijainnista suhteessa komponenttien valmistuspaikkoihin. Koska komponenttien valmistusvaiheen osuus kokonaispäästöistä on hyvin dominoiva, on kuljetuksen aiheuttamien päästöjen rooli kokonaisuudessaan pieni [9,15,16]. Kuljetuksen osuus on pieni, vaikka osa materiaaleista jouduttaisiin tuomaan eri mantereilta. Kuljetusvaiheen päästöihin on kuitenkin mahdollista vaikuttaa toimitusketjujen kehittämisellä ja rakennuspaikkojen valinnalla.

Perustuksien ja voimalan rakentamisen lisäksi käyttö edellyttää myös liityntää sähköverkkoon, mikä vaatii kaapelointia, muuntajia sekä tuulipuistojen tapauksessa myös sähköasemia. Offshore-kohteissa sähköverkkoon liityntä on yleensä hieman työläämpää, sillä yhteys verkkoon vaatii merikaapeleiden asennusta ja offshore-sähköasemia. [13]

## 3.2 Käyttö ja huolto

Tyypillisen tuulivoimalan käyttöikä on 20–25 vuotta. Käyttövaiheen aikana voimalan päästöt aiheutuvat tarvittavista huoltotoimenpiteistä. Suurin osa näistä päästöistä aiheutuu logistiikasta eli siirtymisestä voimaloiden luokse. Offshore-tuulivoimaloilla logistiikkaan liittyvät päästöt ovat suuremmat kuin onshore-voimaloilla hankalamman sijainnin vuoksi, kuten edellisessä alaluvussa mainittiin.

Toimintavaiheessa voimala tarvitsee vuodessa noin kaksi suunniteltua ennaltaehkäisevää huoltokäyntiä, sekä noin neljä suunnittelematonta huoltokäyntiä [9,17]. Yleisimmät suunnitellut huoltotoimenpiteet ovat vaihteiston ja laakereiden voitelu, vaihteiston öljynvaihto sekä tarvittaessa varaosien vaihtaminen uusiin [13].

Tuulivoimaloiden käyttökatkot voivat siis olla suunniteltuja tai suunnittelemattomia. Käyttökatkojen kokonaisvaikutusta kuvaa tuulivoimalan *tekninen käytettävyys*, joka kertoo, kuinka suuren osan ajasta voimala on ollut käyttökunnossa vuoden aikana, pois lukien sähköverkon häiriöiden aiheuttamat katkot. VTT:n raportin mukaan Suomen suuren koluokan tuulivoimaloiden tekninen käytettävyys oli 88,5 % vuonna 2011 ja sitä edeltävien kymmenen vuoden aikana välillä 89–96 %. Tuulivoimaloiden yleisimmät viat liittyvät lapakulman säätömekanismiin sekä vaihdelaatikkoon. Lisäksi yleisiä vikalähteitä ovat tehoelektroniikka sekä hydrauliiikka. [18]

### 3.3 Purkaminen ja kierrätys

Kuten aiemmin todettiin, tuulivoimalan rakennusmateriaalit vastaavat suurimmasta osasta voimalan elinkaaren päästöistä sekä isosta osasta kokonaiskustannuksista [10]. Kiertotalouden periaatteita noudattaessa voimalan eliniän maksimointi huolto- ja korjaustoimenpiteillä on olennaista, mutta ennen pitkää hyvin huolletunkin voimalan elinkaari saapuu tiensä päähän. Kierrätyksen optimoiminen elinkaaren lopussa onkin erittäin tärkeää niin ympäristövaikutusten minimoimisen kuin taloudellisenkin näkökulman kannalta. Koska tuulivoimalan asianmukainen purkaminen on tuulivoimalan omistajan vastuulla, monissa maissa on otettu käyttöön purkuun liittyviä lainsäädännöllisiä velvoitteita. Useissa maissa voimalan omistaja velvoitetaan varustautumaan voimalan purkamiseen ennalta määrätyllä rahasummalla. [14] Tarkastellaan seuraavaksi, kuinka kierrätysprosessi tapahtuu eri tuulivoimalan komponenttien osalta.

Yleisesti ottaen koko tuulivoimalasta yli 80 % voidaan kierrättää. Kierrätysaste vaihtelee kuitenkin voimakkaasti materiaalien välillä: voimaloiden metallikomponenteista voidaan kierrättää lähes 100 %, kun taas lasikuidun ja muiden aineiden sekoituksesta koostuvien lapojen kierrätys on osoittautunut hyvinkin haastavaksi. [14,19]

Kuten aiemmin todettiin, voimalan perustukset koostuvat enimmäkseen betonista. Betoniperustukset voidaan voimalan purkamisen yhteydessä jättää maahan tai tarvittaessa kaivaa ylös ja hävittää. Murskattu betoni voidaan joko loppusijoittaa kaatopaikalle tai kierrättää hyödyntämällä betonimurske maarakentamisessa. [19,20]

Tuulivoimalan lavat puolestaan ovat yleisimmin komposiittimateriaalia, joka sisältää enimmäkseen lasikuitua tai hiilikuitua, kertamuovia kuten epoksia, sekä balsapuuta. Hiilikuitua käytetään vahvikekuituna vain vähän sen korkean hinnan vuoksi. Edellä luetellut materiaalit ovat yleisimmät perusmateriaalit; tarkka lavan koostumus voi olla hyvinkin monimainen ja vaihteleva. [21]

Komposiittilapojen jätteenkäsittelyyn on olemassa kolme pääasiallista tapaa: loppusijoitus kaatopaikalle, polttaminen ja kierrätys. Näistä loppusijoitus maahan on jätehierarkian mukaisesti huonoin vaihtoehto. Esimerkiksi Saksassa tämä käsittelytapa on jo kielletty, mutta monessa muussa maassa, kuten Suomessa, jätteen hautaaminen on toistaiseksi yleisin toimintatapa. [9,19] Polttaminen on myös hyvin yleinen tapa lapojen jätteenkäsittelyyn. Polttamisen heikkous piilee kuitenkin siinä, että jopa 60 % lähtömateriaalista jää jäljelle vaikeasti käsiteltävänä lasituhkana, joka joudutaan esimerkiksi loppusijoittamaan maahan. [21,22]

Lapojen kierrättämismahdollisuuksia on alettu tutkia viime vuosina, kun lasikuitumuovi-jätteen suuri määrä on herättänyt huolenaiheita. Lasikuitujätettä syntyy suuria määriä tuulivoimaloiden ohella myös esimerkiksi veneteollisuudesta, joten muutkin teollisuudenalat ovat kiinnostuneet jätteen kierrätysmahdollisuuksista. Tutkimuksia ja kokeiluja on tehty muun muassa lapamateriaalin käyttämisestä sellaisenaan rakennusmateriaalina sekä hienonnetun lapajätteen käyttämisestä ainesosana monipuolisissa rakennusmateriaaleissa. Esimerkiksi Kiinassa lapamateriaalista on onnistuttu hyödyntämään jopa 98 % hienontamalla komposiittimateriaali ja käyttämällä sitä raaka-aineena uusissa materiaaleissa. [16,21] Myös eräs suomalaisyritys on onnistunut valmistamaan komposiittijätettä hyödyntämällä kestävästä materiaalista, josta on rakennettu mm. penkkejä, katoksia ja palosuojalevyjä. Lapojen tehokas ja kaupallisesti kannattava kierrätys on kuitenkin edelleen maailmanlaajuisesti vasta kehitysvaiheessa, joten tässä vaiheessa tuulivoimateollisuus turvautuu vielä pitkälti kiertotalouden kannalta huonompiin vaihtoehtoihin. [21,22]

Metalliosien kierrätys on melko suoraviivaista, sillä käytetyt metallit ovat hyvin yleisiä ja niiden kierrätysprosessit siten pitkälle kehitetyt. Metallien kierrätys on paitsi taloudellisesti kannattavaa ja alentaa tuulivoimalan takaisinmaksuaikaa, se myös vähentää ympäristön kuormitusta merkittävästi. Jos tuulivoimalan elinkaaren kokonaispäästöissä huomioidaan vähentävänä tekijänä metallien kierrätys, jolloin vältetään neitseellisten raaka-aineiden käytöltä toisaalla, laskee elinkaaren aikainen kokonaisympäristövaikutus merkittävästi. Tutkimuksessa, jossa vertailtiin eri onshore-turbiinityyppien ympäristövaikutuksia, todettiin kierrätyksen vähentävän elinkaaren kokonaisympäristövaikutuksia 30-50 % [9]. Toisessa tutkimuksessa, jossa tehtiin elinkaariarviointi kahdelle offshore-voimalalle, todettiin kierrätyksen vähentävän ympäristövaikutuksia 25 %. [16] Molemmissa tutkimuksissa oletettiin metalliosille noin 90% kierrätysaste sekä lapojen käsittelytavaksi loppusijoitus maahan hautaamalla. Tuloksista nähdään, että kierrätyksellä on merkittävä vaikutus tuulivoimalan ympäristövaikutuksiin.

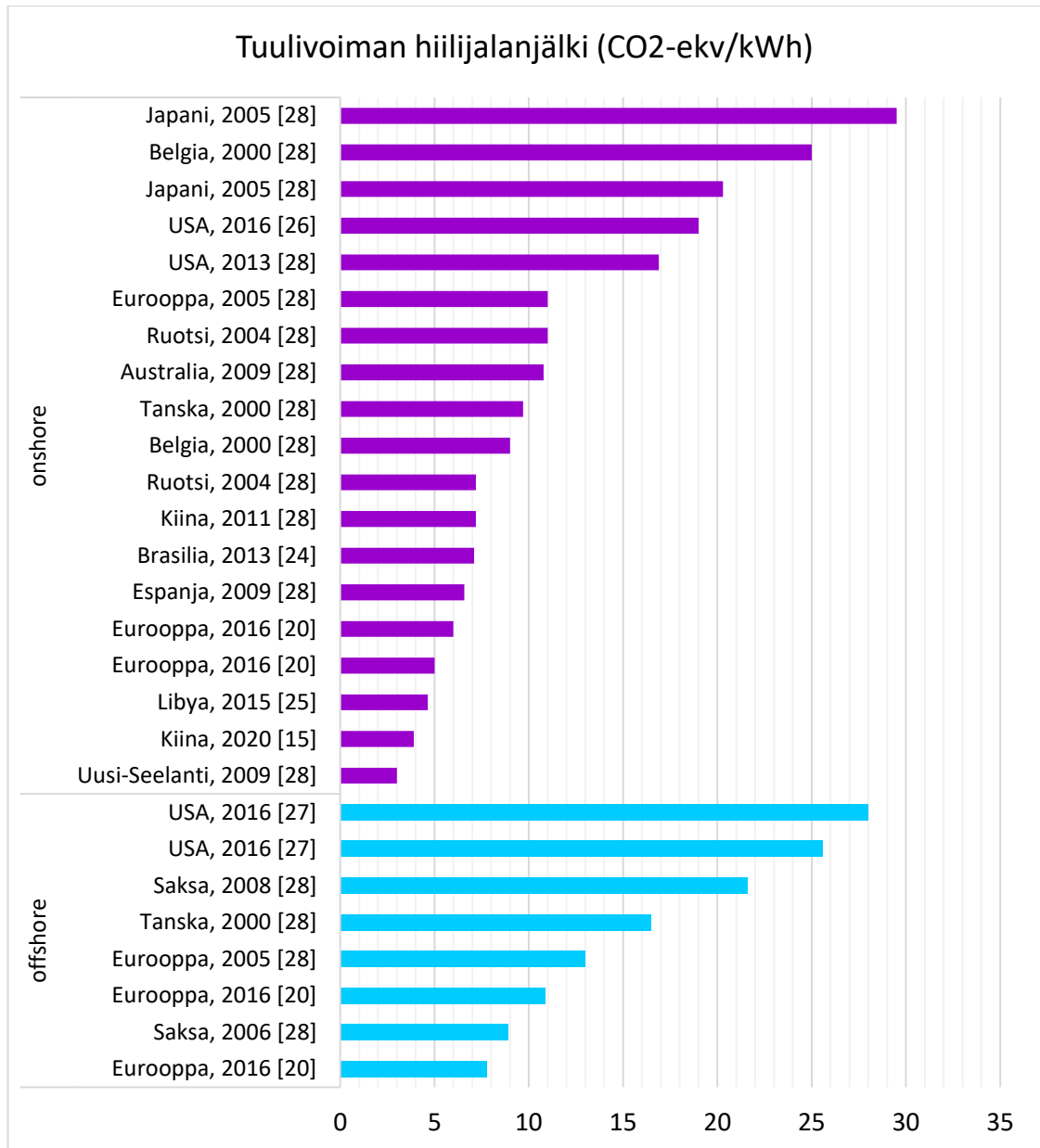
## 4. TUULIVOIMAN PÄÄSTÖT

Yksi tärkeimmistä mittareista uusiutuvalle sähköenergian tuotantomuodolle on sen elinkaaren aikaiset hiilidioksidipäästöt, jota kutsutaan myös *hiilijalanjäljeksi*. Toiminnan hiilijalanjälki kuvaa sen aiheuttamaa ilmastokuormaa, joka luonnollisesti pyritään minimoimaan. Jalanjäljen laskemisessa hyödynnetään *hiilidioksidiekvivalenttia*, lyhenne CO<sub>2</sub>-ekv tai CO<sub>2</sub>e, jolla voidaan kuvata eri kasvihuonekaasujen yhteenlaskettua ilmastovaiikutusta. Sähköntuotannossa hiilijalanjälkeä tarkastellaan usein yksikössä gCO<sub>2</sub>-ekv/kWh (grammaa hiilidioksidiekvivalenttia tuotettua kilowattituntia kohden), jotta voidaan verrata päästöjä tuotettuun energiaan nähden. Ekvivalentin laskennassa hyödynnetään eri kaasuille laskettuja kertoimia (GWP, Global Warming Potential), jotka kuvaavat kyseisen kaasun ilmastovaiikutusta suhteessa hiilidioksidiin yleensä 100 vuoden tarkastelujaksolla. Hiilidioksidin GWP on siis vertailuarvona ja siten arvoltaan 1, kun taas esimerkiksi metaanille vastaava luku on noin 30. Tämä siis kertoo, että 100 vuoden tarkastelujaksolla ilmakehään vapautuneen metaanitonin ilmastovaiikutus vastaa 30 CO<sub>2</sub>-tonnin ilmastovaiikutusta. [23] Näin erilaiset kasvihuonekaasut saadaan vertailukelpoiksi ilmastovaiikutuksia tarkastellessa.

Alaluvussa 4.1 esitetään eri tutkimuksista koottuja lukuarvoja tuulivoimalan hiilijalanjäljelle sekä vertaillaan hiilijalanjäljen suuruutta muihin energiantuotantomuotoihin. Alaluvussa 4.2 puolestaan pohditaan, mitä välillisiä päästövaikutuksia tuulivoiman hyödyntäminen voi aiheuttaa.

### 4.1 Tuulivoiman hiilijalanjälki

Tuulivoimaloille on tehty ympäri maailmaa paljon elinkaariarviointeja, joihin kuuluu usein kiinteänä osana myös voimalan elinkaarin hiilijalanjäljen laskeminen; onhan hiilijalanjälki kenties merkittävin yksittäinen ympäristöystävällisyyden mittari. Eri tutkimuksissa saatuja hiilijalanjälkien arvoja on koottu kuvaan 3. Mukaan on otettu tutkimuksia eri puolilta maailmaa. Enemmistö koskee onshore-voimaloita, mutta mukaan on otettu vertailua varten myös joitakin offshore-voimaloita.



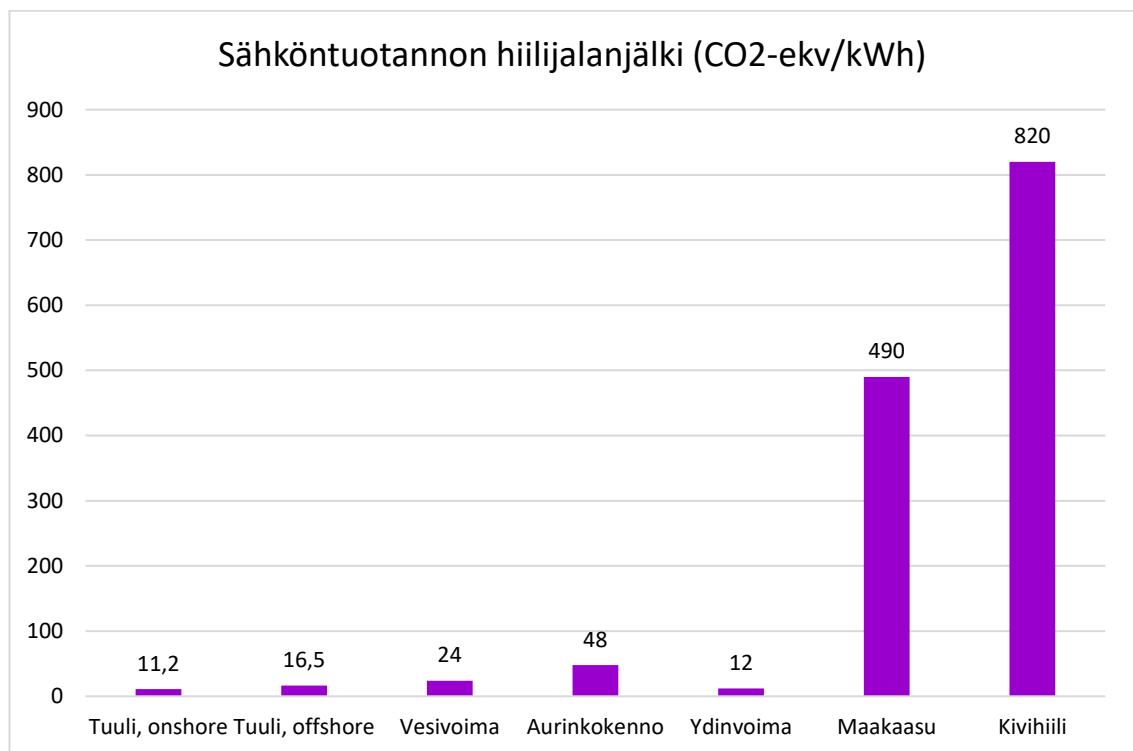
**Kuva 3.** Eri tuulivoimaloiden hiilijalanjälkiä tuotettua sähköenergiaa kohden.

Tässä otoksessa onshore-voimaloiden hiilijalanjäljet vaihtelevat välillä 3-30 gCO<sub>2</sub>-ekv/kWh ja offshore-voimaloiden hiilijalanjäljet välillä 8-28 gCO<sub>2</sub>-ekv/kWh. Arvot ovat suhteessa toisiinsa hyvinkin vaihtelevia ja tapauskohtaisia. Tuulivoimalan hiilijalanjälkeen vaikuttavat merkittävästi voimalan sijainti sekä kohteen tuuliolosuhteet.

Hiilijalanjäljen keskiarvoksi saadaan onshore-voimaloille 11,2 gCO<sub>2</sub>-ekv/kWh ja offshore-voimaloille 16,5 gCO<sub>2</sub>-ekv/kWh. Keskimäärin offshore-voimaloiden elinkaaren hiilijalanjälki on siis hieman onshore-voimaloita suurempi. Ero johtuu merelle rakennettävien voimaloiden hankalammasta sijainnista, jolloin logistiset päästöt ovat suurempia ja voimalan perustukset sekä yhteys sähköverkkoon ovat työläämpiä rakentaa. Ero on

kuitenkin melko pieni: sitä kaventaa se, että merellä keskimääräiset tuulet ovat kovempia, jolloin myös voimaloiden keskimääräiset tehot ovat suuremmat. [13]

Vaikka edellä todettiin tuulivoiman hiilijalanjäljen vaihtelevan paljon eri tutkimusten välillä, on tuulivoiman hiilijalanjälki joka tapauksessa hyvin pieni vertailtaessa fossiilisten polttoaineiden hiilijalanjälkeen. Vaihteluvälillä ei siis ole juurikaan merkitystä vertailtaessa ilmastovaikutuksia fossiilisten polttoaineiden kanssa. Tämä huomataan kuvasta 4, johon on koottu keskimääräisiä hiilijalanjäljen arvoja eri sähköntuotantomuotojen osalta. Vertailuun on otettu mukaan myös muita uusiutuvia energiantuotantomuotoja sekä ydinvoima.



**Kuva 4.** Eri sähköntuotantomuotojen hiilijalanjälki koko elinkaaren ajalta [29]

Kuvasta nähdään, että ydinvoiman sekä uusiutuvien sähköntuotantomuotojen hiilijalanjälki on hyvin pieni verrattuna maakaasulla ja kivihiilellä tuotettuun sähköenergiaan. Tuulivoiman hiilijalanjäljen arvot ovat tässä työssä eri tutkimusten tuloksista lasketut keskiarvot, jotka ovat täysin samaa suuruusluokkaa IPCC:n tilastoarvojen kanssa [29]. Vertailusta voidaan päätellä, että tuulivoiman lisääminen sähköntuotannon kasvihuonepäästöjen vähentämiseksi on täysin perusteltua, mikäli lisääminen korvaa fossiililla polttoaineilla tuotettua sähköenergiaa.

## 4.2 Välilliset päästövaikutukset

Tuulivoimalla tuotetun sähköenergian lisääminen aiheuttaa päästövaikutuksia myös välillisesti. Ehkä merkittävin välillinen vaikutus syntyy siitä, että tuulivoiman lisääminen tarkoittaa yleensä jonkun toisen sähköntuotantomuodon korvaamista. Koska globaalisti tavoitteena on kasvihuonepäästöjen vähentäminen, tuulivoima korvaa yleensä fossiililla polttoaineilla tuotettua energiaa. Tällöin välillinen päästövaikutus on siis positiivinen: fossiililla polttoaineilla toimivien voimaloiden korvaaminen tuulivoimalla vähentää etenkin paikallisesti vaikuttavia pienhiukkaspäästöjä sekä ilmakehään vapautuvia kasvihuonepäästöjä. Päästövähennemä voidaan laskea korvattavan tuotantomuodon ja tuulivoiman hiilijalanjäljen erotuksena.

Luonnollisesti tämä mahdollinen syrjäyttämisaikutus riippuu kohdemaan sähköntuotantorakenteesta. Maailmanlaajuisesti tarkasteltuna fossiililla polttoaineilla tuotetaan edelleen yli 60 % kaikesta sähköenergiasta [30]. On siis todennäköistä, että suurin osa uudesta tuulivoimakapasiteetista syrjäyttää näitä suuripäästöisimpiä tuotantomuotoja etenkin teollisuusmaissa, joissa sähkönkulutus ei enää merkittävästi kasva. Kuitenkin esimerkiksi Norjassa vesivoimalla tuotetaan yli 95 % sähköenergiasta, jolloin lisättävän tuulivoiman syrjäyttävä päästövaikutus on pieni [31].

Suomen sähköntuotannon tulevaisuudesta on esitetty useita visioita, mutta yleisenä teemana on tuulen ja biomassan merkittävä lisääminen sähköntuotannossa, nimenomaan fossiilisten polttoaineiden korvaajana. Sitran (Suomen itsenäisyyden juhlarahasto) vuonna 2018 julkaisemassa tutkimuksessa [32] esitetään kattavasti eri toimenpiteitä, joilla Suomen on mahdollista päästä Pariisin ilmastopöytäkirjan myötä asetettuihin päästötavoitteisiin. Alun perin hallitus linjasi Suomen tavoitteeksi hiilineutraaliuden vuoteen 2045 mennessä. Välitavoitteena tämän saavuttamisessa olisi päästöjen vähentäminen 60 %:lla vuoteen 2030 mennessä ja juuri tähän välitavoitteeseen tutkimuksessa esitetään vaihtoehtoja. Sittemmin Marinin hallitus on tiukentanut Suomen päästötavoitteita ja asettanut tavoitteeksi hiilineutraaliuden jo vuonna 2035 [33]. Tästä huolimatta keinot päästöjen vähentämiseen ovat samat.

Sitran tutkimuksessa Granskog *et al.* korostavat offshore-tuulivoiman potentiaalia Suomessa ja esittävät, että vuonna 2030 asennettu offshore-kapasiteetti voisi jopa ylittää onshore-kapasiteetin määrän, jolloin tuulivoimalla voitaisiin yhteensä kattaa peräti 25 % Suomen sähköntuotannosta. Tässä skenaariossa merituulivoima korvaisi hiilen käytön sähköntuotannossa ja maalle rakennettava tuulivoima puolestaan korvaisi kaasu-, öljy- ja turvevoiman käytön [32]. Täten tuulivoima korvaisi kokonaisuudessaan fossiilisia polttoaineita ja positiivinen ympäristövaikutus saataisiin maksimoitua.

Päästövähennemän tuoman positiivisen ympäristövaikutuksen rinnalla saattaa tulevaisuudessa kuitenkin tulla myös negatiivisia välillisiä vaikutuksia. Tuulivoiman tuotanto on luonnollisesti vahvasti tuuliolosuhteista riippuvaista. Kun sähköverkkoon liitetään merkittävä määrä aikariippuvaista tuotantoa, muodostuu ongelmaksi tehotasapainon ylläpito, sillä sähköön kulutuksen ja tuotannon on vastattava toisiaan joka hetkellä. Tehotasapainon ylläpidosta huolehditaan yleisesti säätövoimalla, jolla siis tarkoitetaan sähköntuotantoa, jota voidaan tarpeen mukaan nopeasti ajaa ylös tai alas ja siten saada kokonaistuotanto kulutusta vastaavaksi. Suomessa säätövoimaa tuotetaan yleensä vesi- ja lauhdevoimalla. Tämän lisäksi tehotasapainosta huolehditaan myös säätelämällä sähköenergian tuontia. [34]

Aikariippuvaisen tuotannon lisääminen edellyttää nykyistä mittavampaa säätövoiman käyttöä, millä on oma vaikutuksensa tuulivoimalan elinkaareen yhdistettäviin päästöihin. Esimerkiksi lauhdevoimalaitosten ajo vaihtelevilla ja epäoptimaalisilla kuormilla alentaa laitosten hyötysuhdetta, mikä osaltaan pienentää tuulivoiman lisäämisellä saavutettuja päästöhöyryjä [35]. Tulevaisuudessa myös kysyntä tehokkaille energian varastointiratkaisuille lisääntynee, etenkin kun fossiilisia polttoaineita hyödyntävää lauhdevoimaa poistetaan käytöstä. Sähköenergian laajamittainen varastointi aiheuttaisi väistämättä myös lisäpäästöjä, jotka olisi syytä ottaa huomioon arvioidessa tuulivoiman ympäristövaikutusten kokonaisuutta.

Sähköenergian varastointiin on olemassa useita eri tapoja, kuten pumppuvoimalaitos, akut, vauhtipyörä ja suprajohtava energiavarasto (SMES). Esimerkiksi aurinko- ja tuulivoiman päivittäisen vaihtelun tasoittaminen vaatisi kuitenkin valtavan energiamäärän varastointia. Nykyteknologialla akkujen kapasiteetti ei tähän riitä ja SMES-järjestelmän koko ja hinta kasvaisivat tässä kokoluokassa ylitsepääsemättömän suuriksi [36]. Tällä hetkellä käytännössä ainoa toimiva suuren kokoluokan sähköenergiavarasto onkin pumppuvoimalaitos. Niiden osuus koko maailman sähköenergian varastointikapasiteetista on yli 95 % [37].

Pumppuvoimalaitoksen toiminta perustuu energian varastointiin veden potentiaalienergiana. Kun sähköä tuotetaan kulutukseen nähden liikaa, voidaan ylijäämäenergiaa käyttää veden pumppaamiseen yläaltaaseen. Kun sähköön kulutus puolestaan on tuotantoon nähden suurta, voidaan veden potentiaalienergia muuntaa takaisin sähköenergiaksi laskemalla vesi ala-altaaseen turbiinin läpi kuten vesivoimaloissa. Pumppuvoimalaitosten hyötysuhde on verrattain hyvä: varastoitavasta energiasta saadaan palautettua noin 70–80 % [37]. Pumppuvoimalaitoksissa pyritään kuitenkin satojen metrien korkeuseroihin. Suomessa korkeuserot ovat verrattain pieniä ja luonnon arvostus hyvin korkea, joten hyödyntämismahdollisuudet ovat Suomessa rajalliset.



Koska sähköenergian varastointi on globaalisti vielä melko pientä, on laskennallisesti vaikeaa arvioida tuulivoiman lisäämiseen kohdistettavia välillisiä päästövaikutuksia eikä niitä tarkastella tässä työssä tarkemmin. Pumppuvoimalaitosten hiilidioksidipäästöt ovat kuitenkin vesivoimaloiden tapaan melko pienet, joten ne ovat potentiaalinen vaihtoehto ympäristöystävälliseen energian varastointiin. Myös muut varastointiteknologiat kehittyvät nopeasti, joten vain aika näyttää, kuinka varastoinnin tarve tullaan tulevaisuudessa kattamaan.

## 5. HARVINAISTEN MAAMETALLIEN KÄYTTÖ

Vaihteettomien eli suoravetoisten tuulivoimaloiden osuus markkinoilla on kasvanut merkittävästi viime vuosina. Vaihteettoman tuulivoimalan merkittävin etu on vaihteiston puuttuminen, sillä viime vuosien kehityksestä huolimatta vaihteistoviat ovat edelleen yksi yleisimmistä syistä tuulivoimalan käyttökatkoille. Vaihteettomat ratkaisut varustetaan yleensä hitaalle pyörimiselle suunnitellulla kestopagneettigeneraattorilla. Vuonna 2018 asennetuista tuulivoimaloista hieman yli neljännes oli suoravetoisia, joista edelleen noin 80 % kestopagneetilla varustettuja [38].

Voimaloissa käytettävät kestopagneetit ovat neodyymimagneetteja, joita kutsutaan kemiallisen koostumuksensa vuoksi NdFeB-magneeteiksi. Tarkalleen ottaen magneetit sisältävät neodyymin lisäksi myös praseodyymiä, sillä nämä kaksi maametallia esiintyvät samassa malmassa eikä niiden erottaminen ei ole kannattavaa. Lisäksi magneetteihin lisätään dysprosiumia parantamaan magneettista suorituskykyä korkeammassa lämpötiloissa. [39] Kaikki kolme edellä mainittua alkuainetta kuuluvat ns. *harvinaisiin maametal-leihin*, joiden louhinta ja käsittely on herättänyt viime vuosina kasvavaa huolta ympäristöongelmien vuoksi. Näitä ongelmia voivat olla mm. maaperän ja veden saastuminen, ilmansaasteet sekä työntekijöiden turvallisuus [40].

Harvinaisten maametallien tuottamisen tärkeimmät vaiheet ovat louhinta, jauhatus, separointi ja jalostus. Jokainen vaihe sisältää riskejä ympäristöongelmille, jos tarvittavista toimenpiteistä ei huolehdi asianmukaisesti. [40] Seuraavissa kappaleissa esitellään lyhyesti suurimmat maametallien tuottamiseen liittyvät riskit.

Suurimmat ympäristöriskit niin lyhyellä kuin pitkällä aikavälilläkin aiheuttaa prosessissa syntyvä rikastusjäte. Rikastusjäte koostuu yleensä pienistä partikkeleista, jätevedestä ja flotaatiossa käytetyistä kemikaaleista. Rikastusjäte varastoidaan yleensä pysyvästi erilliselle, padotulle varastointialueelle, jossa se altistuu sateelle ja myrskyjen valumavesille. Rikastusjäte sisältää myrkyllisiä aineita, joita voi imeytyä pohjaveteen, mikäli varastointialue sijoitetaan vettä läpäisevälle maaperälle. Saastuttavan veden koostumus riippuu luonnollisesti kaivuupaikan maantieteellisestä sijainnista, mutta se sisältää yleensä mm. radioaktiivisia aineita, happoja ja raskasmetalleja. Lisäksi patoalueen liikäättyminen myrskysateista, heikko rakennuslaatu tai maanjäristykset aiheuttavat riskin varastointialueen padon murtumiselle. Padon murtuminen aiheuttaisi valtavan ekologisen katastro-

fin, kun myrkyllinen rikastusjäte pääsisi tulvimaan ympäristöön. Jäteveden pääsyä luontoon voidaan estää oikeanlaisella jätteenkäsittelyllä ja kaivosjätteen varastointipaikalla sekä valvomalla patojen kestävyyttä kaivosten sulkemisen jälkeenkin. [40]

Vastaavanlaisia riskejä liittyy myös louhinnassa syntyvän kivijätteen varastointiin sekä itse avolouhokseen. Kivijäte on rikastusjätteen tavoin alttiina sadeveden aiheuttamalle myrkyllisten aineiden huuhtoutumiselle. Tämä vapautuminen on kuitenkin yleensä huomattavasti pienempää kuin rikastusjätteen tapauksessa. Vastaavasti avolouhoksesta saattaa käytön jälkeen huuhtoutua myrkyllisiä ja radioaktiivisia aineita ympäristöön saateiden mukana. [40]

Vaarallisten aineiden huuhtouman ohella vakavia riskejä aiheutuu myös louhinnan ja prosessoinnin aikana syntyvistä ilmansaasteista. Ensinnäkin tuuli puhaltaa ilmaan prosessin eri vaiheissa syntyneitä pölyhiukkasia, jotka saattavat sisältää esimerkiksi radioaktiivisia aineita ja raskasmetalleja. Tämä synnyttää riskejä työntekijöiden ja lähialueen asukkaiden terveydelle. Toiseksi harvinaisten maametallien jatkojalostus on paljon energiaa vaativa prosessi, jonka aikana ilmakehään vapautuu paljon hiilidioksidipäästöjä, jotka edistävät ilmastonmuutosta. [40]

Ylivoimaisesti suurin osa maailman harvinaisista maametalleista tuotetaan Kiinassa lähes monopolituotantona [40,41]. Kiinan kaivosteollisuuden vastuullisuus on herättänyt huolta jopa valtiotasolla asti, mutta ympäristömääräykset ja länsimainen vastuullinen ajattelutapa ovat onneksi saaneet viime vuosina jalansijaa. Maassa on siitä huolimatta viime vuosikymmenien aikana toiminut monia laittomia, pienen mittakaavan kaivoksia, joiden toiminta on pysyvästi vahingoittanut kaivosalueiden ympäristöä. Kiinan viranomaiset ovat sittemmin sulkeneet nämä laittomat laitokset ja tiukentaneet huomattavasti määräyksiä, mutta jo turmeltuneiden alueiden puhdistaminen on aikaa vievä ja kallis prosessi. [42] Tutkijat yrittävät edelleen kehittää jalostusprosessia entistä ympäristöystävällisemmäksi. Vaikka harvinaisten maametallien tuotannolla onkin oma hiilijalanjälkensä, ovat suoravetoisten tuulivoimaloiden elinkaaren aikaiset päästöt silti mitättömät verrattuna fossiilisiin polttoaineisiin. Lisäksi suoravetoiset tuulivoimalat ovat kompaktimpia ja toimintavarmempia kuin vaihteelliset voimalat, minkä vuoksi etenkin merituulivoiman nousun odotetaan lisäävän entisestään suoravetoisten tuulivoimaloiden kysyntää. [41]

Mikäli suoravetoisten tuulivoimaloiden kysyntä jatkaa merkittävää kasvuaan muun kestomagneetteja hyödyntävän teknologian ohella, voi harvinaisten maametallien riittävyys kuitenkin muodostua isoksi ongelmaksi. Tätä ongelmaa pyritään välttämään paranta-

malla voimaloiden materiaalitehokkuutta. Lisäksi tutkijat yrittävät kehittää kestopagneetteja, jotka vastaisivat suorituskyvyltään NbFeB-magneetteja, mutta koostuisivat eri alkua-aineista. [41]

Tulevaisuudessa eräs mahdollinen ratkaisu harvinaisten maametallien korvaamiseksi suoravetoisissa tuulivoimaloissa voisi olla suprajohdemagneetteja hyödyntävät generaattorit. Suprajohteiden hyvin korkea tehotiheys mahdollistaisi samansuuruisen tehon tuottamisen huomattavasti kevyemmällä ja kompaktimmalla rakenteella. Suprajohtavat generaattorit mahdollistaisivat myös periaatteessa nykyistä suuremman yksikkökoon. Suprajohtavuuden kaupallinen hyödyntäminen tuulivoiman tuotannossa on kuitenkin edelleen vasta kehitysvaiheessa. Lupaavia kehitysaskelia on kuitenkin otettu: EU-rahoitteen EcoSwing-projektin tuloksena vuonna 2019 saatiin ensimmäistä kertaa maailmassa asennettua kaupalliseen tuulivoimalaan suprajohtava generaattori. [43]

## 6. VAIKUTUKSET ELOLLISEEN LUONTOON

Tuulivoiman lisääntyessä myös huoli tuulivoimaloiden vaikutuksista villieläimiin, etenkin lintuihin ja lepakoihin, on ollut kasvava huolenaihe. Kenties tuulivoiman tunnetuin ja keskustelluin vaikutus eläimistöön on lintujen ja lepakoiden törmäminen pyöriiviin lapoihin. Tuulivoimalarakentaminen sisältää kuitenkin myös muitakin riskejä, jotka on syytä ottaa huomioon rakentamista suunnitellessa. Tässä luvussa tarkastellaan erityisesti, mitä vaikutuksia tuulivoimaloilla on lintuihin ja lepakoihin. Omassa alaluvussa pohditaan myös hieman offshore-voimaloiden mahdollisia vaikutuksia vedenalaisiin ekosysteemeihin.

### 6.1 Linnusto ja lepakot

Tuulivoimaloiden vaikutukset lintuihin ja lepakoihin voidaan jakaa lähinnä törmäyskuolemien aiheuttamiin suoriin vaikutuksiin sekä epäsuoriin vaikutuksiin. Epäsuorilla vaikutuksilla tarkoitetaan pidemmällä aikavälillä tapahtuvia muutoksia ympäristön lajikoostumuksessa ja yksittäisten lajien yksilömäärissä. Näitä muutoksia aiheuttavat tuulivoimaloiden aiheuttama häirintävaikutus, estevaikutus sekä muutokset elinympäristössä. Epäsuorat vaikutukset ovat merkittävämpiä linnuilla kuin lepakoilla. Vaikutustavat ovat samat niin onshore- kuin offshore-voimaloillakin. Suurin uhka tuulivoima on uhanalaisille lajeille sekä lajeille, joilla on pitkä elinikä, myöhäinen sukukypsyys ja pieni jälkeläismäärä. [44,45]

Suorat vaikutukset liittyvät siis enimmäkseen lintujen ja lepakoiden riskiin törmätä pyöriiviin lapoihin. Lisäksi tuulivoimaloiden lähellä esiintyvien ilmanpyörteiden aiheuttamat äkilliset ilmanpainemuutokset saattavat aiheuttaa lepakoilla barotrauman (keuhkokudoksen repeytymän) [46]. Lapojen lisäksi linnut saattavat törmätä myös tuulivoimalan torniin tai sähköjohtoihin. Valtaosa törmäyskuolemista johtuu kuitenkin törmäyksistä lapoihin. Vaikka lavat näyttävät nopeasti tarkasteltuna pyöriivän hitaasti, lapojen kärjet voivat liikkua yli 200 kilometrin tuntivauhtia. Täten törmäminen lapaan on käytännössä aina eläimelle kohtalokas. Törmäysalttius riippuu lajista: suurin törmäysriski on lajeilla, jotka eivät luontaisesti välttele ihmisten tekemiä rakenteita. [44,45]

Törmäysten aiheuttamaa lintujen kuolleisuutta on yritetty selvittää useissa tutkimuksissa. Vuonna 2013 julkaistussa metatutkimuksessa [47] selvitettiin tuulivoimaloiden aiheuttamia lintukuolemia suhteessa muihin kuolinsyihin. Tutkimuksen mukaan vuonna 2009 tuulivoimalat aiheuttivat Yhdysvalloissa noin 20 000 linnun kuoleman, joka oli hyvin pieni murto-osa kaikista lintukuolemista. Esimerkiksi villikissat tappoivat tutkimuksen mukaan

110 miljoonaa, rakennusten ikkunat 97 miljoonaa ja fossiilisilla polttoaineilla toimivat voimalat 14 miljoonaa lintua. Vuodesta 2009 tuulivoimaloiden määrä on toki lähes tuplaantunut, mutta tuulivoimaloiden osuus kaikista lintukuolemista on silti hyvin pieni. [47,48]

Lepakoiden törmäyskuolleisuudesta on tehty toistaiseksi vain vähän tutkimuksia, joten luotettavia lukumääräarvioita lepakkoolemista ei juurikaan ole. Tiedetään kuitenkin, että lepakoiden törmäyskuolleisuuteen vaikuttaa moni asia. Lepakot eivät ensinnäkään näytä välttelevän tuulivoimaloita lainkaan. Päinvastoin ne näyttävät tutkimusten mukaan jopa houkuttelevan lepakoita. Syy tähän on epävarma, mutta on epäilty, että voimaloiden houkuttelevuus voisi liittyä siitä lähteviin ääniin, hyönteiskeskittymiin turbiinien lähellä tai lepakoiden nukkumapaikkojen etsintään. Tiedetään myös, että lepakot käyttävät matkatessaan navigoinnin tukena lineaarisia elementtejä, kuten jokilaaksoja ja metsien puurajoja, joten tuulivoimaloiden sijoittaminen tällaisten läheisyyteen lisää törmäysriskiä. Joidenkin arvioiden mukaan merkittävin riski lepakoille olisi suorien törmäysten sijaan ilmanpyörteiden aiheuttama barotrauma, mutta asiaa on tutkittu vain vähän. [46]

Häirintävaikutuksella tarkoitetaan voimaloiden tuottamaa ääntä ja välkettä, jotka saattavat häiritä lintuja. Herkkyys äänelle ja välkkeelle vaihtelee paljon lajeittain. Joitakin lajeja häirintävaikutukset eivät näytä koskevan lainkaan, kun taas osa lajeista välttelee tuulivoima-alueita kokonaan niin pesimä-, ruokailu- kuin levähdyspaikkoinakin. Osa lajeista puolestaan sijoittuu näiden kahden väliin, jolloin yksiköt tottuvat tuulivoimaloiden olemassaoloon joidenkin vuosien aikana. Lepakoilla häirintävaikutusta ei esiinny. [44,45]

Estevaikutuksella tarkoitetaan tuulivoimaloiden muodostamaa ”estettä” lintujen kulkureiteille. Lintujen on havaittu kiertävän tuulivoima-alueet niiden matkatessa ruokailupaikoille tai muuttoliikkeen aikana. Lentoreittien pidentyminen johtaa lintujen suurentuneeseen energiankulutukseen, joka voi vaikuttaa esimerkiksi lintujen lisääntymiseen. Lepakoilla estevaikutuksen merkitys on melko vähäinen. [44]

Tuulivoimaloiden rakentamisessa on otettava huomioon lintujen ja lepakoiden luontaiset pesimä- ja ruokailupaikat, jotta vaikutukset lajien elinympäristöön voidaan minimoida. Rakentaminen lintujen tai lepakoiden lisääntymisalueilla saattaa pirstaloida tai jopa tuhota alueita. Rakentaminen saattaa tietyillä alueilla vaikeuttaa myös lintujen ravinnonhankintaa. Kaikki Suomessa esiintyvät lepakkolajit ovat rauhoitettuja ja niiden lisääntymis- ja levähdyspaikkojen tuhoaminen tai heikentäminen on kiellettyä. [44,45,46]

Aiemmin mainitun metatutkimuksen mukaan fossiilisilla polttoaineilla toimivat laitokset ovat 17 kertaa vaarallisempia linnuille kuin tuulivoimalat, kun mitataan kuolleisuutta tuotettua energiaa kohden. Fossiilisisillä polttoaineilla toimivien voimaloiden suurimmat riskit linnuille ovat ilmastonmuutoksen aiheuttamat haitalliset muutokset esimerkiksi lintujen

elinympäristöissä sekä itse voimalan toiminnan aiheuttama lähiympäristöjen saastuminen. [4] Vastaavanlaisia tuloksia on saatu myös muissakin tutkimuksissa, joten voidaan melko luotettavasti sanoa, että tuulivoimalat ovat vähemmän haitallisia linnuille kuin esimerkiksi fossiililla polttoaineilla toimivat laitokset ja ydinvoimalat. Tämä ei kuitenkaan tarkoita, että vaikutukset lintuihin voitaisiin sivuuttaa. Rakennuspaikkaa valitessa huolellisella lintu- ja lepakkopopulaatioiden taustatutkimuksella voidaan merkittävästi vaikuttaa niille syntyviin haittoihin. Monessa maassa, kuten Suomessa, edellytetäänkin linnustoon ja lepakoihin kohdistuvien vaikutuksen selvittämistä ja minimoimista niin tuulivoima-alueiden kaavoituksissa kuin yksityiskohtaisissa suunnitelmissakin [44,47]

## 6.2 Vedenalainen luonto

Offshore-tuulivoimaloilla on joitakin vaikutuksia vesistöekosysteemeihin erityisesti rakennusvaiheessa. Offshore-voimaloiden rakentamiseen liittyy kiinteästi pohjan muokkaaminen sopivaksi esimerkiksi ruoppaamalla, perustusten rakentaminen sekä merikaapeleiden vetäminen. Nämä aiheuttavat muutoksia pohjan kasvillisuudessa, veden ravinnepitoisuudessa ja sameudessa sekä veden virtauksessa, jolloin elinympäristö muuttuu merkittävästi. Muutokset elinympäristössä voivat saada kalat jättämään koko alueen tai aiheuttaa kalojen lisääntymisalueiden pirstoutumista ja elintilan pienentymistä. Vaikutusten voimakkuus riippuu monesta tekijästä, kuten tarvittavien rakennustöiden laajuudesta ja kestosta, sekä alueen ekosysteemin ominaisuuksista. [44]

Joissain tapauksissa rakennustöiden seurauksena on puolestaan havaittu jopa positiivisia vaikutuksia alueen kalakannoissa. Vaikutukset ovat johtuneet siitä, että perustusten pinnat ovat toimineet kiinnittymispintoina makroleville ja pohjaeläimille, jotka houkuttelevat alueelle kaloja, jolloin alueen vedenalainen monimuotoisuus on lisääntynyt. Uusi ympäristö saattaa suosia eri lajeja kuin aikaisemmin, jolloin alueen lajirakenne saattaa muuttua. Offshore-voimaloiden suunnitteluvaiheessa onkin tärkeää analysoida alueen ekosysteemi huolellisesti ottaen huomioon esimerkiksi kalaston lisääntymisalueet ja vaellusreitit. [44]

On havaittu, että offshore-voimaloiden rakennustöiden aikainen melu häiritsee merinisäkkäitä kuten hylkeitä. Kuuloaisti on monille merinisäkkäille erittäin tärkeä aisti niin navigoinnissa, saalistamisessa kuin keskinäisessä kommunikoinnissakin, joten ne ovat herkkiä ylimääräisille äänille. Hylkeiden käyttäytymistä tutkittaessa niiden kuitenkin havaittiin sopeutuvan itse rakenteisiin niiden valmistuttua, joten pidempiaikaisia vaikutuksia voimaloista ei juurikaan aiheudu. Rakennustöiden aikana on siis hyvä välttää ylimääräisen vedenalaisen melun tuottamista. [44,49]

## 7. TUULIVOIMALAN ÄÄNI JA MELU

Tuulivoimaloiden toiminta aiheuttaa melua niin kuultavan äänen taajuudella kuin ihmisen kuuloalueen ulkopuolellakin. Tuulivoimaloiden tuottaman melun vaikutuksista on keskusteltu paljon viime vuosina: monet ihmiset ovat kokeneet saavansa melusta erilaisia fysiologisia oireita. Lisäksi melu koetaan joskus häiritseväksi ja esimerkiksi nukkumista haittaavaksi. Tässä luvussa tarkastellaan, millaisia tuloksia melun vaikutuksista on saatu eri tutkimuksissa sekä tutkitaan, kuinka meluvaikutukset on otettava huomioon tuulivoimalan rakentamisessa. Omassa alaluvussa pohditaan tuulivoimaloiden tuottaman infräänien ja fysiologisten oireiden mahdollista yhteyttä.

### 7.1 Kuultava ääni

Ääni on väliaineessa etenevää mekaanista värähtelyliikettä, jonka ihmiskeho muuntaa kuuloaistimukseksi. Äänen voimakkuutta mitataan yleisesti logaritmisista asteikkoja noudattavalla yksiköllä, jota kutsutaan *desibeliksi* (dB). Äänen taajuutta puolestaan mitataan yksiköllä *hertsi* (Hz), joka kertoo kuinka monta kertaa aaltoliike värähtelee sekunnissa. Ihmisen kuuloalueeksi tulkitaan yleisesti noin 20 - 20 000 hertsiä, eli tämän taajuusalueen ulkopuolisia ääniä ihminen ei normaalisti kykene kuulemaan. Tarkalleen ottaen kuuloaistimukset heikkenevät asteittain taajuuden pienentyessä, ja tarpeeksi kovalla äänenpaineella tavallinen ihminen voi kuulla merkittävästi 20 hertsiä alittaviakin äänentaajuuksia. [50]

Äänen vaimeneminen sen edetessä riippuu monesta asiasta, kuten maan pinnanmuodoista, fyysisistä esteistä kuten kasvillisuudesta ja rakennuksista, sekä sääoloista kuten tuulesta ja lämpötilasta. Ääni vaimenee luontaisesti jokseenkin vakionopeudella sen hajaantuessa laajemmalle alalle, mutta edellä mainitut tekijät voivat aiheuttaa lisävaimenusta. Äänen hajaantumisvaimeneminen ei riipu äänen taajuudesta, mutta lisävaimenuksen voimakkuus riippuu myös taajuudesta. Esimerkiksi ilmakehä ja rakenteet absorboivat tehokkaammin suurempitaajuisia ääniä. [50]

Tuulivoimalan tuottamat äänet syntyvät korkealla maanpinnasta, jolloin ääniaallot pääsevät etenemään melko esteettä. Voimalan melusta valtaosa on lapojen pyörimisen aiheuttamaa aerodynaamista melua, joka jakaantuu laajalle taajuusalueelle eli on laajakaistaista. Taajuusjakauma ja äänenpainetaso riippuvat merkittävästi turbiinin koosta ja suunnittelusta, tuulennopeudesta ja lapojen pyörimisnopeudesta. Tuulivoimalan melulle on tyypillistä äänenvoimakkuuden jaksollinen vaihtelu, jota nimitetään yleisesti nimellä



merkityksellinen sykintä tai amplitudimodulaatio. Merkityksellisen sykinnän on todettu lisäävän melun häiritsevyyttä. [50]

Valtioneuvosto on määrittänyt laskennallisen melutason ohjearvot, jotka eivät saa ylittyä. Suomessa ei ole määritetty minkäänlaista pienintä sallittua tuulivoimalan etäisyyttä asutukseen, sillä kuten edellä todettiin, äänen vaimeneminen riippuu hyvin monesta tekijästä. Ohjearvojen mukaan esimerkiksi pysyvän tai vapaa-ajan asutuksen, oppilaitosten tai virkistysalueiden ulkomelutaso ei saa päivällä ylittää 45 dB:n tasoa. Kohteissa, joissa yleisesti vietetään yötä, ei ulkomelutaso saa yöaikaan ylittää 40 dB:ä. Tämä koskee mm. asutusta, hoitolaitoksia sekä leirintäalueita. Ohjearvot ovat linjassa Maailman terveysjärjestö WHO:n suositusten kanssa. Lisäksi asetus tiukentaa äänitasovaatimuksia, mikäli tuulivoimalan melu sisältää merkityksellistä sykintää. Tällöin äänenvoimakkuuden mitaustulokseen lisätään 5 dB ennen kuin sitä vertaillaan edellä esitettyihin ohjearvoihin. [51]

Tuulivoimaloiden tuottaman melun häiritsevyyttä on selvitetty useissa eri tutkimuksissa. On kuitenkin hyvin subjektiivista, kuinka melun häiritsevyys koetaan. Vaikka tuulivoimamelu olisi voimakkuudeltaan samansuuruista tai jopa pienempää kuin ympäröivä taustamelu, saatetaan tuulivoimamelu silti kokea häiritsevämpänä. Tähän myötävaikuttaa tuulivoimamelun akustiset erityispiirteet, kuten aiemmin mainittu merkityksellinen sykintä. Lisäksi ihmisten kokemaan häiritsevyyteen vaikuttaa liuta ei-akustisia piirteitä, kuten näköyhteys voimalaan, välke, asenteet tuulivoimaloita kohden sekä huoli äänien terveyshaitoista. [51] Lähiasukkaiden kokemia meluhaittoja ei siis voida kokonaan hävittää vain huolehtimalla, että äänenvoimakkuuden tasot asutuksessa ovat riittävän alhaiset.

Eri tutkimuksissa saadut tulokset melun häiritsevyydestä poikkeavat melko paljon toisistaan, minkä vuoksi yksittäisistä tutkimuksista ei voida tehdä kokonaisvaltaisia johtopäätöksiä. Seuraavaksi esitellään kuitenkin joitakin tuloksia, joita häiritsevyyttä koskevissa tutkimuksissa on saatu.

Työterveyslaitoksen julkaisi vuonna 2014 metatutkimuksen [52], jossa analysoitiin 13 eri puolilla maailmaa toteutettua tutkimusta tuulivoimaloiden melun vaikutuksista. Tässä metatutkimuksessa todettiin, että noin 10 % ihmisistä kokee tuulivoimaloiden melun häiritseväksi asunnon sisällä silloin, kun melun voimakkuus ulkopuolella ylittää 40 dB. Tätä suurempien äänenvoimakkuuksien osalta ei ole luotettavaa dataa pienien vastaajamäärien vuoksi.

Terveiden ja hyvinvoinnin laitos suoritti vuosina 2015–2016 kyselytutkimuksen [53], jossa vastaajina oli yli 1500 tuulivoiman tuotantoalueella asuvaa suomalaista. Tutkimukseen sisällytettiin yhdeksän eri tuotantoaluetta eri puolilta Suomea. Kyselyn perusteella

lähimmällä asutusvyöhykkeellä (alle 2,5 km lähimmästä voimalasta) asuvista alle 2 % kertoi tuulivoimamelun häiritsevän sisätaloissa paljon tai erittäin paljon. Vastaajista noin 11 % kertoi melun häiritsevän vähän tai jonkin verran. Samoista vastaajista alle 2 % ilmoitti melun häiritsevän nukkumista paljon tai erittäin paljon ja noin 6 % vähän tai jonkin verran. Ulkona vastaajista noin 4 % kertoi melun häiritsevän paljon tai erittäin paljon ja noin 20 % vähän tai jonkin verran.

Toistaiseksi kattavia tutkimuksia tuulivoimamelun koetuista vaikutuksista on vielä melko vähän. Lisäksi kyselytutkimukset sisältävät useita epävarmuustekijöitä liittyen mm. kyselymenetelmiin, äänenvoimakkuuden tasoihin sekä aineistojen laajuuteen.

## 7.2 Infraääni

Infraäänellä tarkoitetaan sellaista ääntä, jonka taajuus on ihmisen kuuloalueen alapuolella. Infraäänen rajaksi on sovittu 20 Hz. Tuulivoimalat tuottavat siis laajakaistaista ääntä, johon sisältyy myös merkittävä määrä infraääntä. Tuulivoimaloiden lisäksi äänenvoimakkuudeltaan vastaavia infraääniä syntyy arkipäiväisessä elämässä monista lähteistä, kuten liikenteestä, tuulesta ja esimerkiksi astianpesukoneesta. Ihmiset ovat kuitenkin kokeneet tuulivoimaloiden infraäänien aiheuttavan terveysoireita, joten mahdollista yhteyttä on ollut syytä tutkia. [54]

Suomessa suuri määrä tuulivoimaloiden lähellä asuvia ihmisiä on raportoinut saavansa terveysoireita ja yhdistänyt ne voimaloiden infraääneen. Suomen hallitus tilasi laajan tutkimuksen infraäänien terveysvaikutuksista selvittääkseen, onko raportoiduilla terveysvaikutuksilla ja infraäänellä todellinen yhteys. Vuonna 2018 käynnistetty tutkimus valmistui keväällä 2020. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan rahoittaman tutkimuksen toteuttivat yhteistyössä Teknologian tutkimuskeskus VTT, Terveystieteiden tutkimuskeskus THL, Työterveyslaitos sekä Helsingin yliopisto. Ennen tätä tutkimusta infraäänien vaikutuksia on tutkittu maailmalla melko vähän, joten tarvetta tiedolle on ollut maailmanlaajuisesti. Tutkimus toteaa yksiselitteisesti, että altistuminen tuulivoimaloiden infraäänelle ei selitä siihen yhdistettyjä oireita ja että ihmiset eivät pysty havaitsemaan tuulivoimalan tuottamaa infraääntä. [54,56]

Laajaan selvitykseen kuului kolme eri osaa: pitkäaikaismittaukset, kyselytutkimus sekä kuuntelukokeet. Pitkäaikaismittauksissa mitattiin infraäänitasoja lähes vuoden ajan kahden eri tuulipuiston ympäristössä talojen sisä- ja ulkopuolilta. Mittaukset kohdistettiin alueille, joissa asukkaat olivat kokeneet terveysoireita ja yhdistäneet ne tuulivoimaloiden infraääneen. Mittaukset osoittivat infraäänitasojen olevat selvästi suuremmat kuin ennen

voimaloiden rakentamista. Infraäänitasojen todettiin olevan samaa suuruusluokkaa kuin kaupunkiympäristöissä. [55]

Kyselytutkimuksessa kyseltiin satunnaisesti valituilta alueen asukkailta kokemuksia tuulivoimaloista ja erityisesti infraääniin yhdistetyistä oireista. Vastauksista ilmeni, että alle 2,5 kilometrin etäisyydellä lähimmästä tuulivoimalasta 15 % vastaajista koki omien kokemuksiansa mukaan infraäänistä aiheutuvia oireita. Vastaava osuus 20 kilometrin etäisyyssäteiden sisällä oli 5 %. Koettuja oireita oli hyvin erilaisia, ja kolmasosa vastaajista koki oireiden olevan vakavia. Oireita kokeneiden vastaajien keskuudessa mm. krooniset sairaudet, toiminnallinen oireilu sekä negatiivinen käsitys tuulivoimaloiden terveysvaikutuksista olivat yleisempiä kuin keskimäärin. [55]

Kuuntelukokeet koostuivat kahdesta osasta: infraäänien havaitsemiskokeesta sekä häiritsevyysskokeesta. Havaitsemiskokeessa koehenkilöille toistettiin äänipareittain tuulivoimala-alueilta nauhoitettuja ääninäytteitä. Puolessa kokeista ääniparit olivat muuten identtisiä, mutta toisesta ääninäytteestä oli suodatettu kaikki infraäänien taajuudet pois. Toisessa puoliskossa molemmat näytteet ääniparissa olivat täysin identtiset. Tavoitteena oli siis tutkia, erottavatko koehenkilöt ne ääninäytteet, joissa toinen parista oli poikkeava. Tulos oli aiempia tutkimuksia vastaava: koehenkilöt eivät kyenneet erottamaan infraäänien esiintymistä ääninäytteissä. [55]

Häiritsevyysskokeessa koehenkilöille toistettiin lyhyitä ääninäytteitä ja pyydettiin arvioimaan niiden häiritsevyyttä. Puolesta ääninäytteistä oli suodatettu pois infraäänien. Lisäksi koehenkilöt altistettiin pidemmäksi aikaa ääninäytteille, joista osa sisälsi infraääntä, jotta voitiin tutkia fysiologisia reaktioita luotettavasti. Ääninäytteet koettiin sitä häiritsevämiksi, mitä lähempänä tuotantoaluetta ääni oli nauhoitettu, jolloin äänenpainetasot olivat myös suurempia. Ääninäytteiden infraäänisisältö ei kuitenkaan vaikuttanut häiritsevyyteen. Tuulivoimalan äänet koettiin siis yhtä häiritseviksi riippumatta siitä, sisälsikö näyte infraääntä. Sama tulos saatiin niin oireilevien kuin oireita kokemattomienkin koehenkilöiden osalta. Myöskään mitatuissa fysiologisissa reaktioissa ei ollut eroja sen perusteella, sisälsikö näyte infraääntä. Kokonaisuutena tutkimuksen tulos on siis, että infraäänellä ei ole todellista yhteyttä ihmisten kokemiin terveysoireisiin. [55]

Vaikka infraäänien ja terveysoireiden välillä ei ole havaittu yhteyttä, kokevat ihmiset silti todellisia fysiologisia oireita. Infraäänien ja terveysoireiden yhteyttä onkin tutkittu myös psykologisesta näkökulmasta. Monissa yhteyksissä, esimerkiksi lumelääkkeiden testauksessa, on todettu ihmisten saavan todellisia oireita pelkästään kielteisten odotusten vuoksi. Tätä kutsutaan *nocebo-vaikutukseksi*. Aucklandin yliopiston tutkijat tekivät

vuonna 2013 kokeita selvittääkseen, voivatko pelkästään ihmisten odotukset ja huoli infraäänestä aiheuttaa oireita [57].

Tutkimuksessa koehenkilöt altistettiin 10 minuutin jaksoissa infraäänelle sekä pelkälle hiljaisuudelle kertomatta järjestystä. Koehenkilöt jaettiin kahteen ryhmään; toiselle ryhmälle annettiin materiaalia, jossa kerrottiin infraäänien aiheuttavan negatiivisia vaikutuksia ja toiselle ryhmälle annettiin materiaalia, jonka mukaan infraäänillä ei ole mitään terveysvaikutuksia. Tarkoitus oli siis luoda erilaiset oletukset kokeen aikana syntyville vaikutuksille. Kokeessa huomattiin, että negatiiviset lähtöoletukset saaneet koehenkilöt raportoivat huomattavasti enemmän ja voimakkuudeltaan kovempia oireita kuin toinen ryhmä. Oireet eivät riippuneet siitä, altistettiin henkilöitä kokeessa todelliselle infraäänelle vai ei. Tutkimuksen tulokset antavat siis viitteitä siitä, että psykologiset oletukset voisivat olla linkki raportoitujen oireiden ja tuulivoimaloiden välillä. [57]

Maailmalla on suoritettu myös muita infraäänien vaikutuksia koskevia tutkimuksia, joihin ei yhtä laajoja ja perusteellisia kuin edellä esitellyssä suomalaistutkimuksessa. Myöskään niissä ei ole havaittu yhteyttä infraäänien ja siihen liitettyjen oireiden välillä. Viitteitä nocebo-vaikutuksen merkittävästä roolista ihmisten kokemissa oireissa on saatu jo useissa yhteyksissä. Tiedeyhteisössä vallitseekin melko vahva käsitys siitä, että infraäänit itsessään eivät aiheuta terveysriskejä. Onkin tarpeen keskittyä siihen, että ihmisille välitetään luotettavaa, tieteellisesti osoitettua tietoa ja että vältetään perusteettomien väitteiden leviämistä. [56]

## 8. YHTEENVETO

Tässä kandidaatintyössä oli tarkoituksena luoda yleiskuva tuulivoiman hyödyntämiseen liittyvistä tärkeimmistä ympäristövaikutuksista hyödyntämällä olemassa olevia tutkimustuloksia. Työn aluksi esiteltiin ympäristövaikutusten arviointiin käytetyn elinkaariarvioinnin pääperiaatteet, koska se on tärkeä ja paljon käytetty työkalu tuotteen tai palvelun elinkaaren ympäristövaikutusten arvioinnissa. Tässä työssä ei kuitenkaan suoritettu elinkaariarviointia. Elinkaariarvioinnissa tuotteen tai palvelun elinkaari jaetaan yksittäisiä vaiheita kuvaaviin osaprosesseihin, joiden aikana syntyviä ympäristövaikutuksia voidaan tutkia. Tuulivoimalan elinkaaren voitaisiin ajatella koostuvan esimerkiksi raaka-aineiden tuotannosta, voimalan osien rakentamisesta, kuljetuksesta ja pystyttämisestä, käytöstä ja huollosta sekä hävittämisestä ja kierrättämisestä. Kun yksittäisten osien ympäristövaikutukset on tunnistettu, koko elinkaaren ympäristövaikutuksia voidaan sitten käsitellä näistä osista muodostuvana kokonaisuutena.

Elinkaariarvioinnin esittelyn jälkeen esiteltiin tuulivoimalan elinkaari ja sen päävaiheet ympäristönäkökulmasta. Ensimmäisenä vaiheena käytiin läpi tuulivoimalan rakentaminen, joka koostuu raaka-aineiden hankinnasta, komponenttien rakentamisesta sekä osien kuljetuksesta ja pystytyksestä. Tuulivoimalan todettiin koostuvan lähinnä hyvin tavallisista materiaaleista, kuten teräksestä, alumiinista, valuraudasta, lasikuidusta ja muovista. Lisäksi materiaalia tarvitaan voimalan perustuksiin, jotka onshore-voimaloilla koostuvat yleensä betonista ja offshore-voimaloilla teräspaaluista. Rakennusvaiheen todettiin aiheuttavan onshore-kohteilla yli 90 % ja offshore-kohteilla yli 80 % elinkaaren aikaisista kasvihuonepäästöistä.

Seuraava elinkaaren vaihe on käyttö ja huolto, eli keskimäärin 20–25 vuotta kestävä operointivaihe. Tässä vaiheessa päästöt aiheutuvat tarvittavista huoltotoimenpiteistä ja tarkemmin lähinnä niihin liittyvästä logistiikasta. Todettiin, että tuulivoimaloille tehdään tyypillisesti noin kaksi suunniteltua huoltoa vuodessa, minkä lisäksi tarvitaan noin neljä suunnittelematonta huoltokäyntiä. Käyttövaiheen päästöt ovat korkeammat offshore-voimaloilla haastavamman sijainnin vuoksi.

Elinkaaren viimeinen vaihe on purkaminen ja kierrätys. Kierrätyksellä voidaan merkittävästi vähentää tuulivoimalan kokonaispäästöjä, sillä materiaalien valmistus on suurin päästöjen aiheuttaja. Kierrätyksen kokonaispäästöjä vähentävä vaikutus on onshore-kohteilla noin 30–50 %:n ja offshore-kohteilla 25 %:n luokkaa. Tuulivoimalan metalliosat

saadaan kierrätettyä lähes täysin, mutta lasikuitukomposiitista koostuvien lapojen kierrättäminen on haastavaa. Yleensä lapajäte joko haudataan maahan tai poltetaan. Todettiin kuitenkin, että monissa maissa on tehty onnistuneita kokeiluita mm. murskatun lapajätteen hyödyntämisestä rakennusmateriaalina, joten tulevaisuudessa kierrätys saattaa olla mahdollista.

Onshore-tuulivoimalan koko elinkaaren hiilijalanjäljelle saatiin laskettua eri elinkaariarviointien tulosten pohjalta arvoksi 11,2 gCO<sub>2</sub>-ekv/kWh. Vastaava luku offshore-voimaloille oli 16,5 gCO<sub>2</sub>-ekv/kWh; hieman suurempi hiilijalanjälki johtuu siitä, että merellä rakentaminen on työläämpää. Mitattujen hiilijalanjälkien vaihteluväli oli melko suuri, mutta vertailtaessa muihin energiantuotantomuotoihin todettiin tuulivoiman olevan joka tapauksessa hiilijalanjäljeltään hyvin pieni. Hiilijalanjäljen huomattiin olevan murto-osa fossiilisten polttoaineiden hiilijalanjäljestä ja jopa hieman pienempi kuin vesivoiman ja aurinkovoiman hiilijalanjäljen. Ydinvoiman kanssa hiilijalanjälki oli vastaava. Tämän perusteella voidaankin todeta tuulivoiman olevan hyvin vähäpäästöistä ja ilmastomuutoksen ehkäisyn kannalta erittäin ympäristöystävällinen vaihtoehto sähkön tuotannolle. Tuulivoiman lisääntymisen todettiin kuitenkin johtavan myös välillisiin päästövaikutuksiin, jotka johtuvat kasvaneesta säätösähkön ja energian varastoinnin tarpeesta. Näiden välillisten tekijöiden laskennallista vaikutusta on vaikea arvioida, mutta tuulivoiman kokonaispäästöt ovat joka tapauksessa hyvin pienet niistäkin huolimatta.

Hiilijalanjäljen jälkeen pohdittiin suoravetoisten voimaloiden generaattoreissa käytettyjen harvinaisten maametallien ympäristövaikutuksia. Suoravetoisten voimaloiden suosio on ollut kasvussa, joten myös harvinaisten maametallien tarve on lisääntynyt. Näiden metallien louhiminen tapahtuu Kiinassa monopolituotantona, ja toiminnan vastuullisuus on herättänyt huolia. Ilman huolellista suunnittelua harvinaisten maametallien louhinta aiheuttaa vakavia riskejä ympäristölle, kuten myrkyllisten aineiden vapautumista maaperään sekä haitallisten pienhiukkaspäästöjen leviämistä ilmaan. Kiinassa on vuosien saatossa toiminut monia laittomia kaivoksia, joiden toiminnan seurauksena kaivosalueita on turmeltunut. Kiinan viranomaiset ovat onneksi viime vuosina tajunneet ympäristöriskien vakavuuden. Tulevaisuudessa myös harvinaisten maametallien riittävyys voi olla ongelma. Eräs vaihtoehto niille voisi olla suprajohdettavien generaattoreiden käyttö suoravetoisissa voimaloissa.

Tuulivoimaloiden todettiin vaikuttavan jonkin verran myös elolliseen luontoon, etenkin lintuihin ja lepakoihin. Suorat törmäykset tuulivoimaloiden lapoihin tappavat niin lintuja kuin lepakoitakin. Tuulivoimaloiden osuus kokonaiskuolemista on kuitenkin erittäin pieni, ja esimerkiksi fossiilisilla polttoaineilla toimivien voimaloiden huomattiin olevan linnuille

erään tutkimuksen mukaan 17 kertaa vaarallisempia. Törmäyskuolemia voidaan kuitenkin välttää huolellisella sijoittamisella. Törmäyskuolemien lisäksi tuulivoimalat voivat vaikuttaa myös lintujen ja lepakoiden elinympäristöön, kuten pesimä- ja ruokailualueisiin. Offshore-voimalat voivat puolestaan vaikuttaa vedenalaisiin ekosysteemeihin. Lisäksi rakennustyömaan aikainen melu häiritsee merinisäkkäitä. Tärkeintä kaikille eläimille aiheutuvan haitan minimoinnissa on huolellinen suunnittelu, johon kuuluu ennen rakentamista tehtävät kattavat selvitykset paikalla esiintyvien populaatioiden käyttäytymisestä.

Viimeisessä asialuvussa pohdittiin tuulivoimaloiden meluvaikutuksia. Aluksi selvitettiin kuultavan äänen meluvaikutuksia. Todettiin, että pieni osa ihmisistä kokee tuulivoimaloiden melun häiritseväksi ja onkin syytä välttää tuulivoimaloiden sijoittamista liian lähelle asutusta. Melun häiritsevyyteen vaikuttavat lisäksi psykologiset tekijät, kuten näköyhteys voimalaan ja asenteet tuulivoimaa kohtaan. Lisäksi luvussa todettiin, että infraäänellä ei ole yhteyttä ihmisten kokemiin terveysvaikutuksiin, vaan että ihmisten kokemat terveysoireet johtuvat mitä todennäköisimmin nocebo-vaikutuksesta eli psykologisista syistä. Ilmiön välttämiseksi on jatkossa ensiarvoisen tärkeää välittää ihmisille luotettavaa, uutta tutkimustietoa ja estää perusteettomien väitteiden leviämistä.

# LÄHTEET

- [1] CO2 emissions by sector, World 1990-2017, International Energy Agency (IEA), verkkoaineisto. Saatavissa (viitattu 28.3.2020): <https://www.iea.org/data-and-statistics/?country=WORLD&fuel=CO2%20emissions&indicator=CO2%20emissions%20by%20sector>
- [2] Sähkön ja lämmön tuotanto Suomessa 2018, Tilastokeskus, 2019, verkkoaineisto. Saatavissa (viitattu 28.3.2020): [https://www.stat.fi/til/salatuo/2018/salatuo\\_2018\\_2019-11-01\\_tie\\_001\\_fi.html](https://www.stat.fi/til/salatuo/2018/salatuo_2018_2019-11-01_tie_001_fi.html)
- [3] Sähkön ja lämmön tuotanto Suomessa 2010, Tilastokeskus, 2011, verkkoaineisto. Saatavissa (viitattu 28.3.2020): [https://tilastokeskus.fi/til/salatuo/2010/salatuo\\_2010\\_2011-10-06\\_tie\\_001\\_fi.html](https://tilastokeskus.fi/til/salatuo/2010/salatuo_2010_2011-10-06_tie_001_fi.html)
- [4] ISO 14040, Environmental management – life cycle assessment – principles and framework, 2006. Saatavissa: <https://www.iso.org/standard/37456.html>
- [5] ISO 14044, Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines, 2006. Saatavissa: <https://www.iso.org/standard/38498.html>
- [6] ISO 14067, Greenhouse gases — Carbon footprint of products — Requirements and guidelines for quantification, 2018. Saatavissa: <https://www.iso.org/standard/71206.html>
- [7] M. Curran, Life cycle assessment student handbook, Scrivener Publishing, 2015.
- [8] M. Brander, R. Tipper, C. Hutchison, G. Davis, Consequential and Attributional Approaches to LCA: a Guide to Policy Makers with Specific Reference to Greenhouse Gas LCA of Biofuels, Ecometrica, 2008, verkkoaineisto. Saatavilla (viitattu 27.3.2020): [http://www.globalbioenergy.org/uploads/media/0804\\_Ecometrica\\_-\\_Consequential\\_and\\_attributional\\_approaches\\_to\\_LCA.pdf](http://www.globalbioenergy.org/uploads/media/0804_Ecometrica_-_Consequential_and_attributional_approaches_to_LCA.pdf) LUKU 2!
- [9] Schreiber A, Marx J, Zapp P, Comparative life cycle assessment of electricity generation by different wind turbine types, Journal of Cleaner Production, 2019. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652619320116>
- [10] C. Mone, M. Hand, M. Bolinger, J. Rand, D. Heimiller, J. Ho, 2015 Cost of Wind Energy Review, National Renewable Energy Laboratory, 2017. Saatavilla: <https://www.nrel.gov/docs/fy17osti/66861.pdf>
- [11] J. Ashlock, V. Schaefer, Foundations for wind turbines, Iowa State University, 2011. Saatavilla (viitattu 29.3.2020): <http://home.eng.iastate.edu/~jdm/engr340-2011/ENGR%20340%20-%20Foundations%20%20-%20Ashlock%20-%20Schaefer.pdf>
- [12] Tuulivoimaloiden rakenne, Suomen Tuulivoimayhdistys, verkkoaineisto. Saatavissa (viitattu 29.3.2020): <https://www.tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoimatekniikka/tuulivoimaloiden-rakenne>



- [13] J. Kaldellis, D. Apostolou, Life cycle energy and carbon footprint of offshore wind energy. Comparison with onshore counterpart, *Renewable Energy*, 2017. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148117301258>
- [14] J. Jensen, Evaluating the environmental impacts of recycling wind turbines, *Wind Energy*, 2019. Saatavissa: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/we.2287>
- [15] Y. Wang, T. Sun, Life cycle assessment of CO2 emissions from wind power plants: Methodology and case studies, *Renewable Energy*, 2012. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148112000043>
- [16] J. Xie, J. Fu, S. Liu, W. Hwang, Assessments of carbon footprint and energy analysis of three wind farms, *Journal of Cleaner Production*, 2020 LUKU 3.1.!
- [17] Y-F.Huang, X-J.Gan, P-T.Chiueh, Life cycle assessment and net energy analysis of offshore wind power systems, *Renewable Energy*, 2017. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148116309156>
- [18] V. Turkia, H. Holttinen, Tuulivoiman tuotantotilastot: Vuosiraportti 2011, VTT, 2013. Saatavissa: <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/technology/2013/T74.pdf>
- [19] Mikä on tuulivoimalan elinkaari ja voiko ne kierrättää?, Suomen Tuulivoimayhdistys ry, verkkoaineisto. Saatavissa (viitattu 27.4.2020): <https://www.tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta/usein-kysytyt-kysymykset/mika-on-tuulivoimalan-elinkaari-ja-voiko-ne-kierrattaa>
- [20] A. Bonou, A. Laurent, SI. Olsen, Life cycle assessment of onshore and offshore wind energy-from theory to application, *Applied Energy*, 2016. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261916309990>
- [21] J. Jensen, K. Skelton, Wind turbine blade recycling: Experiences, challenges and possibilities in a circular economy, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032118306233>
- [22] H. Paalatie, M. Vilkki, Lapojen uusi elämä, Suomen Tuulivoimayhdistys ry, verkkoaineisto. Saatavissa (viitattu 27.4.2020): <http://www.tuulivoimalehti.fi/aiheet/lapojen-uusi-elama.html>
- [23] Understanding Global Warming Potentials, United States Environmental Protection Agency, verkkoaineisto. Saatavilla (viitattu 28.4.2020): <https://www.epa.gov/ghgemissions/understanding-global-warming-potentials>
- [24] K. Oebels, S. Pacca, Life cycle assessment of an onshore wind farm located at the northeastern coast of Brazil, *Renewable Energy*, 2013. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148112006714>
- [25] S. Al-Behadili, W. El-Osta, Life Cycle Assessment of Dernah (Libya) wind farm, *Renewable Energy*, 2015. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148115004176>

- [26] I. Kumar, WE. Tyner, KC. Sinha, Input–output life cycle environmental assessment of greenhouse gas emissions from utility scale wind energy in the United States, *Energy Policy*, 2016. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301421515302160>
- [27] L. Tsai, JC. Kelly, BS. Simon, RM. Chalot, GA. Keoleian, Life Cycle Assessment of Offshore Wind Farm Siting: Effects of Locational Factors, Lake Depth, and Distance from Shore; *Journal of Industrial Ecology*, 2016. Saatavissa: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/jiec.12400>
- [28] A. Kadiyala, R. Kommalapati, Z. Huque, Characterization of the life cycle greenhouse gas emissions from wind electricity generation systems, *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 2017. Saatavissa: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40095-016-0221-5>
- [29] S. Schlömer, T. Bruckner, L. Fulton, E. Hertwich, A. McKinnon, D. Perczyk, J. Roy, R. Schaeffer, R. Sims, P. Smith, R. Wiser, Annex III: Technology-specific cost and performance parameters. In: *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*, Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014. Saatavissa: [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc\\_wg3\\_ar5\\_annex-iii.pdf#page=7](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_annex-iii.pdf#page=7)
- [30] Electricity generation by source, World 1990-2017, International Energy Agency (IEA), verkkoaineisto. Saatavissa (viitattu 16.3.2020): <https://www.iea.org/data-and-statistics/?country=WORLD&fuel=Electricity%20and%20heat&indicator=Electricity%20generation%20by%20source>
- [31] Electricity generation by source, Norway, International Energy Agency (IEA), verkkoaineisto. Saatavissa (viitattu 16.3.2020): <https://www.iea.org/countries/norway>
- [32] A. Granskog, C. Gulli, T. Melgin, T. Naucier, E. Speelman, L. Toivola, D. Walter, Cost-efficient emission reduction pathway to 2030 for Finland, Sitra, 2018. Saatavissa: <https://media.sitra.fi/2018/11/30103309/cost-efficient-emission-reduction-pathway-to-2030-for-finland1.pdf>
- [33] Hallitusohjelma: 3.1 Hiilineutraali ja luonnon monimuotoisuuden turvaava Suomi, Valtioneuvosto, verkkoaineisto. Saatavissa (viitattu 25.4.2020): <https://valtioneuvosto.fi/marinin-hallitus/hallitusohjelma/hiilineutraali-ja-luonnon-monimuotoisuuden-turvaava-suomi>
- [34] Tuulivoima ja säätövoima, Suomen Tuulivoimayhdistys ry, verkkoaineisto. Saatavissa (viitattu 17.3.2020): [https://www.tuulivoimayhdistys.fi/filebank/1443-Tuulivoima\\_ja\\_saatoivoima.pdf](https://www.tuulivoimayhdistys.fi/filebank/1443-Tuulivoima_ja_saatoivoima.pdf)
- [35] S. Dolan, G. Heath, Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Utility-Scale Wind Power, Yale University, 2012. Saatavissa: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.1530-9290.2012.00464.x>
- [36] Risto Mikkonen, DEE-54010 Suprajohtavuus sähköverkossa: luentomoniste, Tampereen Teknillinen Yliopisto, 2014.
- [37] R. Irany, A. Kumar, D. Gnoth, A. Guesmi, Latest trends in energy storage, World Energy Council, 2019. Saatavissa: [https://www.worldenergy.org/assets/downloads/ESM\\_Final\\_Report\\_05-Nov-2019.pdf](https://www.worldenergy.org/assets/downloads/ESM_Final_Report_05-Nov-2019.pdf)

- [38] Global Market Share by Turbine Technology in 2018, Global Wind Energy Council, verkkoaineisto. Saatavissa (viitattu 19.3.2020): <https://gwec.net/gwec-1-in-5-wind-turbines-are-installed-by-vestas-according-to-new-market-intelligence-report/>
- [39] C. Venås, E. Hertwich, A. Arvesen, Life cycle assessment of electric power generation by wind turbines containing rare earth magnets, NTNU, 2015.
- [40] D. Schüler, M. Buchert, R. Liu, S. Dittrich, C. Merz, Study on Rare Earths and Their Recycling, Öko-Institut, 2011
- [41] Pavel CC, Lacal-Aránegui R, Marmier A, Schüler D, Tzimas E, Buchert M, et al. Substitution strategies for reducing the use of rare earths in wind turbines, Resources Policy, 2017.
- [42] M. Standaert, China Wrestles with the Toxic Aftermath of Rare Earth Mining, Yale Environment 360, verkkoaineisto. Saatavissa (viitattu 20.3.2020): <https://e360.yale.edu/features/china-wrestles-with-the-toxic-aftermath-of-rare-earth-mining>
- [43] EcoSwing-projekti, verkkoaineisto. Saatavissa (viitattu 29.4.2020): <https://ecoswing.eu/project>
- [44] Tuulivoimarakentamisen suunnittelu, Ympäristöministeriö, 2016. Saatavissa: [http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/79057/OH\\_5\\_2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/79057/OH_5_2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [45] T. Laranjeiro, R. May, F. Verones, Impacts of onshore wind energy production on birds and bats: recommendations for future life cycle impact assessment developments, The International Journal of Life Cycle Assessment, 2018. Saatavissa: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11367-017-1434-4>
- [46] RP. Walker, AHP. Swift, Wind energy essentials: societal, economic, and environmental impacts, 2015.
- [47] B. Sovacool, The avian benefits of wind energy: A 2009 update, Renewable Energy, 2013. Saatavissa: [https://www.researchgate.net/publication/271574560\\_The\\_avian\\_benefits\\_of\\_wind\\_energy\\_A\\_2009\\_update](https://www.researchgate.net/publication/271574560_The_avian_benefits_of_wind_energy_A_2009_update)
- [48] U.S. Wind Industry Third Quarter 2019 Market Report, American Wind Energy Association. Saatavissa: <https://www.awea.org/Awea/media/Resources/Publications%20and%20Reports/Market%20Reports/3Q-2019-AWEA-Market-Report-Public-Version.pdf>
- [49] Impacts on Marine Mammals and Sea Birds, Wind Energy The Facts, verkkoaineisto. Saatavissa (viitattu 2.5.2020): <https://www.wind-energy-the-facts.org/impacts-on-marine-mammals-and-sea-birds.html>
- [50] Tuulivoimaloiden tuottaman äänen vaikutukset terveyteen, Työ- ja elinkeinoministeriö, 2017. Saatavissa: [http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/80067/TEMrap\\_28\\_2017\\_verkkojulkaisu.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/80067/TEMrap_28_2017_verkkojulkaisu.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [51] 1107/2015: Valtioneuvoston asetus tuulivoimaloiden ulkomelutason ohjearvoista. Annettu Helsingissä 27.8.2015. Saatavissa: <https://finlex.fi/fi/laki/alkup/2015/20151107>

- [52] V. Hongisto, Tuulivoimalamelun terveysvaikutukset, Työterveyslaitos, 2014. Saatavissa: [https://www.motiva.fi/files/9663/Tuulivoimalamelun\\_terveysvaikutukset\\_Tyoterveyslaitos.pdf](https://www.motiva.fi/files/9663/Tuulivoimalamelun_terveysvaikutukset_Tyoterveyslaitos.pdf)
- [53] A. Turunen, P. Tiittanen, T. Lanki, Meluhaittojen kokeminen ja oireilu yhdeksällä tuulivoima-alueella Suomessa, Terveyden ja hyvinvoinnin laitos, 2016. Saatavissa: [http://www.julkari.fi/bitstream/handle/10024/131157/YT5-2016\\_Turunen\\_ym\\_final.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://www.julkari.fi/bitstream/handle/10024/131157/YT5-2016_Turunen_ym_final.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [54] Onko tuulivoiman infraäänellä terveysvaikutuksia?, Suomen Tuulivoimayhdistys ry, verkkoaineisto. Saatavissa (viitattu 29.4.2020): <https://www.tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta/tietopankki-tiiviisti-tarkeista-kysymyksista/infraaanen-terveysvaikutukset>
- [55] P. Majjala, A. Turunen, I. Kurku, L. Vainio, M. Sainio, Policy Brief: Tuulivoimaloiden infraääni ja terveys, Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminta, 2020. Saatavissa: <https://tietokayttoon.fi/documents/1927382/2116852/11-2020-Tuulivoimaloiden+infra%C3%A4%C3%A4ni+ja+terveys.pdf/b5dc1005-24c9-67c3-087c-8846e1e48a18/11-2020-Tuulivoimaloiden+infra%C3%A4%C3%A4ni+ja+terveys.pdf?version=1.0>
- [56] A. Heikinmatti, Laaja suomalaistutkimus selvitti: infraääni ei ole tuulivoiman koettujen terveyshaittojen syynä, YLE, 2020, verkkoaineisto. Saatavissa (viitattu 29.4.2020): <https://yle.fi/uutiset/3-11309677>
- [57] F. Crichton, G. Dodd, G. Schmid, G. Gamble, K. Petrie, Can Expectations Produce Symptoms From Infrasound Associated With Wind Turbines?, American Psychological Association, 2013. Saatavissa: [https://www.fmhs.auckland.ac.nz/assets/fmhs/som/psychmed/petrie/docs/2014\\_Can\\_expectations\\_produce\\_sx\\_wind\\_turbine.pdf](https://www.fmhs.auckland.ac.nz/assets/fmhs/som/psychmed/petrie/docs/2014_Can_expectations_produce_sx_wind_turbine.pdf)