

Tiitus Korpela

TUULIVOIMALAN SYNNYTTÄMÄ MELU JA SEN TERVEYSVAIKUTUKSET

Kandidaatintyö
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Tarkastaja Risto Mikkonen
Huhtikuu 2022

TIIVISTELMÄ

Tiitus Korpela: Tuulivoimalan synnyttämä melu ja sen terveysvaikutukset
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Tieto- ja sähkötekniikan kandidaatinohjelma
Huhtikuu 2022

Ilmastonmuutoksen vastaisen taistelun myötä energiajärjestelmää pyritään muuttamaan vähäpäästöisemmäksi maailmanlaajuisesti. Tästä seuraa sähkönkulutuksen voimakas kasvu. Uusiutuvien sähköntuotantomuotojen osuuden on lisääntyttävä. Asennettu tuulivoimakapasiteetti on vahvassa kasvussa ympäri maailmaa, myös Suomessa. Lukuisten hyötyjen lisäksi tuulivoiman kasvu tuo mukanaan myös haittavaikutuksia. Yksi näistä on tuulivoimaloiden aiheuttama melu.

Tässä työssä perehdytään tuulivoimaloiden aiheuttamaan meluun ja siitä seuraaviin mahdollisiin terveyshaittoihin. Työn alussa käsitellään melun fysikaalisia ominaisuuksia ja mittaamista, sekä tutkitaan, mitkä ovat yleisimpiä melun aiheuttajia ja mitä terveyshaittoja melusta aiheutuu. Melun käsittelyn jälkeen tarkastellaan lyhyesti tuulivoimaloiden toimintaa ja asennettua tuulivoimakapasiteettia maailmalla ja Suomessa.

Melun ja tuulivoimaloiden toiminnan käsittelyn jälkeen on mahdollista siirtyä käsittelemään tuulivoimaloiden aiheuttamaa melua. Työssä havaitaan, että tuulivoimaloiden melutasot ovat melko alhaisia. Melun synnyttäjät voidaan jakaa lapojen aerodynaamiseen meluun sekä sähkön-
tuotantokoneistosta aiheutuviin käyntiääniin.

Lopuksi työssä käydään läpi Suomessa tehtyjä tutkimuksia tuulivoimamelusta. Tutkimusten pohjalta voidaan todeta, että tuulivoimaloista aiheutuu melua, joka voi häiritä ihmisiä. Häiritsevyyttä ei kuitenkaan voida perustella pelkästään melutasojen avulla, vaan jopa merkittävämmässä roolissa ovat muut tekijät, kuten koetut maisemahaitat tai negatiiviset asenteet tuulivoimaloita kohtaan.

Kuultavan melun lisäksi tuulivoimaloista syntyy ei-kuultavaa infraääntä. Vain kuultavan infraäänen on todettu aiheuttavan terveyshaittoja. Ei-kuultavan infraäänen lähteitä on tuulivoimaloiden lisäksi lukuisia, ja sille altistumiselta ei voida välttyä. Yhteyttä tuulivoimaloiden aiheuttaman infraäänen ja voimaloiden läheisyydessä asuvien ihmisten ilmoittamien terveysoireiden välillä ei ole mahdollista löytää.

Johtopäätöksenä voidaan todeta, että tuulivoimaloiden aiheuttama melu voi häiritä ihmisiä ja täten aiheuttaa terveyshaittoja. Terveyshaitat ovat kuitenkin harvinaisia ja vaikeasti yhdistettävissä suoraan tuulivoimaloiden aiheuttamaan meluun. Toinen keskeinen huomio on lisätutkimuksen tarve tuulivoimamelusta. Suhteuttamalla esiintyneet haitat tuulivoiman lisäämisen kautta saavutettuihin päästövähennyksiin ja sitä kautta saavutettuihin terveyshyötyihin, voidaan todeta hyötyjen olevan niin paljon suuremmat, että tuulivoimakapasiteettia on perusteltua lisätä.

Avainsanat: Tuulivoima, tuulivoimala, melu, infraääni, meluherkkyys

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. MELU.....	3
2.1 Melun fysikaaliset ominaisuudet.....	3
2.1.1 Amplitudi ja tasot.....	4
2.1.2 Aallonpituus ja taajuus	6
2.2 Melun mittaaminen.....	7
2.3 Melun aiheuttajat.....	9
2.4 Melun terveystvaikutukset.....	10
2.4.1 Melun aiheuttama kuulovaurio	10
2.4.2 Muut melun aiheuttamat terveysthaitat.....	11
3. TUULIVOIMALAN TOIMINTA JA TOIMINNASTA AIHEUTUVA MELU	13
3.1 Tuulivoimaloiden toiminta ja asennettu kapasiteetti.....	13
3.1.1 Tuulivoimalan rakenne ja toiminta.....	13
3.1.2 Tuulivoimakapasiteetti ja trendit tuulivoima-alalla.....	15
3.2 Tuulivoimamelun aiheuttajat ja melun suuruus.....	16
3.2.1 Melun synnyttäjät.....	16
3.2.2 Melun suuruus ja suuruuteen vaikuttavat tekijät.....	17
4. TEHTYJEN SELVITYSTEN AVULLA HAVAITUT MELUHAITAT	20
4.1 Terveystden ja hyvinvoinnin laitoksen tutkimus.....	20
4.2 Häiritsevä sisämelu.....	21
4.3 Infraäänen vaikutukset.....	24
4.4 Tuulivoiman terveystshyödyt.....	27
5. YHTEENVETO.....	29
LÄHTEET.....	31

LYHENTEET JA MERKINNÄT

THL	Terveyden ja hyvinvoinnin laitos
EEA	European Environment Agency, Euroopan ympäristökeskus
IRENA	International Renewable Energy Agency, Kansainvälinen uusiutuvan energian järjestö, joka tukee valtioita siirtymässä kohti puhtaampaa energiantuotantoa
VTT	Valtion teknillinen tutkimuskeskus
WHO	World Health Organization, Maailman terveysjärjestö

1. JOHDANTO

Ilmastokriisi uhkaa nykyisenkaltaisen elämän jatkumista maapallolla. Sillä on negatiivisia vaikutuksia niin ihmisiin kuin luontoon kaikkialla maapallolla. Ihmisen toiminnan seurauksena ilmakehään vapautuu kasvihuonekaasupäästöjä, jotka kiihdyttävät ilmastomuutosta. Hyvin merkittävä kasvihuonekaasupäästöjen lähde on energiantuotanto. Näin ollen energiatuotannossa tulee luopua fossiilisten polttoaineiden käytöstä ja siirtyä uusiutuvien energiamuotojen käyttöön. Tuulivoima on esimerkki uusiutuvasta energiamuodosta, joka auttaa taistelussa ilmastomuutosta vastaan. Tuulivoimaa onkin lisätty merkittävästi ympäri maailmaa sen suuresta potentiaalista johtuen. Tuulivoiman yleistymisen myötä sen haittavaikutukset, kuten tuulivoimaloiden synnyttämät äänet, ovat kuitenkin herättäneet huolestusta.

Suhtautuminen tuulivoimaa kohtaan tuntuu olevan ristiriitaista. Julkista keskustelua seurattaessa saa kuvan, että tuulivoimaa kannatetaan ja pidetään hyvänä asiana, kunhan voimala on niin kaukana omasta kodista, ettei sitä ole mahdollista nähdä. Aina tuntuu löytyvän perusteita, miksi voimaloita ei voida sijoittaa suunniteltuihin paikkoihin. On toki hyvä, että tuulivoimaloiden aiheuttamiin mahdollisiin terveyshaittoihin kiinnitetään huomiota ja niitä tutkitaan. Selvää on myös, että tuulivoiman terveysvaikutuksia tulee tutkia lisää. Mahdolliset terveyshaitat tulee kuitenkin suhteuttaa tuulivoimalla saavutettaviin terveyshyötyihin. Ilmastomuutoksen hillitsemiseksi tuulivoiman lisääminen on välttämätöntä.

Työn tavoitteena on määrittää tuulivoimaloiden aiheuttaman melun suuruus ja siitä aiheutuvat terveyshaitat. Aluksi työssä pureudutaan melun fysikaalisiin ominaisuuksiin ja tutkitaan, miten melua voidaan mitata. Työssä vastataan siihen, mistä melua aiheutuu ja mitä terveysvaikutuksia melulla on. Melun tutkimisen jälkeen esitellään lyhyesti tuulivoimalan toimintaa ja komponentteja, sekä asennetun tuulivoimakapasiteetin määrää nyt ja tulevaisuudessa. Tämän jälkeen siirrytään tuulivoimaloiden aiheuttaman melun käsitteelyyn ja vastataan siihen, miksi tuulivoimaloista aiheutuu melua ja kuinka suurta aiheutuva melu on. Lopuksi kerrotaan, mitä terveyshaittoja tuulivoimaloista on tutkimusten avulla todettu aiheutuvan ja suhteutetaan nämä tuulivoimaloiden tuottamiin positiivisiin terveysvaikutuksiin.

Työn toisessa luvussa esitellään melua teoreettisesti tutkimalla sen fysikaalisia ominaisuuksia, mittaamista, aiheuttajia ja luodaan katsaus melun aiheuttamiin terveyshaittoihin. Kolmannessa luvussa kuvataan tuulivoimalan toimintaa ja komponentteja, sekä asennettua kapasiteettia ja siinä ennustettuja muutoksia. Lisäksi kolmannessa luvussa perustellaan, miksi tuulivoimalat synnyttävät melua ja kuinka suurta syntyvä melu on. Neljännessä luvussa luodaan katsaus tuulivoimamelusta tehtyihin selvityksiin ja esitellään näiden selvitysten havaintoja. Luku neljä myös kertoo tuulivoimalan terveyshyödyt ja vertaa näitä haittoihin.

2. MELU

Melu on jokaisen arjessa esiintyvä termi. Toiselle melu voi olla naapurin laulua, toiselle liikenteen ääniä. Terveysten ja hyvinvoinnin laitos THL määrittelee melun häiritsevänä, epämiellyttävänä tai kuulolle haitallisena, ei-toivottuna äänenä [1].

Annetusta määritelmästä ilmenee melukäsitteen subjektiivisuus. Ääni voi olla samaan aikaan toiselle mieluisa ja toiselle hyvinkin häiritsevä. Tämä aiheuttaa haasteita melun määrittämiselle pelkästään fysikaalisten mittausten perusteella. Tulee kuitenkin pitää mielessä, että erittäin voimakas melu aiheuttaa aina terveydellisiä haittoja. [2, s.10–11]

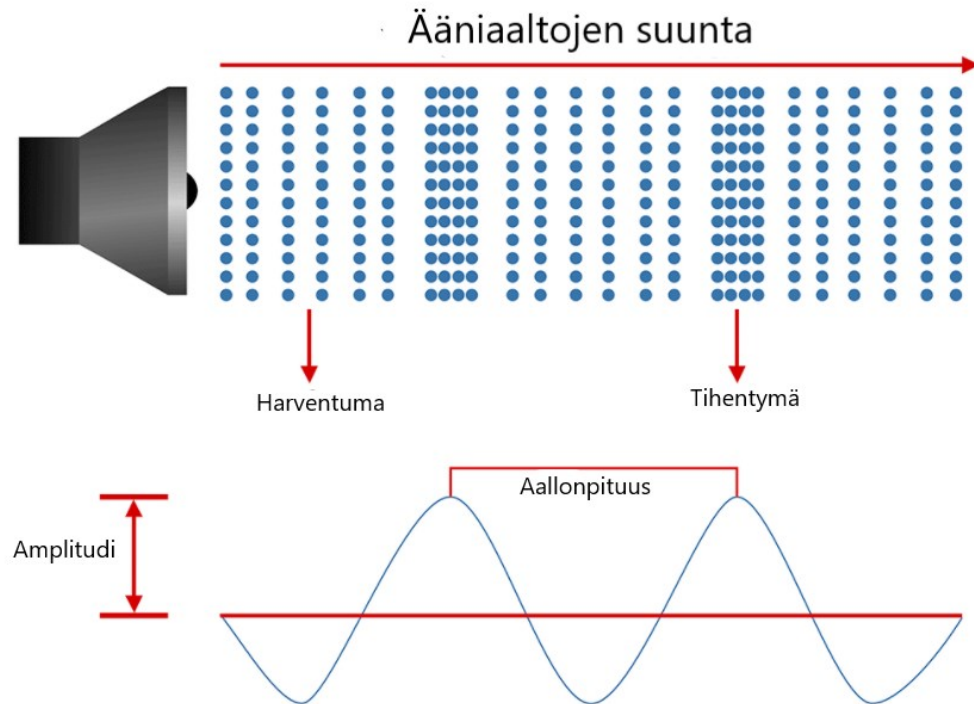
2.1 Melun fysikaaliset ominaisuudet

Melu on ääntä. Tämä ei kuitenkaan tarkoita kaiken äänen olevan melua [2, s. 8]. Merkittävää eroa melun ja äänen välille ei ole tarpeen tehdä. Äänen fysikaalisia ominaisuuksia on mahdollista mitata, mutta melun tutkiminen puolestaan on huomattavasti haastavampaa johtuen sen subjektiivisesta luonteesta [3, s.124]. Ymmärtämällä, mitä ääni on, miten se syntyy ja etenee, sekä luomalla käsityksen sen fysikaalisista ominaisuuksista, on helpompi käsitellä ja ymmärtää melua.

Ääni on värähtelyä, joka etenee aaltoliikkeenä jossakin väliaineessa [3, s.125]. Ääni vaatii syntyäkseen värähtelyn lähteen sekä väliaineen. Ilman väliainetta ei voi esiintyä ääniaaltoja. Väliaineen ei aina tarvitse olla ilmaa, vaan väliaineena voivat toimia muut kaasut, nesteet ja kiinteät aineet. Ilma on kuitenkin hyvin tyypillinen väliaine, ja näin tässä työssä äänestä puhuttaessa keskitytään nimenomaan ilmassa etenevään aaltoliikkeeseen. [4]

Ilmassa, kuten muissakin kaasuissa, etenevä ääni on pitkittäistä aaltoliikettä. Tämä tarkoittaa, että hiukkaset värähtelevät aallon etenemissuunnan mukaisesti. Edestakainen värähtely saa aikaan korkea- ja matalapaineen alueita. Korkeapaineen alueita kutsutaan tihentymiksi ja matalapaineen alueita harventumiksi. [4]

Kuva 1 havainnollistaa ääniaallon etenemistä ilmassa. Kuvan vasemmassa reunassa on äänilähde ja ääniaalto kulkee oikealle. Kuvasta on mahdollista erottaa harventumat ja tihentymät. Ääniaallosta on myös mahdollista piirtää sinikäyrää muistuttava kuvaaja, joka on esitetty kuvassa 1 alhaalla. Näin piirretystä kuvasta on mahdollista erottaa kaksi äänen fysikaalista ominaisuutta: amplitudi ja aallonpituus.



Kuva 1. Pitkittäinen ääniaalto, mukailten [5]

2.1.1 Amplitudi ja tasot

Amplitudi kuvaa hiukkasten suurinta mahdollista poikkeamaa tasapainotilasta. Amplitudi kuvastaa myös ääniaallon voimakkuutta. Mitä suurempi on amplitudi, sitä kovempi on ääni. [5] Kuvasta 1 on havaittavissa, että amplitudit osuvat tihentymien ja harventumien kohdalle. Koska paine oli tihentymissä hieman ympäristön painetta suurempi, ja harventumissa pienempi, voidaan päätellä, että positiivisen amplitudin kohdalla ääniaallon paine on ympäristöä korkeampi ja negatiivisen amplitudin kohdalla ympäristöä pienempi.

Paineen, mukaan lukien äänenpaineen, yksikkö on pascal (Pa). Ihmiskorva aistii kuitenkin äänenpaineita hyvin laajalta alueelta, joten äänen voimakkuuden kuvaaminen pascaleina ei ole järkevää. Sen sijaan äänen voimakkuutta kuvattaessa käytetään äänenpainetasoa L_p . Äänenpainetaso on suhteellinen logaritminen tasosuure, ja sen yksikkö on desibeli (dB). [3, s. 124] Ihminen kuulee ääniä väliltä 0–130 dB. On huomioitava, että tämä alue on yksilöllinen ja siihen vaikuttavat ikä ja henkilökohtainen herkkyys. Tämän kuuloalueen alarajaa sanotaan kuulokynnykseksi ja ylärajaa kipukynnykseksi. [2, s. 11] Kipukynnys on äänen voimakkuus, minkä ylittävät äänet ovat ihmiskorvalle sietämättömiä [6].

Äänenpainetaso voidaan määrittellä seuraavasti:

$$L_p = 20 \lg \frac{p}{p_0}, \quad (1)$$

missä p on äänenpaine pascaleina ja p_0 vertailuäänenpaine. Vertailuäänenpaine p_0 saa usein arvon $20 \mu\text{Pa}$. [3, s. 125] Se vastaa ihmisen kuulokynnystä 1 kHz:n taajuudella [4]. Melun yhteydessä äänenpainetaso on tärkeä termi, sillä se määrittää, kuinka suurena ihminen aistii äänen. Näin se myös määrää, kuinka paljon häiriötä ja haittoja ääni aiheuttaa. Melua ja sen suuruutta käsiteltäessä voidaan käyttää termiä melutaso. [7, s.7, s. 13] Melun fysikaalisia ominaisuuksia käsiteltäessä on hyvä tuntea myös termi ekvivalenttitaso L_{eq} . Ekvivalenttitaso voidaan esittää kaavalla

$$L_{eq} = 20 \lg \sqrt{\frac{1}{T} \int_T \frac{p^2(t)}{p_0^2} dt}. \quad (2)$$

Kaavassa 2 esiintyvä T on tarkastelu-aika. Ekvivalenttitaso ei kuvaa melun äänitason tavallista keskiarvoa, vaan johtuen paineiden neliöön korotuksesta, keskiarvoa suurempien äänenpaineiden merkitys korostuu. Ekvivalenttitaso on käytössä arvioitaessa melun aiheuttamia terveysvaaroja tai häiritsevyyttä. [7, s. 14]

Mikäli ekvivalenttitaso kestoksi määritetään 1 sekunti, puhutaan äänialtistustasosta L_E . Äänialtistustaso kuvaa kertaluontoisia tapahtumia. Mikäli ilmiö koostuu yksittäisistä kertaluontoisista tapahtumista, voidaan ekvivalenttitaso määrittää näiden äänialtistustasojen avulla. [7, s. 15]

Melulähteiden voimakkuutta on myös mahdollista arvioida tasosuureen avulla. Tällöin puhutaan melupäästöstä, joka kuvaa meluksi mielletyn äänilähteen äänitehotasoa. Kyseessä on äänilähteen perusominaisuus, johon ei vaikuta esimerkiksi sijainti tai ympäristö. Äänitehotaso L_w voidaan ilmaista kaavalla

$$L_w = 10 \lg \frac{P}{P_0}, \quad (3)$$

missä P on mitattu ääniteho ja P_0 vertailuteho. Vertailutehon suuruus on 1 pW . Äänitehotaso kertoo vain, kuinka suuren melun jokin äänilähde tuottaa, ei sitä, kuinka voimakkaalta tämä kuulostaa. [7, s. 7, s. 14]

2.1.2 Aallonpituus ja taajuus

Kuvan 1 avulla on mahdollista hahmottaa toinen ääniaallon merkittävä ominaisuus eli aallonpituus. Aallonpituuden avulla voidaan määrittää myös äänen taajuus. Aallonpituus λ on matka, jonka aalto etenee yhden kokonaisen syklin aikana. Esimerkiksi kuvassa 1 aallonpituus on merkitty kahden huipun välisenä etäisyytenä. Aallonpituus saadaan selville kaavalla

$$\lambda = \frac{c}{f}, \quad (4)$$

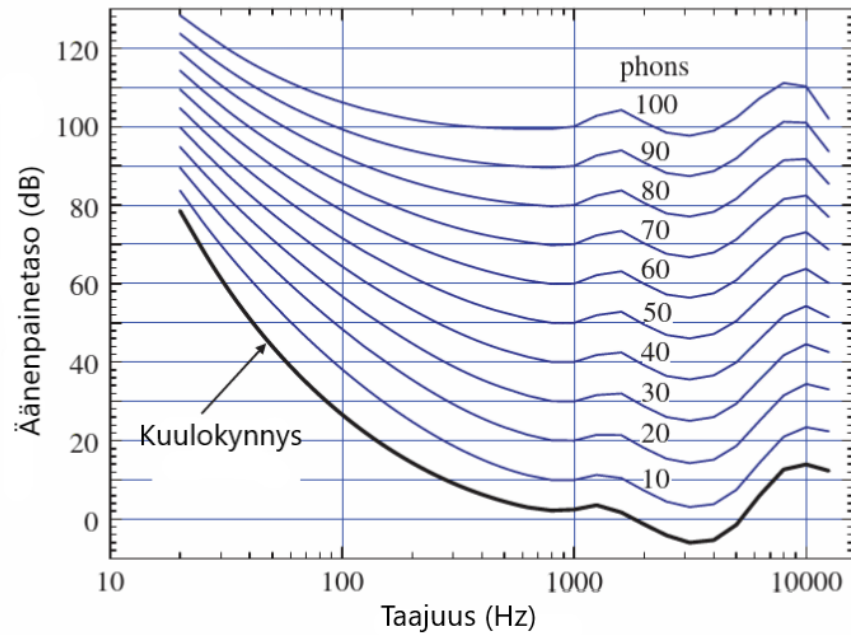
jossa c on äänen nopeus ja f taajuus hertseinä, Hz. Taajuus ilmaisee syklien määrän sekunnissa. [4] Äänen nopeus ilmassa on 343 m/s [8, s. 92]. Äänen nopeus riippuu muun muassa väliaineesta, jossa ääni etenee, sekä väliaineen lämpötilasta [4] [8, s.92]. Melun kannalta aallonpituudella on merkitystä meluntorjunnassa. Äänen etenemiseen on mahdollista vaikuttaa ainoastaan esteillä, jotka suuruusluokaltaan vastaavat ääniaallon aallonpituutta [9, s. 13].

Kaava 4 on mahdollista esittää muodossa

$$f = \frac{c}{\lambda}. \quad (5)$$

Kaavan 5 avulla saadaan selville ääniaallon taajuus hertseinä. Ihminen kuulee ääniä taajuusväliltä 20–20 000 Hz. Kuten äänenpainetason, myös taajuuden suhteen määritetty kuuloalue on yksilöllinen, ja siihen vaikuttavat havaitsijan ikä ja herkkyys. [2, s. 11]. Ääntä, jonka taajuus on suuri, voidaan sanoa matalaksi, ja ääntä, jonka taajuus on pieni, korkeaksi [7, s. 8]. Äänen taajuus, eli korkeus, vaikuttavat myös ihmisen kuuloalueen suuruuteen [2, s. 11]. Kuva 2 havainnollistaa taajuuden vaikutusta kuuloaistimukseen.

Kuvan 2 käyriä kutsutaan vakioäänekkyyskäyriksi, jotka perustuvat korvan herkkyyksille eri äänenpainetasoille ja taajuuksille. Ne havainnollistavat, kuinka kovan äänenpainetason tulee olla milläkin taajuudella, jotta ääni kuulostaisi yhtä kovalta kuin 1 kHz:n taajuudella. Vakioäänekkyyskäyrät ovat kansainvälisesti standardoitu ISO 226 standardissa. [7, s. 23] [10, s. 62–63]



Kuva 2. Vakioäänekkyyssäyrät, mukailten [10, s. 62]

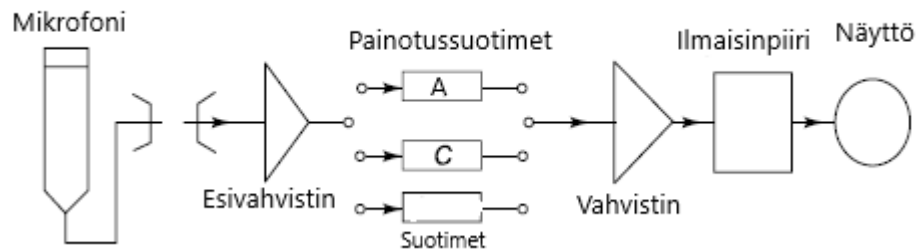
Ihmisen kuuloalueen ulkopuolelle jääviä ääniä kutustaan infra- ja ultraääniksi. Infraäänit ovat ääniä, joiden taajuus on alempi kuin ihmisen kuuloalueen alaraja 20 Hz. Ultraäänit puolestaan ovat ääniä, joiden taajuus on korkeampi kuin ihmisen kuuloalueen alaraja 20 000 Hz. [3, s. 125]

2.2 Melun mittaaminen

Ääntä mitattaessa keskitytään erityisesti äänenpainetason mittaamiseen, joka kertoo äänen voimakkuuden ja täten mahdollistaa melun haittavaikutusten arvioinnin. Melun kohdalla toinen merkittävä mitattava suure on melussaoloaika. Mitä kauemmin melussa ollaan, sitä suurempi melun vaikutus on. Toisaalta mitä suurempi melun äänenpainetaso on, sitä lyhyemmän ajan sille saa altistua. [2, s. 13] [7, s. 24]

Johtuen siitä, että ihminen aistii eri taajuiset äänet eri voimaisina, mittauksissa tulee painottaa eri taajuuksia painotussuotimien avulla. A-suodin on painotussuotimista tavallisin. Lähes kaikki mittaukset tehdään A-suodinta käyttäen, sillä kyseisen painotuksen on havaittu parhaiten vastaavan melun häiritsevyyttä kaikilla voimakkuuksilla sekä soveltuvan parhaiten kuulovaurion vaaran arviointiin. Toinen mittauksissa esiintyvä painotussuodin on C-suodin, jota käytetään erityisesti äänen huippuarvojen mittaamiseen. [3, s. 125] [7, s. 24–26] [11]

Äänen mittauksessa perusmittalaite on äänitasomittari. Äänitasomittarista voidaan käyttää myös termiä melumittari tai desibelimittari. Äänitasomittari koostuu tyypillisesti mikrofonista, esivahvistimesta, suotimista, vahvistimesta, ilmaisimpiiristä sekä näyttölaitteesta. [7, s. 31] [12] Kuvassa 3 on esitetty äänitasomittarin lohkokaavio, jonka avulla mittarin toiminta on helpompi hahmottaa. Kuvan 3 nuolet kuvastavat äänisignaalin etenemistä.



Kuva 3. Äänitasomittarin lohkokaavio, mukaillen [12]

Äänitasomittarin etupäässä on mikrofoni. Se on sähköakustinen muunnin, joka muuntaa äänenpaineen vaihtelut jännitteeksi. Ominaisuuksiensa johdosta yleisimmin käytössä on kondensaattorimikrofoni. Mikrofonin tuottama sähköinen signaali on usein hyvin pieni, minkä johdosta tarvitaan esivahvistinta vahvistamaan signaalia ennen sen jatkokäsittelyä. Vahvistettu signaali kulkeutuu suotimiin. Äänitasomittarista löytyy edellä mainittuja painotussuotimia, yleensä A- ja C-painotuksilla. Lisäksi mittareista voi löytyä oktaavi- tai terssisuotimia, joiden avulla on mahdollista määrittää äänisignaalin spektri. [7, s. 23–31] [12]

Suotimien jälkeen vahvistettu signaali kulkeutuu ilmaisimpiiriin. Suurin osa nykyisistä äänitasomittareista on digitaalisia ja ne ilmoittavat äänitason tehollisarvon. Äänenpaineen tehollisarvo saadaan laskettua tehollisarvoilmaisimella, missä äänenpaineen neliöstä lasketaan keskiarvo ja tästä keskiarvosta otetaan vielä neliöjuuri. Äänenpainetaso saatetaan vaihdella liian nopeasti, jolloin järkevää tulosta ei ole mahdollista saada ilman aikavakioita eli aikapainotusta. Tehollisarvoilmaisimella on 2 standardoitua aikavakiota, F (nopea)- ja S (hidas)-painotukset. F-painotus mahdollistaa nopeasti reagoivan näyttövasteen aikavakiolla 125 ms. S-painotus puolestaan helpottaa näytön lukemista. Sen aikavakio on 1 s. Näistä painotuksista ihmisen kuuloaistia vastaa paremmin F-painotus, minkä johdosta melun äänenpainetasoa tulisi arvioida sitä käyttäen. S- ja F-painotusten lisäksi on olemassa erittäin suurten, yli 140 dB äänenpaineiden, kuulovaurioiden arviointiin käytettävä Peak-mittaustapa. Peak ei ole varsinainen aikapainotus, eikä sitä saa käyttää muiden kuin yli 140 dB äänenpainetasojen arviointiin. [7, s. 31–35] [12]

Melun mittauksessa erityisen kiinnostuksen kohteena on äänenpaineen ekvivalenttitaso L_{eq} , jonka laskeminen on esitetty kaavassa 2. Käyttämällä ekvivalenttitasoa melun arviointiin, myös melussaoloaika tulee huomioitua. Useimmiten mitataan A-painotettua ekvivalenttitasoa L_{Aeq} . Lisäksi mitataan äänen voimakkuutta eli äänenpainetasoa L_p . Myös tästä useimmiten mitataan A-painotettua äänenpainetasoa L_{Ap} . Muita mitattavia suureita ovat L_{Cpeak} , joka kertoo äänenpaineen C-painotetun huippuarvon, sekä L_{Amax} ja L_{Amin} , jotka kuvaavat A-painotetun äänenpaineen maksimi- ja minimitasoja. [12] [13, s. 25]

2.3 Melun aiheuttajat

Melua voi verrata muihin ympäristöön kohdistuviin päästöihin, sillä näiden tavoin myös melu pilaa ympäristöä. Melupäästöjä syntyy etenkin kaupungeissa, joissa suuri määrä ihmisiä asuu tiiviisti. [2, s. 18]

Euroopan unionin ympäristömelua koskeva direktiivi määrittelee ympäristömelun ei-halutuksi tai haitalliseksi ääneksi, joka aiheutuu ihmisen toiminnan seurauksena. Euroopan ympäristökeskus EEA on raportissaan [14] tätä määritelmää käyttäen määrittänyt merkittäviksi ympäristömelun aiheuttajiksi Euroopassa tie- raide- ja lentoliikennemeluun, sekä kaupunkialueilla teollisuusmelun. Näistä tieliikennemelu on merkittävin ympäristömelun lähde, vähintään 20 % EU:n asukkaista asuu alueilla, joissa tieliikennemelu on terveydelle vaarallista. [14 s.8–16] Tieliikennemelu on merkittävin melunlähde myös Suomessa, THL:n [1] mukaan 85 % ympäristömelusta on tieliikenteestä peräisin.

EEA:n raportti käsittelee ympäristömelua EU:n direktiivin määritelmän mukaisesti, ja täten raportissa ei huomioida työpaikkamelua, asuinympäristön ja vapaa-ajan melua, soittoimista aiheutuvaa melua tai tuulivoimaloiden aiheuttamaa melua. [14, s. 8–16] Työpaikoilla investoinnit meluntorjuntaan sekä kuulonsuojaukseen, sekä kuulonsuojaimien kehittyminen ovat vähentäneet melun aiheuttamia haittoja. Siitä huolimatta työterveyslaitoksen [15] mukaan meluvamma on yhä yleisin ammattitauti Suomessa. Melu on myös hyvin erilaista työpaikasta riippuen. Teollisuuden ammateissa melu voi olla erilaisten koneiden aiheuttamaa kuulolle vaarallista ääntä, kun taas toimistotyössä se voi olla keskittymistä häiritsevää puhetta. [2, s. 25]

Työmelua merkittävämmäksi voi kasvaa vapaa-ajan melu, olettaen, että työmelulta suojaudutaan kunnolla. Vapaa-aika on muuttunut äänekkäämmäksi. Lisäksi kuulonsuojaukseen ei vapaa-ajalla kiinnitetä niin suurta huomiota, sillä toisin kuin työpaikoilla, mitkään lait eivät säätele siitä huolehtimista.

Taulukkoon 1 on koottu esimerkkejä eri melun aiheuttajista ja näiden tuottamista A-painotetuista melutasoista. Matkustajalentokoneen kohdalla on syytä huomioida, että kyseinen melutaso kuvaa laskeutumisen ja lentoonlähdön melutasoja. Mittaukset toteutetaan laskeutumisen yhteydessä 2000 m ennen kiitotietä ja lentoonlähdön kohdalla 6500 m lentoonlähdön jälkeen. [3, s. 126]

Taulukko 1. Erilaisia melulähteitä, mukailen [2, s. 14, s. 21] [3, s. 126]

Melun aiheuttaja	melutaso dB(A)
lehtien havina	10–30
äänekäs puhe	50–70
tieliikenne	70–85
matkustajalentokone (nousu ja lasku)	75–90
lasten lelut	78–108
rock-konsertti	95–115
yökerho	100–120
moottorisaha	100–105
haulikko	154–160

2.4 Melun terveysvaikutukset

Melun aiheuttamat terveysvaikutukset ovat jaettavissa kahteen luokkaa. Kuulovaurio on ainoa terveysvaikutus, jonka voidaan osoittaa aiheutuvan suoraan melusta. Kuulovaurioiden lisäksi melu aiheuttaa myös erilaisia kuulon ulkopuolisia haittoja, jotka voivat olla niin fyysisiä kuin psyykkisiäkin. [2, s. 53]

2.4.1 Melun aiheuttama kuulovaurio

Melun aiheuttamien kuulovaurioiden syntyyn on kaksi erilaista tapaa. Ne voivat syntyä äkillisen ja voimakkaan melun aiheuttamina. Tällöin puhutaan impulssimelusta, eli hetkellisestä meluhuipusta, jonka äänenpainetaso ylittää 140 dB. Toinen tapa kuulovaurion synnylle on pitkäkestoinen altistuminen matalammille melutasoille. Altistuksen kestäessä pitkään kuulovaurion synnyn riskiraja on 85 desibeliä. Kuulovaurion syntyessä korvan soluja tuhoutuu. Nämä solut eivät uusiudu. [2, s. 32–33] [3, s. 125–127]

Impulssimelu aiheuttamat kuulovauriot ovat pitkäkestoisesta altistuksesta aiheutuneita vaurioita merkittävämpiä. Impulssimelun seurauksena korvan ääntä välittävä tärykalvo, ääniaistimuksen terävöittävä ja taajuuden aistimisen mahdollistavat ulkoiset karvasolut tai sisäkorvan kalvostot, kuten ääniaistimuksen mahdollistava tyvikalvo, voivat repeytyä.

Impulssimelun aiheuttamat muutokset tapahtuvat muutamassa vuorokaudessa. [2, s. 28–35]

Pitkäkestoissa meluallistuksessa kuulovaurion syntyminen voi kestää jopa useita vuosia tai jopa vuosikymmeniä. Pitkäkestoinen altistus ensin rappeuttaa karvasolujen toimintaa ennen niiden lopullista kuolemaa. Tästä syystä äänet aistitaan jatkuvasti heikompina. Tyypillistä on, että ennen puheen kuulemisen heikkenemistä suuritaajuisten äänten kuuleminen lakkaa. Karvasolujen tuhoutuminen voi aiheuttaa kuulon menetyksen tai pysyvän ääniaistimuksen, eli tinnituksen. Pitkäkestoisen altistuksen myötä tyvikalvon värähtely vähenee samalla leviten laajemmalle alueelle, mikä johtaa vaikeuksiin erottaa sanoja. Pitkäkestoisen meluallistuksen aiheuttamat vauriot pysähtyvät meluallistuksen päättyessä, eivätkä useinkaan johda kuuroutumiseen. [2, s. 35–38]

Taulukossa 2 on esitetty aikarajat, joita ei tulisi mainituilla melutasoilla ylittää. Taulukosta on nähtävissä, että melutason kasvaessa 3 dB:llä, melussaoloajan tulee puolittua. Melun kohdalla tulee aina muistaa sen subjektiivisuus. Ihmisten fyysisten ja psyykkisten erojen johdosta melutason ja kuulovaurion välinen yhteys ei ole täysin yleistettävissä. [2, s. 13]

Taulukko 2. Melutasojen turvallisuusaikarajat, mukailten [2, s. 12]

Jatkuva A-painotettu melutaso (dB)	Melussaoloaika
85	8 h
88	4 h
97	30 min
100	15 min
115	ei lainkaan

2.4.2 Muut melun aiheuttamat terveyshaitat

Melulla on yhteyttä muihin haittavaikutuksiin kuin kuulovaurioihin. Nämä haittavaikutukset ovat hyvin henkilökohtaisia. Termi meluherkkyys kuvaa voimakkuutta, millä melu vaikuttaa ihmiseen. Se käsittää ihmisen suhtautumisen ja tavan reagoida meluun ja on yhteydessä melun häiritsevyyden kokemiseen. [3, s. 128]

Melun yleisin ja tutkituin haittavaikutus on häiritsevyys. Häiritsevä melu vaikeuttaa keskittymis- ja suorituskykyä ja näin vaikuttaa vireyteen, oppimiseen, päätöksentekoon ja käyttäytymiseen. Melu voi häiritä myös sosiaalisia suhteita. Se vaikeuttaa kommunikointia, sillä meluisassa ympäristössä puheen ymmärtäminen voi tuottaa hankaluuksia. Keskustelun käyminen voi käydä mahdottomaksi. On myös havaittu, että voimakkaassa

melussa työskentelevät ihmiset eristäytyvät muita helpommin sosiaalisesta ympäristöstään ja muuttuvat työkeämmiksi. [1] [2, s. 55–57, s. 61]

Melu häiritsee unta vaikeuttamalla nukahtamista sekä lisäämällä heräilyä. Pitkään jatkuvana unihäiriöt vahingoittavat terveyttä, mikä näkyy muun muassa sydänsairauksien riskien kohoamisena. Jo 25 dB:n melutasolla on vaikutuksia uneen. Melutason ollessa 40 dB uni kevenee ja heräily lisääntyy. Myös unenaikaisia vaikutuksia voi esiintyä, esimerkiksi syke voi nousta. [1] [2, s. 54, 58]

Melu voi laukaista osin tiedostamattoman stressireaktion, jonka ilmentyminen voidaan havaita esimerkiksi kohonneen verenpaineen tai kohonneen sykkeen kautta. Näin melu voi myös lisätä sydän- ja verisuonitautien riskejä. Näiden tautien ja melun välistä yhteyttä on kuitenkin vaikea todistaa, sillä etenkin kaupungeissa melun rinnalla esiintyy ilmaansaasteita, joilla on samankaltaisia vaikutuksia. Kohonneiden sydän- ja verisuonitautien lisäksi melun aiheuttamasta stressireaktiosta on vaarana aiheutua immuunijärjestelmän toiminnan heikkeneminen, veren hyytymistekijöiden pitoisuuksien nousu, sekä rasva-ainevaihdunnan haitalliset muutokset. [1]

Melu voi aiheuttaa myös psyykkisiä haittavaikutuksia. Näiden yhteydessä ihmisen meluherkkyydellä on merkittävä rooli. Melun on osoitettu aiheuttavan lukuisia kielteisiä tunteita ja sillä arvellaan olevan yhteys masentuneisuuteen ja ahdistuneisuuteen. Lasten kohdalla melun on osoitettu haittaavan kehitystä. [1] [3, s. 129]

3. TUULIVOIMALAN TOIMINTA JA TOIMINNASTA AIHEUTUVA MELU

Ilmastonmuutoksen vastaisen taistelun myötä maailman energiajärjestelmää on kasvavissa määrin pyritty muuttamaan päästöttömäksi. Tämä on johtanut myös tuulivoimatuotannon merkittävään kasvuun. Energianlähteenä tuuli on uusiutuvaa ja puhdasta ja sitä on saatavilla kaikkialla maapallolla. Tuulivoimaloiden yleistymisen myötä on herännyt kasvavaa keskustelua tuulivoimaloiden mahdollisista haitallisista terveysvaikutuksista. Etenkin tuulivoimaloiden tuottamat äänet ovat aiheuttaneet huolestusta.

3.1 Tuulivoimaloiden toiminta ja asennettu kapasiteetti

Ennen tuulivoimaloiden aiheuttaman melun tai muiden terveysvaikutusten arviointia on syytä tehdä lyhyt katsaus tuulivoimalan rakenteeseen ja toimintaperiaatteeseen. Myös tuulivoiman kapasiteettia tarkastellaan ja huomioidaan tuulivoiman määrässä tapahtuneet muutokset. Lisäksi tutkitaan, miten tuulivoiman määrän arvioidaan muuttuvan tulevaisuudessa ja mitä muita trendejä tuulivoima-alalla on havaittavissa. Näin on helpompi ymmärtää syntyvää melua ja muita terveysvaikutuksia sekä näiden yleisyyttä.

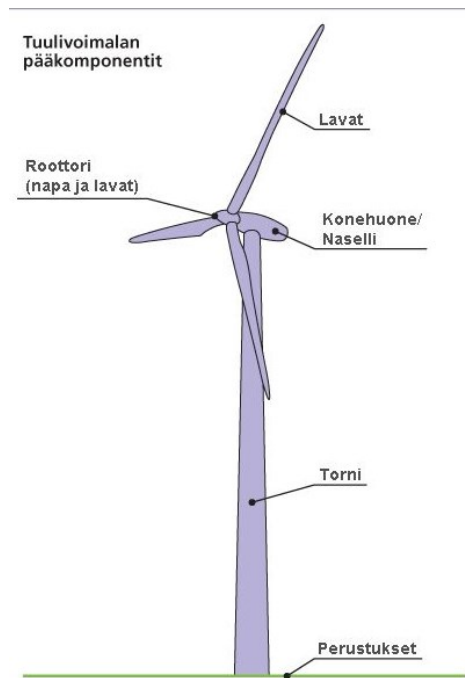
3.1.1 Tuulivoimalan rakenne ja toiminta

Tuulivoimalan pääkomponentteja ovat konehuone, navasta ja lavoista koostuva roottori, torni, sekä perustukset. Nykyiset kaupalliset voimalat ovat tyypillisesti kolmelapaisia. Voimaloiden napakorkeus Suomessa asettuu välille 150–175 metriä. [16]

Kuvassa 4 on esitetty tuulivoimalan periaatteellinen rakenne. Kuvan voimala on 3-lapainen, vaaka-akselinen voimala, mitä nykyiset teollisen kokoluokan voimalat edustavat. Kolme on vakiintunut lapojen määrä tuulivoimaloissa, sillä se takaa vakaan pyörimisnopeuden. Lapojen määrän kasvattaminen tuo lisää hintaa, mutta ei tuo merkittävää lisäystä tuotettuun energiaan. Roottorien halkaisijoiden pituus asettuu välille 130–160 metriä. [17]

Lapojen määrän lisäksi merkitystä on myös niiden muotoilulla. Tuulivoimalan optimaalisen toiminnan takaamiseksi lavat muotoillaan lentokoneen siipien tapaan, eli lavat ovat paksumpia toisesta reunasta ja kapenevat toista päätä kohti. Tämän muotoilun vuoksi ilmavirtauksen on kuljettava pidempi matka siiven yläpuolella verrattuna alapuolella kuljettuun matkaan. Tämän seurauksena siiven yläpuolelle muodostuu matalampi paine

kuin alapuolelle. Paine-ero aiheuttaa nostovoiman, jonka ansiosta roottori pyörii. Muotoilulla on mahdollista vähentää tuulivoimalle haitallista vastusvoimaa, joka hidastaa pyörimistä. Toimintaa voidaan optimoida myös kiertämällä lapaa pituusakselin suuntaisesti. [18, s. 31–33]



Kuva 4. Tuulivoimalan rakenne [19]

Kuvasta 4 voidaan hahmottaa konehuone, joka koostuu generaattorista, vaihteistosta, muuntajasta sekä säätö- ja ohjausjärjestelmistä [20]. Generaattori muuntaa roottorin pyörimisenergian sähköenergiaksi. Generaattorista riippuu myös vaihteiston tarve. Mikäli roottorin pyörimisnopeus on liian hidas, tarvitaan vaihteistoa, jotta saadaan aikaan generaattorille sopiva pyörimisnopeus. Jos taas pyörimisnopeus on riittävä generaattorille, vaihteisto voidaan jättää pois. Tällöin puhutaan suoravetoisesta voimalasta, missä generaattorin roottori pyörii voimalan roottorin määrittämällä nopeudella. Säätö- ja ohjausjärjestelmä taas käsittää esimerkiksi jarrun, jonka avulla roottorin pyöriminen voidaan pysäyttää liian alhaisilla tai kovilla tuulennopeuksilla. Lisäksi konehuoneesta löytyy kiertomoottori, jonka avulla roottoria voidaan kääntää tuulen suunnan mukaan. [18, s. 41, 49–50]

Tuulivoimaloiden toiminta perustuu tuulen liike-energian hyödyntämiseen. Tuuli saa tuulivoimalan lavat pyörimään. Tuulen liike-energia muunnetaan tuulivoimalan akselin pyörimisenergiaksi eli mekaaniseksi energiaksi. Generaattori muuntaa tämän sähköenergiaksi, joka kulkeutuu muuntajan kautta sähköverkkoon. Energiantuotannossa tuulivoima-

lat liitetään usein toisiinsa, jolloin puhutaan tuulipuistoista. Tällöin on huolehdittava riittävästä etäisyydestä voimaloiden välillä. Hyvä etäisyys on noin viisi kertaa roottorin halkaisija. [16] [19] [20]

Tuulivoimalat voidaan jakaa maa- ja merituulivoimaloihin. Tuulivoimaloiden kokoa kuvataan yleisimmin niiden enimmillään vuodessa tuottaman tehon, eli generaattorin nimellistehon, avulla. Maatulivoimaloiden kohdalla nimellistehot ovat välillä 4–5 MW, merituulivoimaloilla parhailaan jopa 10 MW. Tuulivoimaloiden kokoa voidaan kuvata myös napakorkeuden avulla. Mitä suurempi napakorkeus on, sitä suurempi tuotto saadaan, sillä tuulennopeus kasvaa ylöspäin mentäessä. [16] Tuulivoimalan teho on riippuvainen tuulennopeuden kolmannesta potenssista [18, s. 12]. Lisäksi kokoa voidaan kuvata roottorin halkaisijalla, vuosituotolla tai kokonaiskorkeudella, johon otetaan huomioon lapojen pituus. [16]

3.1.2 Tuulivoimakapasiteetti ja trendit tuulivoima-alalla

Kansainvälisen uusiutuvan energian järjestön IRENA:n tilastojen mukaan vuoden 2020 lopussa uusiutuvilla energiantuotantomuodoilla tuotettiin maailmassa yhteensä 2 799 GW, josta tuulivoiman osuus oli noin 733 GW. Tuulivoima on vesivoiman jälkeen suurin uusiutuvan energian tuotantomuoto ja sitä myös lisätään hyvin voimakkaasti. Tuulivoima on aurinkovoiman jälkeen toiseksi nopeinten kasvava uusiutuvan energian tuotantomuoto maailmassa. Vuonna 2020 tuulivoimakapasiteetti kasvoi 111 GW:lla. [21]

Maailman suurin tuulivoiman tuottaja on Kiina. Vuonna 2021 Kiinan tuulivoimakapasiteetti oli 342 GW:a. Toiseksi suurin tuulivoiman tuottaja on USA 139 GW kapasiteetilla ja kolmantena tulee Saksa, jossa asennettu kapasiteetti on 64 GW. Myös Tanskassa tuulivoiman tuotanto on merkittävää, vaikka maa ei suurimpien tuottajamaiden joukkoon mahdukaan. Tanskassa tuulivoimalla tuotetaan noin puolet kaikesta kulutetusta sähköstä. Suomessa asennettu tuulivoimakapasiteetti on 3257 MW. Vuoden 2021 lopussa Suomessa oli 962 tuulivoimalaa. Tuulivoimalla tuotettiin vuonna 2021 11,7 % Suomen sähköntuotannosta ja se kattoi 9,3 % Suomen sähkönkulutuksesta. [22] [23] [24]

Tuulivoima-alalla on vahva kasvava trendi. Tuulivoiman tuotantomäärissä on voimakasta kasvua maailmanlaajuisesti [25]. Suomen Tuulivoimayhdistyksen ”Tuulivoima Suomessa 2021” [26] raportissa esitetään muut kasvavat trendit. Asennettujen tuulivoimaloiden keskimääräinen teho kasvaa vuosi vuodelta, samoin voimaloiden keskimääräinen napakorkeus sekä roottoreiden halkaisijat. Osittain näiden kehitysten myötä tuulivoimalla tuotetun sähkön hinta on laskenut merkittävästi [27].

Havaitun kehityksen ennustetaan jatkuvan myös tulevaisuudessa. IRENA:n ennusteen mukaan tuulivoiman osuus maailman energiantuotannosta tulee kasvamaan ja on vuonna 2030 21 %. Asennettu tuulivoimakapasiteetti kasvaa niin maalla kuin merellä. Ennusteen mukaan se on vuonna 2030 yhteensä noin 2015 GW. Kasvua esitettyyn vuoden 2020 arvoon olisi 1 282 GW:a. Tuulivoimalla tuotetun sähkön hinnan ennustetaan jatkavan laskuaan. [28, s. 6–7] Eri lähteissä ennusteet eroavat hieman, mutta tulokset ovat kuitenkin samansuuntaisia ja trendi selkeä.

3.2 Tuulivoimamelun aiheuttajat ja melun suuruus

Tuulivoimaloista syntyy ääntä. Se on tosiasia, jota ei voida kiistää. Tässä kappaleessa käydään läpi syitä, jotka aiheuttavat tuulivoimaloille ominaisia ääniä. Lisäksi selvitetään syntyvien äänien voimakkuus ja vertaillaan niitä muiden melulähteiden melujen voimakkuuksiin.

3.2.1 Melun synnyttäjät

Tuulivoimaloiden äänten synnyttäjät voidaan jakaa kahteen osaan. Suurin osa äänistä syntyy lapojen aerodynaamisesta melusta, sillä lapojen vaikutuspinta-ala on suuri ja syntyvä ääni jaksollista. Jaksollinen ääni tarkoittaa, että äänen voimakkuus vaihtelee jaksollisesti ajan funktiona. Toinen äänen synnyttäjä on sähköntuotantokoneiston yksittäiset osat, kuten generaattori tai vaihteisto. [29, s. 9]

Lapojen aerodynaamisen melun määrä on suoraan suhteessa ilmavirtauksen turbulenssiin. Ilmavirtauksen muuttuminen turbulenttiseksi liittyy lapaprofiiliin ja kitkaan. Kitkasta johtuen ilmavirtauksen nopeus on hitaimmillaan lavan pinnan läheisyydessä ja kasvaa mitä kauempana lavan pinnasta ollaan. Tällöin puhutaan rajakerroksesta. Rajakerroksen paksuus kasvaa ilmavirtauksen edetessä lavan yli, sillä lapa kapenee. Roottorin pyöriessä ilmavirtaus osuu ensin paksumpaan pintaan. Tällöin virtaukset kulkevat lähellä lavan pintaa. Lavan terävöitymisestä johtuen ilmavirtauksen etäisyys lavan pinnasta kasvaa, kasvattaen näin rajakerrosta. Tällöin ilmavirtaus muuttuu turbulenttiseksi. Turbulenssi kasvaa sitä enemmän, mitä suurempi muutos lavan paksuudessa tapahtuu. [29, s. 10]

Turbulenssia ja täten myös melua lisää lavan pituuden kasvaminen. Suurinta meluntuotto on lähellä lavan kärkeä. Muita turbulenssiin vaikuttavia tekijöitä ovat lavan kaavamman pään muoto sekä ilman oma turbulenssi ja tuulennopeus. Myös lavan puhtaudella on vaikutusta, sillä epäpuhdas pinta aiheuttaa rosoisuutta lisäten näin turbulenssia. [29, s. 10]

Tuulivoimaloissa haetaan optimaalisinta tuottoa lapoja kääntämällä. Nostovoima kasvaa, kun kohtauskulma kasvaa. Kohtauskulmalla tarkoitetaan suhteellisen tuulennopeuden ja lavan jänneviivan välistä kulmaa. Suhteellinen tuulennopeus muodostuu maanpäällisen tuulen ja roottorin pyörimisestä aiheutuvan ilmavirtauksen seurauksena. Kohtauskulman liika kasvattaminen voi johtaa sakkaamiseen, jolloin nostovoima tippuu voimakkaasti. [18, s. 21, s. 31–32] Sakkautilanteessa melu voimistuu. Sakkaaminen, ja täten myös melutason kasvaminen, voidaan välttää lapakulmaa säätämällä. [29, s. 11]

Doppler-ilmiön vaikutuksesta aerodynaamisen melun taso ei ole tasaista, vaan riippuu lavan pyörimisnopeudesta. Melutaso kasvaa maston kohdalla. Tällöin syntyy uutta ääntä, kun ilmakerros lavan ja tornin välissä puristuu. Lisäksi tapahtuu äänen heijastumista. [29, s. 9]

Aerodynaamisen melun lisäksi tuulivoimatuotannossa syntyy tavallisia käyntiäänisiä ja runkovärähtelyä. Käyntiäänien lähteistä merkittävin on vaihteisto. Vaihteistoa jäähdytetään ilmajäähdytyksellä, minkä johdosta syntyy virtaus- ja moottorimelua. [29, s. 11] Vaihteisto on myös herkin komponentti vikaantumaan [18, s. 41], joten niin tuulivoimalan toimintavarmuuden, kuin syntyvän melun kannalta on hyvä asia, mikäli vaihteistosta päästään eroon. Konehuoneen komponenteista myös generaattori voi aiheuttaa melua. Sekä vaihteisto, että generaattori ovat koteloitu meluhaittojen vähentämiseksi. [29, s. 11]

3.2.2 Melun suuruus ja suuruuteen vaikuttavat tekijät

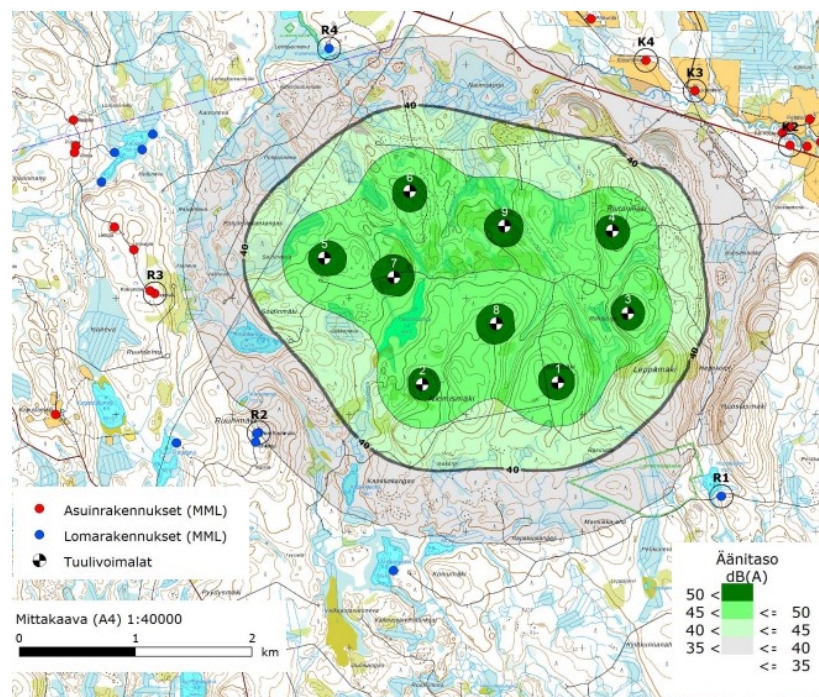
Tuulivoimaloiden melun lähtötaso määritetään laskennallisesti ja mittaaminen tapahtuu noin 50 m etäisyydeltä. Lähtötasojen A-painotetut melutasot ovat 3–4.2 MW voimaloilla 102–106 dB ja 5–6 MW voimaloilla 104–107 dB. [30] Verrattaessa näitä arvoja taulukon 1 arvoihin, nähdään, että tuulivoimamelun lähtötasot ovat verrattavissa esimerkiksi moottorisahan tai yökerhon melutasoihin. Tuulivoimalan juurella vallitseva melutaso on noin 60 desibeliä [30]. Taulukosta 1 nähdään tämän vastaavan äänestä puhetta. Tätä voidaan verrata myös Suomen merkittävimpään ympäristömelun lähteeseen, eli tieliikenteeseen. Taulukon 1 mukaan tieliikenteen melupäästöt ovat 70–85 dB, eli huomattavasti suuremmat kuin tuulivoimaloiden aiheuttamat melupäästöt. Lisäksi taulukosta 2 nähdään, että pitkäaikaisen altistuksen yhteydessä kuulovaurion syntymisen riskiraja on 85 dB. Heti voidaan siis todeta, että kuulovaurion syntyminen tuulivoimalan melun seurauksena ei käytännössä ole mahdollista.

Suomessa laki määrittää ylärajat tuulivoimaloiden synnyttämälle A-painotetulle ekvivalenttitasolle L_{Aeq} . Pysyvän asutuksen alueilla ulkomelutaso ei saa päivisin, eli välillä 7–22, ylittää 45 desibeliä. Öisin, eli välillä 22–7, ulkomelutason yläraja on 40 desibeliä. [31]

Nämä ohjeavrot ovat linjassa WHO:n Eurooppaa koskevan ohjeistuksen kanssa, jonka mukaan päivän ja yön melutasot eivät saa ylittää 45 desibeliä [11, s. 77].

Tuulivoimaloita ei rakenneta pysyvän asutuksen välittömään läheisyyteen. Esimerkiksi 300 m päässä voimalasta äänenpainetasot ovat noin 43 desibeliä. [32] Päiväsaikaan ei siis ole todennäköistä, että äänenpainetasot kasvaisivat suuremmiksi kuin mitä laki sallii. Öisin tämä on mahdollista, mikäli asunto sijaitsee hyvin lähellä tuulivoimalaa.

Tuulivoimamelua arvioitaessa tulee huomioida lukuisia ympäristötekijöitä, jotka vaikuttavat syntyvän melun suuruuteen. Etenkin päiväsaikaan ympäristössä esiintyvää taustamelua voi olla paljonkin, jolloin tuulivoimalan aiheuttamaa melua ei koeta niin häiritseväksi. Monesti taustamelu on niin voimakasta, että tuulivoimalan melu hukkuu siihen täysin [32]. Huomioitavaa on, että taustamelu on öisin pienempää, joten tuulivoimaloiden melu voi tällöin häiritä enemmän. Luonnollisesti havaittavan melun suuruuteen vaikuttaa merkittävästi etäisyys tuulivoimalasta. Melun vaimentumista tuulivoimalasta etäännyttäessä havainnollistaa kuva 5. Kuva 5 on Rambollin laatimasta meluselvityksestä [33] ja siitä on selkeästi havaittavissa, kuinka merkittävästi melutaso laskee etäisyyden kasvaessa. Kuvasta nähdään myös, että kyseisessä tapauksessa yhdenkään asunnon kohdalla ei ylitetä lain asettamia rajoja melulle yö- tai päiväsaikaan.



Kuva 5. Melun vaimentuminen etäisyyden kasvaessa, mukailen [33]

Muita melun suuruuteen vaikuttavia tekijöitä ovat maanpinnan muodot ja absorptiokyky sekä vallitseva säätila, kuten lämpötila tai tuulennopeus. [29, s. 16–18] Lisäksi voimak-

kuutta arvioitaessa on syytä pitää melukäsitteen subjektiivisuus ja aistijoiden meluherkkyys. Esimerkiksi negatiiviset asenteet tuulivoimaa kohtaan voivat merkittävästi lisätä aistitun melun häiritsevyyttä.

4. TEHTYJEN SELVITYSTEN AVULLA HAVAITUT MELUHAITAT

Tässä luvussa luodaan katsaus Suomessa tehtyihin tutkimuksiin tuulivoimaloiden melusta ja infraäänestä. Esitetyt tutkimukset valaisevat, kuinka suuria melutasoja tuulivoimalat aiheuttavat ja mikä näiden melutasojen vaikutus on voimaloiden lähistöllä asuviin ihmisiin. Lopuksi vielä tarkastellaan tuulivoimalla saavutettavia hyötyjä ja vertaillaan näitä mahdollisesti esiin tulleisiin haittavaikutuksiin.

4.1 Terveyden ja hyvinvoinnin laitoksen tutkimus

Terveyden ja hyvinvoinnin laitos THL toteutti kyselytutkimuksen tuulivoiman meluhaitoista yhdeksällä eri tuulivoima-alueella. Kysely toteutettiin vuosina 2015–2016 ja sen tavoitteena oli selvittää meluhaittojen yleisyys. Tutkimukseen valittiin viisi aluetta, joissa 2,5 km etäisyydellä tuulivoimalasta oli vähintään 100 asuntoa. Näistä puhutaan alueina 1–5. Nämä alueet jaettiin kolmeen vyöhykkeeseen sen mukaan, mikä niiden etäisyys tuulivoimalasta oli. Ensimmäisellä vyöhykkeellä etäisyys voimaloista oli alle 2,5 km, toisella välillä 2,5–5 km ja kolmannella 5–10 km. Alueilla 1–5 oli 3–16 voimalaa, joiden nimellistehot olivat väliltä 2,4–3,3 MW. Lisäksi tutkimukseen otettiin mukaan neljä aluetta, joissa asuntoja oli vähemmän kuin alueille 1–5, mutta joissa oli tullut julkisuuteen meluhaittoja. Näistä puhutaan alueina 6–9. Näiltä alueilta otettiin mukaan ainoastaan asunnot, joiden etäisyys voimaloista oli alle 2,5 km. Alueilla 6–9 tuulivoimaloiden määrä oli 1–10, ja niiden nimellistehot vaihtelivat välillä 3–3,3 MW. [34]

Alueiden 1–5 toisella vyöhykkeellä tuulivoiman ääniä ei sisätiloissa kuullut lainkaan 97 % vastaajista. Vyöhykkeellä 3 vastaava luku oli 99 %. Ulkona tai parvekkeella vastaavat luvut ovat 92 % ja 99 %. Sen sijaan ensimmäisellä vyöhykkeellä äänten kuuleminen on hieman yleisempää. Ensimmäisen vyöhykkeen vastauksia voidaan vertailla alueiden 6–9 vastauksiin. Vastaukset on esitetty taulukossa 3.

Taulukosta 3 nähdään, että alueilla 1–5 vain hyvin harva kuulee sisätiloihin tuulivoimaloiden aiheuttamia ääniä. Ulkona tämä on yleisempää ja moni kuulee ääniä melko usein. Alueilla 6–9 sisätiloissa äänten kuuleminen on yleisempää ja ulkona jopa suurin osa kuulee ääniä satunnaisesti tai usein kuin ei lainkaan. Tämä on linjassa sen tiedon kanssa, että alueilla tuulivoimamelu on aiheuttanut ongelmia.

Taulukko 3. Tuulivoimaloiden kuuluvuus, mukailten [34]

	ei koskaan (%)	satunnaisesti (%)	viikoittain (%)	lähes päivittäin/päivittäin (%)
kuuluuko ääni sisällä?				
alueet 1–5 (vyöhyke 1)	89	6,1	3,4	1,6
alueet 6–9	61	25	6,9	6,9
kuuluuko ääni ulkona tai parvekkeella?				
alueet 1–5 (vyöhyke 1)	60	23	9,3	7,9
alueet 6–9	27	39	11	23

Tutkimuksessa kysyttiin myös tuulivoimalamelun häiritsevyydestä. Alueilla 1–5 suurin osa vastaajista koki, ettei melu häiritse lainkaan sisä- tai ulkotiloissa. Nukkumisen häiriintyminen oli myös harvinaista. Luvut ovat melko hyvin linjassa äänten kuuluvuuksien kanssa. Sen sijaan alueilla 6–9 luvut ovat melko poikkeavia etenkin ulkotiloissa, joissa 51 % kertoi, ettei melu aiheuta lainkaan häiriötä. Lähes puolet siis kokivat melun häiritsevän joko paljon tai vähän. Vastaajista 78 % koki, ettei voimaloiden äänillä ole vaikutuksia nukkumiseen, eli pieniä ongelmia on havaittavissa. [34]

Tutkimuksessa kyseltiin myös erilaisten oireiden, kuten esimerkiksi päänsäryn, rytmihäiriöiden ja ahdistuneisuuden, yleisyyttä. Erilaisia oireita esiintyi kaikilla alueilla ja vyöhykkeillä lähes saman verran. Tutkimuksessa ei kuitenkaan löydetty yhteyttä esiintyneiden oireiden ja tuulivoimamelun välillä. [34]

4.2 Häiritsevä sisämelu

Hongiston, Olivan ja Keräsen tekemässä tutkimuksessa mitattiin 3–5 MW tuulivoimaloiden aiheuttamaa melua ulkona sekä tutkittiin sen häiritsevyyttä sisätiloissa, missä raja siedettävälle äänitasolle on tiukempi. Tutkimuksessa oli mukana 3 tuulivoimala-aluetta Suomessa. Alueiden asukkaille lähetettiin kysely, jonka avulla selvitettiin asukkaiden yleistä suhtautumista tuulivoimaan ja tuulivoiman aiheuttaman äänien häiritsevyyttä. Alueilla tuulivoimaloiden määrä vaihteli välillä 3–12 ja mitatut L_{Aeq} -tasot välillä 26,7–44,2 desibeliä. Tämän johdosta tutkijat päättelivät melun ekvivalenttitason olevan sisällä korkeintaan 25 desibeliä. Huomioitavaa oli, että tutkimuksessa ei löydetty merkittävää eroa häiritsevyydessä suurien, yli 3 MW tuulivoimaloiden, ja pienempien, alle 1,5 MW tuulivoimaloiden, välillä. [35]

Suurin osa vastaajista koki, ettei tuulivoimaloiden aiheuttama melu häiritse sisätiloissa. Vastaajista 68 % ei lainkaan kuullut tuulivoimaloiden ääniä. Vastaajista 14,3 % taas kertoi, että vaikka ääniä kuuluu sisälle, ne eivät häiritse. Vastaajista 17,4 % koki sisämelun jollakin tasolla häiritsevänä. Ulkona 75,5 %:a vastaajista kuuli tuulivoimaloiden äänet, ja ne häiritsivät jollakin tasolla 31 %:a vastaajista. [35]

Tutkimuksessa todetaan, että sisämelu koetaan hyvin häiritseväksi usein muista syistä kuin äänitaosta johtuen. Tästä syystä on tärkeää tutkia muita melun häiritsevyyteen vaikuttavia tekijöitä kuin vain melun voimakkuutta. Tuulivoimaloiden sijaintipäätöksiä tehdessä keskittymien on kuitenkin äänitasoissa. [35]

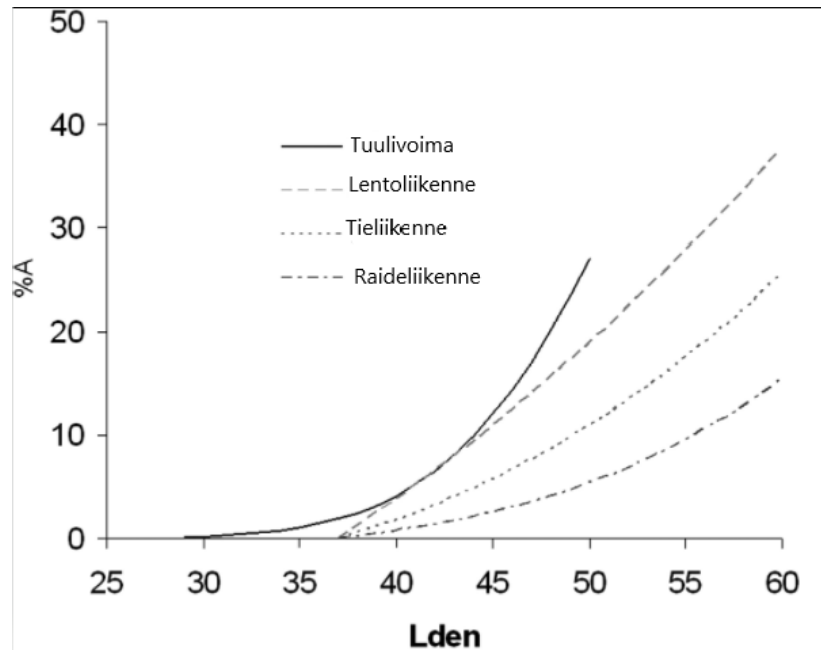
Keskittyminen pelkkiin äänitasoihin voidaan nähdä ongelmallisena. Toisaalta tuulivoimaloiden läheisyydessä asuvien asenteita voidaan muuttaa positiivisemmiksi tuulivoimaa kohtaan tiedottamalla selkeästi tuulivoimaloiden aiheuttaman melun voimakkuudesta ja sen vaikutuksista terveyteen. Lisäksi tiedottamalla myös muista tuulivoimaloiden vaikutuksista, ja etenkin positiivisiin vaikutuksiin keskittymällä, voitaneen myönteisesti vaikuttaa voimaloiden läheisyydessä asuvien asenteisiin. Asenteiden muuttaminen tuulivoimamyönteisiksi vaikuttanee siihen, kuinka häiritsevänä tuulivoimaloiden aiheuttama melu koetaan.

Lappeenrannan teknillisen yliopiston tutkimus antoi samanlaisia tuloksia sisämelun häiritsevyydestä. Tämänkin tutkimuksen mukaan pelkästään ekvivalenttitasojen mittaaminen ja säätely eivät välttämättä riitä, vaan tulee kiinnittää huomiota muihinkin häiritsevyyttä lisääviin tekijöihin. Tutkimuksessa löydettiin yhteys tuulivoimaloiden koettujen maisemavaikutusten ja niiden äänen häiritsevyyden välillä. Mikäli tuulivoimaloiden koettiin aiheuttavan maisemahaittoja, tai asenteet olivat muuten negatiivisia, myös tuulivoimaloiden ääni koettiin häiritsevämpänä. Koetulla häiritsevyydellä puolestaan havaittiin olevan yhteys uniongelmiin kanssa. [36, s. 33–34]

Tuulivoimalan melutasot eivät siis ole erityisen merkittäviä. Tästä huolimatta tuulivoimaloiden aiheuttama melu kuitenkin esitettyjen tutkimusten mukaan häiritsee ihmisiä. Janssen ja Vos vertailevat tutkimuksessaan [37] tuulivoimalamelun aiheuttamaa häiritsevyyttä liikennemelun lähteisiin. Tulokset on esitetty kuvassa 6. Kuvan 6 y-akseli kuvaa häiriintyneiden ihmisten prosentuaalista määrää ja x-akselin L_{den} päivä-ilta-yö melutasoa. Tämä tarkoittaa, että x-akselilla esitetyillä arvoilla vertailuaikavälinä on koko vuorokausi. [11].

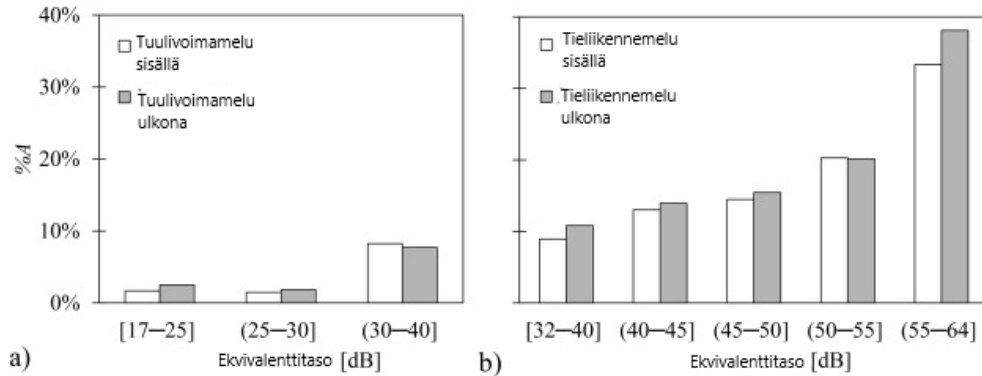
Kuvasta 6 nähdään, että tuulivoimamelu alkaa häiritsemään sisätiloissa alhaisemmilla melutasoilla eri liikennemelun lähteisiin verrattuna. Tuloksia käsiteltäessä tulee huomioida, että ne pohjautuvat Ruotsissa vuosina 2000 ja 2007, sekä Hollannissa vuonna

2007 kerättyyn tietoon. Tuulivoima-alalla, ja mahdollisesti myös ihmisten suhtautumisessa tuulivoimaa kohtaan, on tapahtunut paljon muutoksia tässä ajassa. Voimaloiden koko on tutkimusta tehdessä ollut mitä todennäköisemmin pienempi kuin tässä työssä esitellyissä tutkimuksissa. Tuloksia on kritisoitu siitä, että vain hyvin pieni määrä ihmisiä altistuu sisätiloissa yli 45 dB:n tuulivoimamelulle. Tuulivoiman käyrää piirrettäessä on myös poistettu tuulivoimasta taloudellista hyötyä saavat. Samaa ei ole tehty muiden melulähteiden kohdalla. [38] Kuvaaja kuitenkin edelleen vahvistaa käsitystä, jonka mukaan pelkkä melutasojen tarkastelu ei riitä selittämään melun häiritsevyyttä.



Kuva 6. Eri melulähteiden häiritsevyys sisätiloissa, mukailten [37]

Turun ammattikorkeakoulun vuonna 2021 ilmestyneessä tutkimuksessa [39] päädytään ristiriitaiseen ratkaisuun edeltävän kanssa. Tutkimuksessa tarkasteltiin samanaikaisesti tuulivoiman ja tieliikenteen aiheuttamaa melua. Tutkimus toteutettiin Suomessa Haminassa. Kuten kuvasta 7 nähdään, tutkimuksessa havaittiin tuulivoima- ja tieliikennemelun häiritsevyyden olevan lähes samalla tasolla äänenpainetason ollessa välillä 30–40 desibeliä.



Kuva 7. Tuulivoimamelun (a) ja tieliikennemelun (b) häiritsevyys, mukailten [39]

Tutkimuksessa todettiin, että tuulivoimalat voivat aiheuttaa häiritsevää melua, mutta muita terveyshaittoja tuulivoimameluun ei voida yhdistää. Sen sijaan tieliikennemelun todettiin olevan yhteydessä migreenin, päänsäryn, huimauksen, korviin liittyvien terveyshaittojen sekä jopa sydänongelmien kohonneeseen todennäköisyyteen. Tulosten pohjalta tutkimuksessa päädyttiin siihen, että on tärkeämpää kiinnittää huomiota tieliikennemelun vaimentamiseen kuin tuulivoimamelun. Tämä tehdään oletuksella, että tuulivoimamelun äänenpainetasot eivät ylitä ohjeistettua 40 dB:n rajaa. [39] Kuten aiemmin on käynyt ilmi, tuulivoimaloiden melutasot harvoin ylittävät tätä. Lisäksi tutkimusraportissa todetaan lisätutkimuksen olevan tarpeen, sillä tuulivoimamelun terveysvaikutusten tutkiminen on edelleen liian vähäistä [39]. Tutkimus huomioi ainoastaan melutasot, ei muita selittäviä tekijöitä. Se kuitenkin antaa todisteita, että tuulivoimamelun kohdalla ei ole syytä kiristää lainsäädäntöä melutasojen suhteen [39].

4.3 Infraäänien vaikutukset

Tuulivoimalat tuottavat infraääntä, jota ei useinkaan ihmiskorvin ole mahdollista havaita. Mikäli infraääni on voimakasta, eli välillä 90–120 dB, se on mahdollista havaita. Tämänkaltaiset infraäänit ovat kuitenkin hyvin harvinaisia. Infraääntä synnyttävät tuulivoimaloiden lisäksi lukuisat eri lähteet. Ei-kuultavalle infraäänelle altistutaankin päivittäin. [40]

VTT:n johtamassa tutkimuksessa [41], johon osallistuivat myös THL, Työterveyslaitos, sekä Helsingin yliopisto, tutkittiin infraäänien aiheuttamia terveysvaikutuksia. Tutkimuksessa suoritettiin äänitasomittauksia kahdella eri tuulivoima-alueella. Tuulivoimaloiden koot vaihtelivat välillä 3–3,3 MW. Mittausten lisäksi infraäänien vaikutuksia tutkittiin kyselyiden ja kuuntelutestien avulla. Molemmilla tutkituilla alueilla oli raportoitu tuulivoimaloiden infraääniin liitettyjä oireita.

Tutkimuksessa todetaan tuulivoimaloiden muuttavan ääniympäristöä alueiden asuntojen sisällä kaupunkimaisempaan suuntaan. Lähellä voimaloita, eli noin 1,5 km:n etäisyydellä, niin ihmiskorvin havaittava äänenvoimakkuus, kuin infraäänitasot, olivat samaa luokkaa kuin kaupunkiasunnoissa. Toinen huomio oli, että merkittävin osa äänistä oli alle 2 Hz taajuisia. Infraäänien ekvivalenttitasot vaihtelivat mittauksissa välillä 67–75 dB. [41, s. 77–78] Taajuuden ollessa niinkin alhainen kuin 2 Hz, ihminen ei kykene havaitsemaan näitä ääniä. Tämän näkee myös kuvasta 2. Tutkimuksessa kuitenkin kerrotaan, että osa ihmisistä voi kyetä havaitsemaan korkeimman mitatun, 102 dB:n, äänenpainetason, vaikka taajuus onkin hyvin alhainen [41, s. 77].

Voimaloista 2,5 km:n etäisyydellä elävistä 15 % raportoi infraäänistä johtuvista terveysvaikutuksista. Koko tutkimukseen osallistuneista 5 % ilmoitti terveysvaikutuksista. Yleisimmin ilmoitetut terveysvaikutukset liittyivät korviin. Näitä olivat esimerkiksi paineen tunne korvassa tai tinnitus. Lähes yhtä yleinen ongelma oli unihäiriöt. Muita mainittuja ongelmia olivat sydänongelmat, päänsärky, ahdistuneisuus, uupumus, korkea verenpaine, sekä keskittymishäiriöt. [41, s. 31] Oireet ovat siis samankaltaisia kuin luvussa 2.4 esitetyt kuultavan melun terveysvaikutukset.

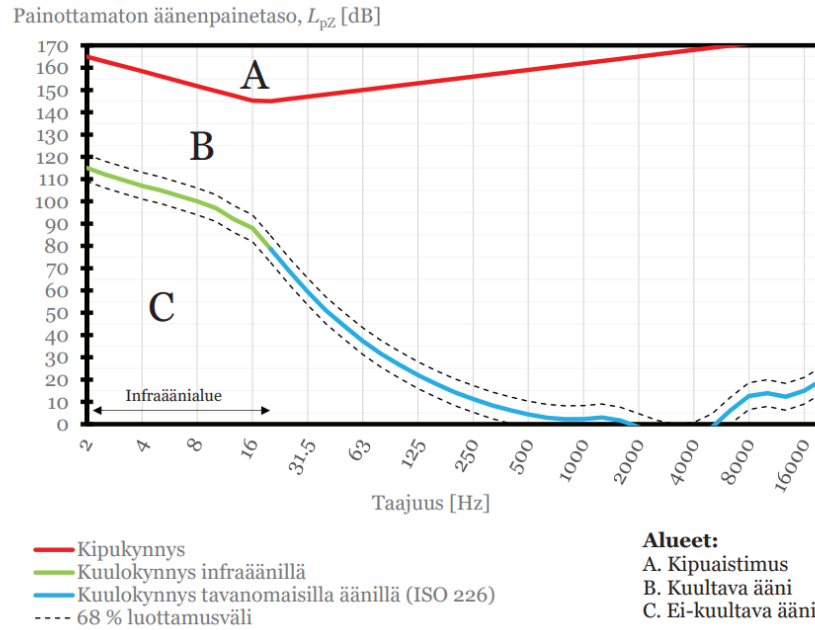
Infraääneen liitettyjen terveysvaikutusten ilmentyminen oli yleisempää, mikäli asenne tuulivoimaa kohtaan oli negatiivinen tai tuulivoiman aiheuttamia ääniä pidettiin terveysuhkana. Myös erilaiset toiminnalliset häiriöt, ärsyyntyminen kuultavasta äänestä tai tuulivoimalan valoista olivat yhteydessä oireiden kokemiseen. Huolimatta siitä, että asukkaat yhdistivät monia eri oireita tuulivoimaloiden infraääneen, tutkijat totesivat, että infraäänit eivät ole terveysongelmien taustalla. Tämä perusteltiin laboratorikokeilla, joissa toisen ryhmän muodostivat terveysvaikutuksista raportoineet ja toisen henkilöt, jotka eivät olleet raportoineet terveysvaikutuksista. Ryhmien välillä ei havaittu mitään eroja siinä, miten infraääntä sisältäneisiin näytteisiin reagoitiin. Molemmat ryhmät myös reagoivat samalla tavalla infraääntä sisältäviin ja ei sisältäviin näytteisiin. Lisäksi henkilöt, jotka olivat yhdistäneet tuulivoimaloiden aiheuttaman infraäänien terveysongelmiinsa, eivät laboratorikokeissa raportoineet infraääntä sisältäviä näytteitä häiritsevämmiksi kuin näytteitä, jotka eivät sisältäneet infraääniä. Infraäänien sijaan tutkijat uskovat tuulivoimaloiden melun häiritsevyyden johtuvan jaksollisesta käyntiäänestä ja äänen kokemisesta häiritseväksi. Myös nosebovaikutuksella uskotaan olevan osansa äänen kokemisesta häiritsevänä. [41, s. 32, 72–76] Nosebovaikutuksella tarkoitetaan tilannetta, jossa kielteiset odotukset ja ennakkoluulot, sekä aiempiin kokemuksiin perustuva ehdollistuminen, aiheuttavat fysiologisia haittoja, kuten uusien oireiden ilmentymistä tai vanhojen oireiden pahenemista [42].

Kimmo Suomi ja Pirjo Keronen päätyvät kirjallisuustutkielmassaan [43] täysin erilaiseen johtopäätökseen. Kyseisessä tutkimuksessa tuotiin esille tutkimuksia, joissa tuulivoiman infraääni on osoitettu haitalliseksi. Tämän johdosta on luonnollista, että tutkimuksen johtopäätös on, että ”tuulivoiman hallitsematon lisääminen ilman riittävää tutkimustietoa merkitsee suuren riskin ottamista ihmisten terveyden kustannuksella.” Katsauksessa myös kritisoidaan edellä esitettyä VTT:n tutkimusta siitä, että vastaajien sosio-ekonomista taustaa ei tarkastettu, vastaajien määrä oli liian pieni sekä altistumisaika infraäänelle oli liian lyhyt. Kirjoittajat toteavat, että VTT:n tutkimusaineistoilla tai -metodeilla ei voida tehdä johtopäätöksiä infraäänien aiheuttamista terveysongelmista. [43, s. 16–18]

Infraäänien haittoja esittelevässä tutkimuksessa todetaan tutkimuksen olevan Suomessa liian hajanaista, kun otetaan huomioon, kuinka merkittävän osan tuulivoima Suomen sähköenergiasta tuottaa. Katsaus korostaa, että infraäänestä tarvitaan paljon lisää tutkimuksia, joiden avulla voidaan selvittää usean muuttujan yhteisvaikutuksia. Tutkimusten tulisi myös olla kestoiltaan pidempiä. [43, s. 61–63]

Huolimatta mainitusta tutkimuksesta [43], yleinen käsitys on, että ihmisen kuulokynnyksen alittava infraääni ei aiheuta terveysvaikutuksia. Sen sijaan kuultava infraääni voi aiheuttaa terveysvaikutuksia, jotka ovat hyvin samankaltaisia kuin suurempitaajuisten melun aiheuttamat terveyshaitat. Hongisto näkee tutkimuksessaan [44] ongelmallisena yleisen harhaluulon, jonka mukaan infraääniä ei ole mahdollista kuulla. Tästä seuraa, että monet uskovat infraäänien aiheuttavan haitallisia terveysvaikutuksia kaikilla äänenpaine-
tasoilla. Tämä kuitenkin tarkoittaisi Hongiston mukaan sitä, että kaikki ihmiset maapallolla sairastuisivat, sillä ei-kuultavalta infraääneltä ei ole mahdollista välttyä. [44]

Kuva 8 auttaa havainnollistamaan äänenpaineitasoja, jotka vaaditaan äänen kuulemiseen eri taajuuksilla. Kuvasta on nähtävissä, että infraäänitasoilla äänenpaineitasojen on oltava suuria, jotta ihminen voi ne havaita. Luottamusväli 68 % tarkoittaa aluetta, jossa standardipoikkeama kuulokynnyksen keskiarvosta on 6 desibeliä. Tämä alue pitää sisällään 68 % väestöstä. Loput 16 % pystyvät kuulemaan ääniä alimman katkoviivan alapuolelta. [44]



Kuva 8. Ihmisen kuulokynnys eri taajuuksilla [44]

4.4 Tuulivoiman terveyshyödyt

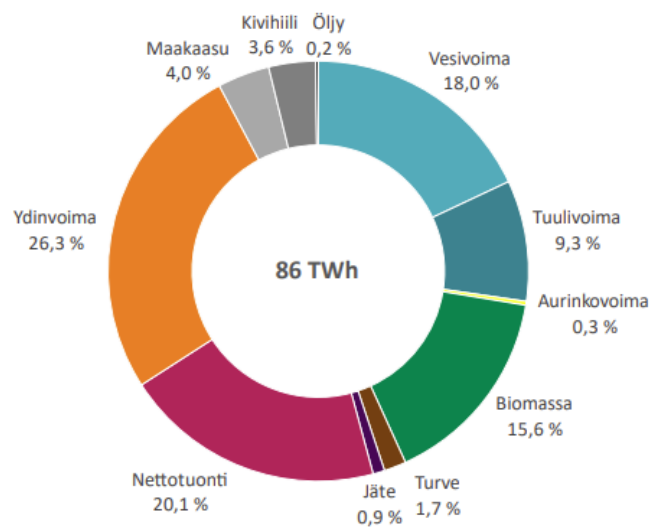
Esiteltyjen haittavaikutusten lisäksi on syytä tarkastella tuulivoiman tuomia hyötyjä. Ihminen on toiminnallaan aiheuttanut maapallolla ilmastokriisin, joka aiheuttaa jo nyt merkittäviä kärsimyksiä. Tilanteen ennustetaan pahenevan merkittävästi. WHO:n arvion mukaan ilmastonmuutoksen johdosta lisääntyvät aliravitsemus, malaria, ripuli sekä lämpöstressi aiheuttavat vuosien 2030 ja 2050 välisenä aikana 250 000 lisäkuolemaa. Kasvihuonekaasujen vähentäminen on keino kirkastaa tulevaisuudennäkymiä. [45]

WHO:n arvion mukaan ilmansaasteet tappavat vuosittain noin seitsemän miljoonaa ihmistä maailmanlaajuisesti. Ilmansaasteet lisäävät esimerkiksi aivohalvauksia sekä sydän- ja keuhkosairauksia. WHO:n mukaan 99 % maailman ihmisistä hengittää ilmaa, joka ei täytä WHO:n asettamia ohjearvoja. [46] Ilmansaasteet aiheuttavat vakavia seurauksia myös Suomessa. Ympäristöministeriön mukaan niiden seurauksena Suomessa kuolee ennenaikaisesti 1600–2000 ihmistä vuosittain. Lisäksi ilmansaasteet aiheuttavat materiaalivahinkoja rakennetussa ympäristössä, rehevöitymistä ja happamoitumista. [47] Ilmansaasteet pilaavat ympäristöä ja aiheuttavat terveyshaittoja, aivan kuten melu.

Tilastokeskuksen [48] mukaan energiasektori on Suomessa merkittävin päästölähde. Vuonna 2020 kasvihuonekaasujen kokonaispäästöt olivat 48,3 miljoonaa hiilidioksidiekvivalenttonnia, joista energiasektori tuotti 72 %. Suomen kokonaispäästöt laskivat vuonna 2020 vuoden 2019 tasosta. Merkittävin lasku tapahtui energiasektorilla. Tilastokeskus mainitsee yhtenä syynä tuulivoiman lisääntymisen. [48]

Energiajärjestelmän muuttamisella puhtaammaksi on mahdollista vähentää merkittävästi kasvihuonekaasupäästöjä. Fingridin toimitusjohtaja Jukka Ruusunen kertoo Ylen artikkelissa [49], että Suomen energiajärjestelmän puhdistaminen johtaa sähkönkulutuksen voimakkaaseen kasvuun. Ruusunen mukaan tuulivoima voisi olla ratkaisu vastata kasvavaan sähkön kysyntään. Artikkelissa [49] Ruusunen myös kertoo Suomen olevan sähköntuotannossa hyvin tuontiriippuvainen. Tuulivoima lisäisi omavaraisuutta.

Kuva 9 havainnollistaa tuulivoiman sekä tuonnin osuutta Suomessa vuonna 2021. Tuonin nähdään olevan merkittävää. Kuvasta 9 nähdään, että tuulivoiman osuus ei vielä ole merkittävän suuri, mutta se on jatkuvassa kasvussa.



Kuva 9. Sähkön tuotanto energialähteittäin ja nettotuonti Suomessa 2021, [50]

Tuuli on energialähteenä päästötön ja sitä on saatavilla Suomessa. Tuulivoimaa lisäämällä vähennetään ilmansaasteita ja hidastetaan ilmastonmuutosta. Ilmansaasteiden ja ilmastonmuutoksen aiheuttamien ongelmien yhteydessä on hyvä ymmärtää, että kukaan ei voi välttyä niiltä. Energiajärjestelmän uudistamisella muun muassa tuulivoimaa lisäämällä parannetaan suoraan ihmisten elinolosuhteita ja ehkäistään sairauksia ja jopa kuolemia. Ilmastonmuutoksen ja ilmansaasteiden aiheuttamien terveyshaittojen voidaan todeta olevan kiistattomampia ja merkittävämpi verrattuna esiteltyihin tuulivoimaloiden meluhaittoihin. On siis perusteltua lisätä tuulivoimatuotantoa.

5. YHTEENVETO

Melu voidaan määritellä häiritsevä, ei-toivottuna äänenä, joka voi aiheuttaa haitallisia terveysvaikutuksia. Työssä todettiin melun olevan käsitteenä hyvin subjektiivinen. Tämä aiheuttaa haasteita melun tutkimisessa. Pelkkä melun voimakkuuden mittaaminen on sen sijaan helppoa. Työssä määriteltiin logaritmiset tasosuureet äänenpainetaso, ekvivalenttitaso sekä äänitehotaso, joiden avulla melun voimakkuutta arvioidaan.

Työssä kiinnitettiin huomiota äänen taajuuteen, jolla on suuri vaikutus siihen, kuinka voimakkaana ääni aistitaan. Taajuus tulee huomioida myös melua mitattaessa käyttämällä eri taajuuspainotuksia, joista A-painotus on selvästi yleisin. Melun voimakkuutta kuvataan yleisimmin A-painotetun ekvivalenttitason L_{Aeq} avulla.

Melusta aiheutuu terveyshaittoja. Kuulovaurio on suoraan melusta aiheutuva terveyshaitta. Kuulovaurion lisäksi melu voi aiheuttaa niin fyysisiä kuin psyykkisiä kuulon ulkopuolisia terveyshaittoja. Näissä tapauksissa yhteyttä melun ja terveyshaitan välillä ei ole niin selkeä todistaa kuin kuulovaurion yhteydessä. Kuulon ulkopuolisten haittojen yhteydessä ihmisen meluherkkyydellä on merkittävä rooli.

Energiajärjestelmän maailmanlaajuinen puhdistaminen näkyy tuulivoiman määrän merkittävässä kasvussa, jonka odotetaan jatkuvan myös tulevaisuudessa. Tuulivoimaloiden aiheuttamat äänet huolettavat ihmisiä. Tuulivoimalan lavat synnyttävät aerodynaamista melua. Lavoista syntyvä ääni on jaksollista, jonka on todettu lisäävän häiritsevyyttä. Kyseinen lapoljen aerodynaaminen melu muodostaa suurimman osan tuulivoimaloiden melupäästöistä. Tämän lisäksi tuulivoimaloiden sähköntuotantokoneiston osista syntyy käyntiääniä.

Voimakkuudeltaan tuulivoimaloiden melu ei ole erityisen merkittävää. Melutasojen A-painotetut lähtötasot vaihtelevat tuulivoimalan koosta riippuen välillä 102–107 desibeliä. Voimaloiden juurella mitattaessa melutasot ovat noin 60 desibeliä. Jo tämä melutaso on merkittävästi tieliikenteen melutasoja alhaisempi. Tuulivoimaloita ei myöskään rakenneta asuntojen välittömään läheisyyteen. Melutasot laskevat etäisyyden kasvaessa, joten asuntojen pihoilla melutasot ovat selkeästi alhaisempia kuin voimaloiden juurella. Usein tuulivoimaloiden äänet jopa hukkuvat taustamelun alle.

Työssä tarkasteltiin Suomessa tehtyjä tutkimuksia tuulivoimaloiden melusta. Tarkasteltujen tutkimusten pohjalta voidaan todeta, että tuulivoimaloiden melutasot ovat usein niin alhaisia, että niitä ei lainkaan havaita asuntojen sisällä. Osa ihmisistä kuitenkin kokee

tuulivoimaloiden melun häiritsevänä myös sisätiloissa. Häiritsevyyttä ei tutkimuksissa selitetty ainoastaan melun ekvivalenttitasojen avulla. Sen sijaan korostettiin häiritsevyyden johtuvan usein muista sysitä kuin vain äänitasoista. Nämä muut syyt kaipaivat lisää tutkimusta. Kuten todettu, tämänkaltainen melututkimus on kuitenkin hyvin haastavaa, sillä eri äänien kokeminen häiritsevänä on hyvin ihmiskohtaista.

Suuri rooli tuulivoimaloiden melun yhteydessä on koetulla häiritsevyydellä. Koetun häiritsevyyden vähentämiseksi ihmisten asenteita tulee muuttaa tuulivoimamyönteisemmiksi myös silloin, kun voimala on lähellä omaa asuntoa. Näin voidaan vähentää meluhaittojen kokemista.

Kuultavan melun lisäksi tuulivoimaloiden tuottama infraääni herättää paljon keskustelua ja huolta. Infraäänen kohdalla huolta lisää haitallinen harhaluulo, jonka mukaan infraääntä ei ole lainkaan mahdollista kuulla. Infraääni voidaan jakaa kuultavaan ja ei-kuultavaan infraääneen. Äänenpainetason ollessa riittävän suuri, myös infraäänit on mahdollista havaita ihmiskorvin. Yleisimmin kuitenkin infraäänit ovat ei-kuultavia. Näin on myös tuulivoimaloiden tuottaman infraäänen kohdalla. Toistaiseksi ei-kuultavan infraäänen ei olla havaittu aiheuttavan terveyshaittoja. Tuulivoiman yhteydessä terveyshaittoille tulee etsiä muita syitä kuin infraäänit.

Keskusteltaessa tuulivoimaloiden aiheuttamista terveyshaitoista, tulee kiinnittää huomiota myös tuulivoimaloiden luomiin terveyshyötyihin. Ilmastokriisin aiheuttamaa uhkaa koko maapallolle ei voida kiistää. Kiistattomia ovat myös pienhiukkasten aiheuttamat terveyshaitat. Tuulivoimatuotantoa lisäämällä saadaan vähennettyä energiatuotannosta aiheutuvia päästöjä. Näin hidastetaan ilmastonmuutosta ja vähennetään ilmassa olevien pienhiukkasten määrää. Täten vähennetään ihmiseen kohdistuvia terveysuhkia.

Kuten työssä ja esitellyissä tutkimuksissa todetaan, tuulivoimaloiden tuottama melu vaatii edelleen lisätutkimusta. Ei myöskään tule väheksyä meluhaitoista ilmoittaneiden ihmisten kokemuksia, oireet ovat todellisia, vaikka niiden aiheuttajaa ei kyettäisikään määrittämään. Tuulivoimaloiden valmistajien tulee myös kiinnittää huomiota seikkoihin, joiden avulla tuulivoimaloiden melupäästöjä voidaan pienentää jo valmistusvaiheessa. Tuulivoimahankkeiden yhteydessä sijaintipäätökset tulee tehdä tarkkaan ja minimoida mahdolliset haittavaikutukset. Ihmisten huolia tuulivoimaa kohtaan tulee lievittää. Tiedottamalla ihmisille selkeästi tuulivoiman vaikutuksista ja suhteuttamalla haitat hyötyihin, voidaan muuttaa asenteita positiivisemmiksi ja vähentää koettuja meluhaittoja. Ilmastokriisin vastainen taistelu vaatii nopeita tekoja ja energiatuotannon puhdistaminen on hyvin merkittävässä roolissa. Tuulivoimatuotannon tulee jatkaa ennusteiden mukaista kasvua.

LÄHTEET

- [1] Melu, Terveyden ja hyvinvoinnin laitos, päivitetty 8.12.2021. Saatavissa (viitattu 31.1.2022): <https://thl.fi/fi/web/ymparistoterveys/melu>
- [2] S. Starck, L. Teräsvirta, Melu, Työterveyslaitos, Helsinki, 2009, 88 s.
- [3] H. Mussalo-Rauhamaa, W. Paile, J. Tuomisto, H. Vuorinen, Ympäristöterveys, 1. painos, Kustannus Oy Duodecim, Helsinki, 2007, 272 s.
- [4] F. Everest, K. Pohlmann, Master of Handbook of Acoustics, 7. painos, McGraw Hill, New York, 2022. Saatavissa (viitattu 2.2.2022): <https://www-accessengineer-library-com.libproxy.tuni.fi/content/book/9781260473599>
- [5] Sound waves, Pasco.com, Saatavissa (viitattu 6.2.2022): <https://www.pasco.com/products/guides/sound-waves>
- [6] Kuuloliitto, Kuulolla työssä viestikampanja, Melun vaikutukset, Kuuloliitto.fi, 2017. Saatavissa (viitattu 9.2.2022): <https://www.kuuloliitto.fi/wp-content/uploads/2017/09/Melun-vaikutukset.pdf>
- [7] T. Lahti, Akustinen mittaustekniikka, Teknillinen korkeakoulu, Sähkötekniikan osasto, Akustiikan ja äänenkäsittelytekniikan laboratorio, 2. korjattu painos, Espoo, 1995, 152 s.
- [8] L. Karkela, M. Kervinen, P. Konttinen, L. Mannilla, I. Parkkila, R. Seppänen, T. Yli-Kokko, MAOL-taulukot, 1.–4. painos, Kustannusosakeyhtiö Otava, Keuruu, 2014, 175 s.
- [9] M. Henttinen, P. Hynnä, M. Järviluoma, T. Lahti, K. Nevala, A. Vähänikkilä, Värähtelyn ja melun vaimennuskeinot kulkuvälineissä ja liikkuvissa työkoneneissa, Laskentaesimerkkejä ja käyttöesimerkkejä, VTT tiedotteita, Otamedia Oy Espoo, 2002. Saatavissa (viitattu 9.2.2022): <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/tiedotteet/2002/T2160.pdf>
- [10] C. Doolan, C. Hansen, K. Hansen, Wind farm noise: measurement, assessment, and control, Wiley, Chichester, 2017. Saatavissa (viitattu 14.2.2022): <https://ebookcentral.proquest.com/lib/tampere/reader.action?docID=4799579>
- [11] Environmental noise guidelines for the European region, World Health Organization, 2018. Saatavissa (viitattu 16.2.2022): https://www.euro.who.int/data/assets/pdf_file/0008/383921/noise-guidelines-eng.pdf
- [12] C. Sujatha, Vibration of acoustics: Measurement and signal analysis, 1. painos, McGraw-Hill, 2010. Saatavissa (viitattu 17.2.2022): <https://www-accessengineer-library-com.libproxy.tuni.fi/content/book/9780070148789>
- [13] S. Seppänen, Metalliteollisuudessa esiintyvän melun mittaaminen, arviointi ja mittausten menetelmien kehittäminen työturvallisuuden näkökulmasta, Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto, 2015. Saatavissa (viitattu 21.2.2022):

<https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/123456789/23524/Seppanen.pdf?sequence=3&isAllowed=y>

- [14] European Environment Agency, Environmental noise in Europe, 2020. Saatavissa (viitattu 22.2.2022): <https://www.eea.europa.eu/publications/environmental-noise-in-europe>
- [15] Työterveyslaitos, Fysikaaliset altisteet työpaikoilla, ttl.fi. Saatavissa (viitattu 22.2.2022): <https://www.ttl.fi/teemat/tyoturvaluisuus/altistuminen-tyoympariston-haittatekijoille/fysikaaliset-altisteet-tyopaikalla>
- [16] Tuulivoimatekniikka, Suomen Tuulivoimayhdistys. Saatavissa (viitattu 4.3.2022): <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoimatekniikka/tuulivoimatekniikka-2>
- [17] Eri tuulivoimalatyyppejä, Suomen Tuulivoimayhdistys. Saatavissa (viitattu 4.3.2022): <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoimatekniikka/eri-voimalatyyppeja>
- [18] P. Breeze, Wind power generation, 1. painos, Academic Press, Amsterdam, 2016. Saatavissa: https://andor.tuni.fi/view/action/uresolver.do?operation=resolveService&package_service_id=10723074160005973&institutionId=5973&customerId=5965
- [19] Tuulivoimateknologia, Motiva, päivitetty 26.5.2021. Saatavissa (viitattu 4.3.2022): https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/tuulivoima/tuulivoima_suomessa/tuulivoimateknologia
- [20] Tuulivoimaloiden rakenne, Suomen Tuulivoimayhdistys. Saatavissa (viitattu 4.3.2022): <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoimatekniikka/tuulivoimaloiden-rakenne>
- [21] Renewable capacity highlights, International renewable energy agency IRENA, 2021. Saatavissa (viitattu 7.3.2022): https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Apr/IRENA_-RE_Capacity_Highlights_2021.pdf?la=en&hash=1E133689564BC40C2392E85026F71A0D7A9C0B91
- [22] M. Farmer, J. Unwin, The top 10 countries with the largest wind energy capacity in 2021, Power Technology, 2019, päivitetty 25.1.2022. Saatavissa (viitattu 7.3.2022): <https://www.power-technology.com/features/wind-energy-by-country/>
- [23] Tuulivoima maailmalla, Suomen Tuulivoimayhdistys. Saatavissa (viitattu 7.3.2022): <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoima-suomessa-ja-maailmalla/tuulivoima-maailmalla>
- [24] Tuulivoimatilastot 2021: Tuulivoiman rakentamisessa takana ennätysellinen vuosi, Suomen tuulivoimayhdistys, 2022. Saatavissa (viitattu 7.3.2022): <https://tuulivoimayhdistys.fi/ajankohtaista/tiedotteet/tuulivoimatilastot-2021-tuulivoiman-rakentamisessa-takana-ennatysellinen-vuosi>
- [25] Wind energy, International renewable energy agency IRENA. Saatavissa (viitattu 7.3.2022): <https://www.irena.org/wind>
- [26] Tuulivoima Suomessa 2021, Suomen Tuulivoimayhdistys, 2022, Saatavissa: https://tuulivoimayhdistys.fi/media/tuulivoima_vuositilastot_2021-2.pdf

- [27] Wind Power, International renewable energy agency IRENA. Saatavissa (viitattu 7.3.2022): <https://www.irena.org/costs/Power-Generation-Costs/Wind-Power>
- [28] Future of wind, Executive summary, International renewable energy agency IRENA, 2019. Saatavissa (viitattu 7.3.2022): https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Oct/IRENA_Future_of_wind_2019_summ_EN.pdf?la=en&hash=D07089441987EBABC7F4BED63B62C83820C18724
- [29] C. Di Napoli, Tuulivoimaloiden melun syntytavat ja leviäminen, Ympäristöministeriö, Helsinki, 2007. Saatavissa: https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/38415/SY4_2007_Tuulivoimaloiden_melun_syntytavat_ja_leviaminen.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [30] Äänivaikutukset, Suomen Tuulivoimayhdistys. Saatavissa (viitattu 9.3.2022): <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoiman-vaikutukset/tuulivoiman-ymparistovaikutukset/aanivaikutukset>
- [31] Valtioneuvoston asetus tuulivoimaloiden ulkomelutason ohjearvoista, Finlex. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2015/20151107>
- [32] How loud is a wind turbine?, General electric, 2014. Saatavissa (viitattu 9.3.2022): <https://www.ge.com/news/reports/how-loud-is-a-wind-turbine>
- [33] V. Virtanen, Liimattalan tuulivoimahanke, Äänekoski, melumallinnus, Ramboll 2019. Saatavissa: https://www.aanekoski.fi/asuminen-ja-ymparisto/kaavoitus/kaavat/liimattalan-tuulivoimapuiston-osayleiskaava/liite7_1510047865_Liimattala_melumallinnus_2019-05-16.pdf
- [34] T. Lanki, P. Tiittanen, A. Turunen, Meluhaittojen kokeminen ja oireilu yhdeksällä tuulivoima-alueella Suomessa, Ympäristö ja Terveys-lehti, Terveysten ja hyvinvoinninlaitos, 2016. Saatavissa: https://www.julkari.fi/bitstream/handle/10024/131157/YT5-2016_Turunen_ym_final.pdf
- [35] V. Hongisto, J. Keränen, D. Oliva, Indoor noise annoyance due to 3-5 megawatt wind turbines – An exposure-response relationship, The Journal of the Acoustical Society of America, 2017. Saatavissa (viitattu 14.3.2022): <https://asa.scitation.org/doi/full/10.1121/1.5006903>
- [36] A. Grönman, M. Hujala, K. Hynynen, P. Härkönen, S. Janhunen, P. Kolari, M. Kuisma, J. Rantonen, Tuulivoimamelun häiritsevyyys kahdella tutkimuspaikalla Suomessa, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, 2016. Saatavissa: <https://lutpub.lut.fi/handle/10024/130074>
- [37] S. Janssen, H. Vos, A comparison between exposure-response relationships for wind turbine annoyance and annoyance due to other noise sources, The Journal of the Acoustical Society of America, 2011. Saatavissa: <https://asa.scitation.org/doi/full/10.1121/1.3653984>
- [38] V. Hongisto, Tuulivoimalamelun terveysvaikutukset, Työterveyslaitos, 2014. Saatavissa: https://www.motiva.fi/files/9663/Tuulivoimalamelun_terveysvaikutukset_Tyoterveyslaitos.pdf
- [39] J. Radun, H. Maula, P. Saarinen, J. Keränen, R. Alakoivu, V. Hongisto, Health effects of wind turbine noise and road traffic noise on people living near wind

- turbines, 2021. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032121013022>
- [40] Infraääni, Suomen Tuulivoimayhdistys, Saatavissa (viitattu 16.3.2022): <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tuulivoimasta-kunnille/tuulivoimaloiden-aani/infraaani>
- [41] P. Maijala, A. Turunen, I. Kurki, L. Vainio, S. Pakarinen, C. Kaukinen, K. Lukander, P. Tiittanen, T. Yli-Tuomi, P. Taimisto, T. Lanki, K. Tiippana, J. Virkkala, E. Stickler, M. Sainio, Infrasound does not explain symptoms related to wind turbines, Valtioneuvoston kanslia, 2020. Saatavissa: <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/162329>
- [42] P. Louhiala, J. Pekkanen, M. Sainio, Nosebon monet kasvot, lääketieteellinen aikakauskirja Duodecim, 2020. Saatavissa (viitattu 21.3.2022): <https://www.duodecimlehti.fi/duo15624>
- [43] K. Suomi, P. Keronen, Katsaus tutkimuksiin tuulivoiman infraäänien haitallisista vaikutuksista terveyteen, 2021. Saatavissa: https://www.dropbox.com/s/dj773n0izqp3yrf/Tutkimuskatsaus_Tuulivoiman%20haitalliset%20terveysvaikutukset.pdf?dl=0
- [44] V. Hongisto, D. Oliva, Tuulivoimaloiden infraäänit ja niiden terveysvaikutukset, Turun ammattikorkeakoulu, 2017. Saatavissa: <https://julkaisut.turkuamk.fi/isbn9789522166531.pdf>
- [45] Climate change and health, World health organization, 2021. Saatavissa (viitattu 22.3.2022): <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/climate-change-and-health>
- [46] Air pollution, World health organization. Saatavissa (viitattu 23.3.2022): https://www.who.int/health-topics/air-pollution#tab=tab_1
- [47] Ilmansaasteet ja ilmansuojelu, Ympäristöministeriö. Saatavissa (viitattu 23.3.2022): <https://ym.fi/ilmansaasteet-ja-ilmansuojelu>
- [48] Suomen kasvihuonekaasupäästöt 2020, Tilastokeskus, Helsinki. Saatavissa (viitattu 23.3.2022): https://www.stat.fi/til/khki/2020/khki_2020_2021-05-21_kat_001_fi.html
- [49] A. Koistinen, Fingridin Jukka Ruusunen: Suomessa ei vielä tajuta, miten ylivoimainen tuulivoima on hinnaltaan – ”Armeijan tutkahuolet ratkaistava pian”, Yle, päivitetty 7.11.2019. Saatavissa (viitattu 23.3.2022): <https://yle.fi/uutiset/3-11045496>
- [50] Energiavuosi 2021 Sähkö, Energiateollisuus ry, 2022. Saatavissa (viitattu 23.3.2022): https://energia.fi/files/4428/Sahkovuosi_2021_netti.pdf