






Tuulivoimamelun mittausmetodiikan kehittäminen

Kirjoittajat: Raimo Eurasto, Hannu Nykänen, VTT

Luottamuksellisuus: julkinen

Raportin nimi Tuulivoimamelun mittausmetodiikan kehittäminen	
Asiakkaan nimi, yhteyshenkilö ja yhteystiedot Ympäristöministeriö Erityisasiantuntija Nunu Pesu PL 35, 00023 Valtioneuvosto	Asiakkaan viite Dnro YM45/5511/2012
Projektin nimi Ohjeistus tuulivoimaloiden melun mitoittamiseen ja todentamiseen	Projektin numero/lyhytnimi 80555/TUULIVOIMA-MELU
Raportin laatija(t) Raimo Eurasto, Hannu Nykänen, VTT	Sivujen/liitesivujen lukumäärä 13/30
Avainsanat tuulivoima, melu, ääni, mittaaminen	Raportin numero VTT-R-04680-13
Tiivistelmä <p>Tässä raportissa on tarkasteltu sekä melupäästön että melutason mittaamista. Molemmista on laadittu ohjeluonnokset, jotka on esitetty liitteinä 1 ja 2.</p> <p>Tuulivoimalan melupäästön mittaamiseen on vakiintunut standardi IEC 61400-11 ja teknisessä spesifikaatiossa IEC 61400-14 kuvataan miten melupäästön tunnusarvot johdetaan mitatuista arvoista standardin ISO 7574 mukaista logiikkaa soveltaen. Raportissa kuvataan miten IEC 61400-11 mukaiset mittaukset tulee suorittaa ja miten IEC 61400-14 mukaiset melupäästön tunnusarvot voidaan johtaa IEC 61400-11 mukaisista mitatuista melupäästöarvoista.</p> <p>Tuulivoimalan tai tuulivoima-alueen melupäästön verifiointiin tarvittaessa tehtävän mittauksen ohjeluonnos perustuu standardiin IEC 61400-11 sekä Tanskassa 1.1.2012 voimaan tulleen säädöksen tuulivoimaloiden melusta.</p> <p>Altistuvassa kohteessa tapahtuvan melutason mittaamisella voidaan tuulivoimalan tai tuulivoima-alueen rakentamisen jälkeen tarvittaessa varmistaa, että Tuulivoimarakentamisen suunnitteluoppaassa esitetyt melutason suunnitteluohjearvot alittuvat myös tuulivoimalan tai tuulivoimapuiston toiminnan aikana. Ohjeluonnos melutason mittaamisesta altistuvassa kohteessa perustuu IEA:n suositukseen melutason mittaamisesta tuulivoimalamelulle altistuvassa kohteessa sekä joihinkin muihin mittausohjeisiin ottaen huomioon myös ympäristöministeriön ohje ympäristömelun mittaamisesta. Ohjeen mukaisessa mittauksessa ei kuitenkaan ole kyse varsinaisesta altistuvan kohteen melutason määrittämisestä pitkäaikaismittauksella, vaan melumallinnuksen oikeellisuuden todentaminen verifiointimittauksella. Melumallinnuksen tulosten perusteella myönnettyssä rakennusluvassa on jo pitänyt ottaa huomioon melumallinnuksen epävarmuus, joten tämän ohjeen mukaisessa immissiomittauksessa ei ilmoiteta mittauksen epävarmuutta, vaan asianmukaisesti (mittausohjeen mukaisesti) suoritettujen mittauksen tulos on suoraan verrattavissa mallinnuksen tulokseen ja/tai suunnitteluoppaan ohjearvoon.</p>	
Luottamuksellisuus	julkinen
Tampere, 28.6.2013 Laatija  Hannu Nykänen projektipäällikkö	Tarkastaja  Marko Antila erikoistutkija
Hyväksyjä  Johannes Hyrynen teknologiapäällikkö	
VTT:n yhteystiedot Hannu Nykänen, VTT Teolliset järjestelmät, PL 1300, 33101 Tampere	

Jakelu (asiakkaat ja VTT)

Ympäristöministeriö, Nunu Pesu: 1 kpl

Energiateollisuus ry, Heidi Lettojärvi: 1 kpl

Suomen tuulivoimayhdistys ry, Anni Mikkonen: 1 kpl

Pöyry Finland Oy, Carlo Di Napoli: 1 kpl

Ramboll Finland Oy, Janne Ristolainen: 1 kpl

VTT: 1 kpl

VTT:n nimen käyttäminen mainonnassa tai tämän raportin osittainen julkaiseminen on sallittu vain VTT:ltä saadun kirjallisen luvan perusteella.

Alkusanat

Ympäristöministeriö, Energiateollisuus ry ja Suomen Tuulivoimayhdistys ry rahoittajina ovat käynnistäneet lokakuussa 2012 hankkeen, jonka tulosten pohjalta on mahdollista laatia yksityiskohtainen ohjeistus tuulivoimaloiden melun mallintamiseen ja mittaamiseen. Hankkeesta käytetään nimilyhennettä TUULIVOIMAMELU. Hankkeen ovat toteuttaneet toteuttajaosapuolet, joista päävastuullisena osapuolena on toiminut VTT. Kaksi muuta toteuttajaosapuolta ovat Pöyry Finland Oy ja Ramboll Finland Oy. Hankkeen yhteydessä on laadittu myös diplomityö Aalto-yliopiston Sähkötekniikan korkeakoulun Signaalinkäsittelyn ja akustiikan laitokselle. Tämä diplomityö julkaistaan erikseen. Hanketta on ohjannut ympäristöministeriön johtama ohjausryhmä, joka koostui rahoittaja- ja toteuttajaosapuolten edustajista.

Tässä raportissa on tarkasteltu sekä melupäästön että melutason mittaamista. Molemmista on laadittu ohjeluonnokset, jotka on esitetty liitteinä 1 ja 2.

Ympäristöministeriö valmistelee ja julkaisee varsinaisen tuulivoimaloiden melun mallinnus- ja mittausohjeen tämän hankkeen tuloksia hyödyntäen.

Tampere, 28.6.2013

Tekijät

Sisällysluettelo

Alkusanat.....	3
1 Johdanto.....	5
2 Tavoite.....	6
3 Mittausohjeistus.....	6
3.1 Tuulivoimalan melupäästön määrittäminen.....	7
3.1.1 Tuulivoimalan näennäisen äänitehotason määrittäminen	7
3.1.2 Melupäästön tunnusarvon määrittäminen	9
3.1.3 Tuulivoimalan melupäästön verifiointi	11
3.2 Melutason mittaus.....	12
4 Yhteenveto	13
Lähdeviitteet	14

Liite 1: Tuulivoimamelun mittaaminen - melupäästön todentaminen

Liite 2: Tuulivoimamelun mittaaminen - melutason mittaaminen altistuvassa kohteessa (immissiomittaukset)

1 Johdanto

Suomen energia- ja ilmastostrategian mukaisena tavoitteena on lisätä tuulivoimalla tuotetun energian määrää 9 TWh:iin vuoteen 2025 mennessä. Tämä tarkoittaa tuulivoimakapasiteetin lisäämistä nykyisestä noin 220 megawattista noin 3750 megawattiin. Tuulivoimaloiden sijoittumiseen vaikuttavat keskeisesti teknistaloudelliset tekijät sekä sijaintialueiden ympäristöarvot ja muu alueiden käyttö.

Ympäristöministeriö on heinäkuussa 2012 julkaissut tuulivoimarakentamisen suunnitteluun oppaan [1], jossa tuulivoimaloiden suunnitteluun on annettu yleiset ohjeet. Opas sisältää ohjeet myös tuulivoimaloiden meluvaikutusten arviointiin sekä suunnitteluohjeet tuulivoimaloiden melulle altistuvien kohteiden ulkomelutasoille. Oppaassa todetaan lisäksi, että tuulivoimaloiden melulle altistuvien rakennusten pientaajuisten melun sisämelutasojen suunnitteluohjeet löytyvät Sosiaali- ja terveystieteiden ministeriön julkaisemasta Asumisterveysohjeesta [2]. Sisämelutasojen suunnitteluohjeiden mukaisuus voidaan arvioida ulkomelutasojen perusteella ottamalla huomioon rakennusten vaipan ääneneristävyys.

Melu on ääntä, jonka ihminen kokee epämiellyttävänä tai häiritsevänä tai joka on muulla tavoin ihmisen terveydelle vahingollista taikka hänen muulle hyvinvoinnilleen haitallista. Melu vaikuttaa ihmisten terveyteen, elinympäristön viihtyisyyteen ja kiinteistöjen sekä maan arvoon. Melun aiheuttamia haittoja säädelään melupäästöön, melutasoon ja meluallistukseen kohdistuvilla vaatimuksilla ja toimenpiteillä. Tavoitteena on toimia ennakoivasti ja suunnittelun keinoin.

Tuulivoimaloiden tuottama ääni saattaa poiketa muusta, esimerkiksi liikenteen tuottamasta, äänestä melulle altistuvassa kohteessa sekä ominaisuuksiltaan että melun koetun häiritsevyyden osalta. Tämän vuoksi tuulivoimalat edellyttävät erillistä ääniteknistä mitoitus- ja todentamisohjeistusta. Tuulivoimarakentamisessa mahdollisesti syntyvän melun haittavaikutusten kustannustehokas torjunta edellyttää tätä tarkoitusta varten hyödynnettävää metodiikkaa, jolla tuetaan Tuulivoimarakentamisen suunnitteluoppaan suunnitteluohjeiden soveltamista [1, s. 57].

Ympäristöministeriö, Energiategollisuus ry ja Suomen Tuulivoimayhdistys ry rahoittajina ovat käynnistäneet lokakuussa 2012 hankkeen, jonka tulosten pohjalta on mahdollista laatia yksityiskohtainen ohjeistus Tuulivoimarakentamisen suunnitteluoppaan suunnitteluohjeiden soveltamiseen. Hankkeesta käytetään nimityshennettä TUULIVOIMAMELU. Hankkeen ovat toteuttaneet toteuttajaosapuolet, joista päävastuullisena osapuolena on toiminut VTT. Kaksi muuta toteuttajaosapuolta ovat Pöyry Finland Oy ja Ramboll Finland Oy.

Tässä osaraportissa kuvataan sekä tuuliturbiinin melupäästön että altistuvan kohteen melutason mittaamista sekä esitetään näihin liittyvät mittaushjelunokset. Tarkastelun kohteena on tuuliturbiinien valmistajan tai tuulipuiston rakentajan ilmoittaman tuuliturbiinin melupäästön oikeellisuuden ja tuulipuiston rakentajan ympäristövaikutusten arviointiin käyttämän melumallinnuksen tulosten verifiointi (todentaminen). Mittausohjeen tarkoituksena ei ole altistuvan kohteen vuorokauden eri ajoille annettujen ohjeiden mukainen melutason määrittäminen. Tämä selittää sen, että mittauksille ei ole esitetty epävarmuusarviota. Verifiointimittauk-

sen tulokset (asianmukaisesti suoritettuna) antavat yksikäsitteisen verifiointituloksen, joten mittauksen epävarmuusarviota ei tarvita. Verifioinnin kohteena olevan suureen epävarmuudet on kansainvälisen käytännön mukaisesti pitänyt sisällyttää jo verifioitavan suureen määritykseen, joten verifiointimittauksen tulosta verrataan sellaisenaan verifioitavaan suureen.

Tarkastelussa kuvataan myös pientaajuisen melun, amplitudimodulaation, melun kapeakaistaisuuden sekä signaali-kohinasuhteen aiheuttamia haasteita mittausmetodiikalle.

2 Tavoite

Osatehtävän 2 tavoitteena on luonnostella ja kuvata tuulivoimaloiden melupäästön ja altistuvan kohteen melutason mittaukseen Suomessa sovellettavat menetelmät.

Erityistavoitteena on tarkastella tuuliturbiinin valmistajan ilmoittaman turbiinityypin melupäästön oikeellisuuden verifiointia mittaamalla sekä toiminnassa olevan tuulivoimalan tai tuulivoima-alueen rakentajan ilmoittamien meluvaikutusten (mallinnustulosten) verifiointia mittaamalla tai mittausten ja laskennan yhdistelmällä.

3 Mittausohjeistus

Mittausmetodiikan kehittämisosassa on tarkasteltu sekä melupäästön että melutason mittaamista. Molemmista on laadittu ohjeluonnokset, jotka on esitetty liitteinä 1 ja 2.

Tuulivoimalan melupäästön mittaamiseen on vakiintunut standardi IEC 61400-11 [3] ja teknisessä spesifikaatiossa IEC 61400-14 [4] kuvataan miten melupäästön tunnusarvot johdetaan mitatuista arvoista standardin ISO 7574 mukaista logiikkaa soveltaen. Raportissa kuvataan miten IEC 61400-11 mukaiset mittaukset tulee suorittaa ja miten IEC 61400-14 mukaiset melupäästön tunnusarvot voidaan johdattaa IEC 61400-11 mukaisista mitatuista melupäästöarvoista.

Tuulivoimalan tai tuulivoima-alueen melupäästön verifiointiin tarvittaessa tehtävän mittauksen ohjeluonnos perustuu standardiin IEC 61400-11 [3] sekä Tanskassa 1.1.2012 voimaan tulleeseen säädökseen tuulivoimaloiden melusta [5].

Altistuvassa kohteessa tapahtuvan melutason mittaamisella on tuulivoimalan tai tuulivoima-alueen rakentamisen jälkeen tarkoitus tarvittaessa varmistaa, että Tuulivoimarakentamisen suunnitteluoppaassa [1] esitetyt melutason suunnitteluohjeet alittuvat myös tuulivoimalan tai tuulivoima-alueen toiminnan aikana. Ohjeluonnos melutason mittaamisesta altistuvassa kohteessa perustuu IEA:n suositukseen melutason mittaamisesta tuulivoimalamelulle altistuvassa kohteessa [6] sekä viitteisiin [9, 10, 11] ottamalla huomioon myös ympäristöministeriön ohje ympäristömelun mittaamisesta [7]. Kyse ei ole varsinaisesta altistuvan kohteen melutason määrittämisestä pitkäaikaismittauksella, vaan melumallinnuksen oikeellisuuden todentaminen verifiointimittauksella. Melumallinnuksen tulosten pe-

rusteella myönnettyssä rakennusluvassa on jo pitänyt ottaa huomioon melumallinnuksen epävarmuus, joten tämän ohjeen mukaisessa immissiomittauksessa ei ilmoiteta mittauksen epävarmuutta, vaan asianmukaisesti (mittausohjeen mukaisesti) suoritettuna mittauksen tulos on suoraan verrattavissa mallinnuksen tulokseen ja/tai suunnitteluoppaan ohjearvoon.

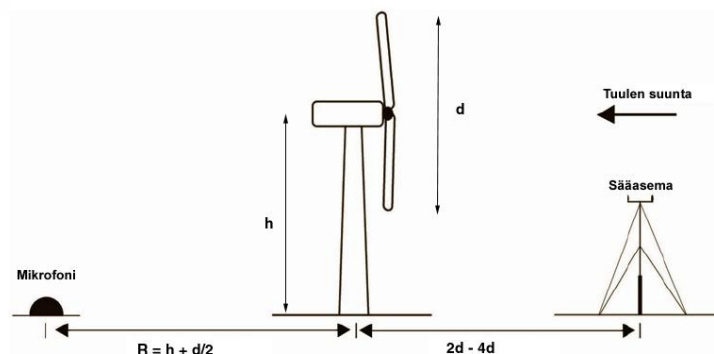
3.1 Tuulivoimalan melupäästön määrittäminen

3.1.1 Tuulivoimalan näennäisen äänitehotason määrittäminen

Tuulivoimaloiden äänitehotaso mitataan yleensä standardin IEC 61400-11 [3] mukaisesti. Koska tuulivoimalan aiheuttama melu muuttuu tuulen nopeuden muuttuessa, mittauspisteissä havaittavien äänitasojen mittaamisen lisäksi on samanaikaisesti mitattava tai määritettävä tuulen nopeus. Tuuliturbiinin äänitehotaso esitetään tuulen nopeuden funktiona.

Standardin mukaiset mittaukset perustuvat lähellä turbiinia tehtäviin äänenpaine-tason mittauksiin, jotta äänen etenemisestä johtuvat virheet saataisiin minimoitua. Toisaalta mittaustäisyyttä pyritään kasvattamaan, jotta tuuliturbiini voitaisiin ääniteholaskennassa approksimoida pistelähteeksi. Mittaukset tehdään kuitenkin niin lähellä turbiinia, että erityisesti uudentyypisten suurten tuuliturbiinien tapauksessa pistelähdeoletus ei äänilähteen suuren koon takia todellisuudessa toteudu. Standardissa on spesifioitu mittauksissa käytettävät laitteistot ja niiden kalibrointimenettelyt, jotta taattaisiin akustisten ja muiden tarvittavien mittaustietojen tarkkuus. Samoin on spesifioitu ei-akustiset mittaukset, joita tarvitaan meluemission mittaamisessa tarvittavien ilmakehän ominaisuuksien määrittämiseen.

Standardin IEC 61400-11 vanhempien versioiden mukaan tuulen nopeus mitattiin vähintään 10 m korkeuteen sijoitetulla sääasemalla tuulen suunnan ollessa kuvan 1 mukainen. Sääaseman etäisyys tuulivoimalasta voi olla välillä $2d \dots 4d$, missä d on roottorin halkaisija.

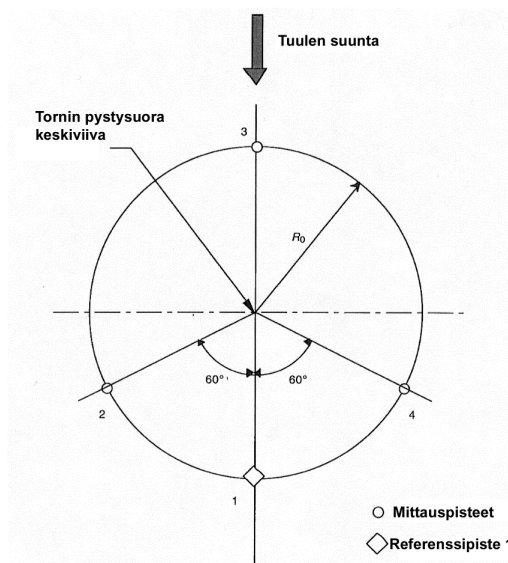


Kuva 1. Sääaseman sijainti tuulivoimalaan ja mikrofoniin nähden [3].

Koska nykyisten tuulivoimaloiden korkeudet ovat usein huomattavasti tätä korkeutta suurempia, tuulen nopeuden ensisijainen määrittäytapa muutettiin standardin uudemmissa versioissa. Tuulen nopeus määritetään tuulivoimalan tuottaman säh-

kötehon ja valmistajan ilmoittaman tehokäyrän avulla sellaisilla tuulivoimaloilla, joiden roottorin navan korkeus on yli 50 m. Lisätietona käytetään tuulivoimalan moottorikoteloon (nacelle) kiinteästi sijoitetulla anemometrillä mitattuja tuulen nopeuden arvoja.

Standardin IEC 61400-11 mukaiset mittauspisteet on esitetty kuvassa 2. Piste 1 on referenssipiste, joka on standardin mukaan pääasiallinen mittauspiste. Tuulen suunnan tulee olla mittausten aikana kuvan mukainen, poikkeama saa olla enintään $\pm 15^\circ$. Mittauspisteet 2 - 4 eivät ole standardin mukaan pakollisia, mutta niissä tehdyillä mittauksilla on mahdollista saada käsitys melun muuttumisesta eri suunnissa. Mittaukset pisteissä 2 - 4 tehdään samanaikaisesti referenssipisteen mittauksen kanssa.



Kuva 2. Mittauspisteet standardin IEC 61400-11 mukaisesti [3].

Referenssietäisyys R määritetään seuraavasti:

$$R = h + d/2$$

missä

h on roottorin navan korkeus maanpinnasta

d on roottorin halkaisija.

Mikrofoni sijoitetaan maan pinnalle asetetun akustisesti kovasta materiaalista tehdyn levyn päälle. Suositeltava levy on ympyränmuotoinen ja sen halkaisijan tulee olla vähintään 1,0 m. Mikrofonin ympärille sijoitetaan tuulisuoja ja tarvittaessa käytetään myös tämän ympärille asetettua sekundaarista tuulisuoja.

Mittauksilla on tarkoitus määrittää tuulivoimalan meluemissio tuulen nopeuksilla 6, 7, 8, 9 ja 10 m/s (tuulen nopeus 10 m:n referenssikorkeudella) ja maanpinnan karheuden arvolla 0,05 m (kuva hieman kasvillisuutta sisältävän viljelysmaan vaikutusta mittaustulokseen).

A-painotettu äänenpainetaso määritetään referenssipisteessä perustuen vähintään 30 samanaikaiseen tuulen nopeuden ja äänitason mittaukseen kunkin mittauksen mittausajan ollessa vähintään 1 minuutti. Samanlaiset mittaukset tehdään tuulivoimalan ollessa pysähtyneenä taustamelun mittaamiseksi ja tulokset korjataan tarvittaessa ottamalla taustamelun vaikutus huomioon standardissa esitetyllä tavalla.

Muissa kolmessa mittauspisteessä (samanaikainen mittaus referenssipisteen kanssa) A-painotettu äänenpainetaso määritetään viiden vähintään 1 minuuttia kestävästä mittauksesta energiakeskiarvona. Keskiarvostuksessa käytetään viiden lähinnä tuulen nopeutta 8 m/s olevan jakson tuloksia. Vastaavat mittaukset tehdään myös taustamelulle tuulivoimalan ollessa pysähtyneenä.

Mittaukset tehdään 1/3-oktaaveittain (vähintään keskitäajuuksilla 20 Hz – 10 kHz) perustuen vähintään kolmeen kullakin 6, 7, 8, 9 ja 10 m/s tuulen nopeudella mitattuun spektriin.

Standardin IEC 61400-11 mukaan tuulivoimalan melu tulee tutkia myös mahdollisen tonaalisuuden osalta. Tonaalisuusanalyysi tehdään samoilla tuulen nopeusalueilla kuin äänitehon määrittäminen. Kutakin nopeusalueetta kohden analysoidaan kaksi minuutin kestävästä jaksosta, jotka ovat lähinnä tuulen kokonaisluvulla ilmaistuja nopeuksia 6, 7, 8, 9 ja 10 m/s. Nämä kaksi minuutin kestävästä jaksosta jaetaan kahteentoista 10 sekuntia kestävästä jaksoon, joista määritetään 12 energiakeskiarvostettua kapeakaistaista spektriä käyttämällä Hanning-ikkunointia. Standardissa IEC 61400-11 on annettu lisäohjeita mahdollisten ääneksien toteamiseksi.

Tuulivoimalan näennäinen ääniteho (apparent sound power) $L_{WA,k}$ määritetään taustamelukorjattujen äänenpainetasojen $L_{Aeq,c,k}$ (erikseen tuulen nopeuksille 6, 7, 8, 9 ja 10 m/s) perusteella seuraavasti:

$$L_{WA,k} = L_{Aeq,c,k} - 6 + 10 \lg \left[\frac{4\pi R_1^2}{S_0} \right]$$

missä

$L_{Aeq,c,k}$ on taustamelukorjattu A-painotettu äänenpainetaso tuulen nopeuksilla 6, 7, 8, 9 ja 10 m/s ja referenssioloissa

R_1 on lyhyin etäisyys roottorin navasta mikrofoniin (m)

S_0 on referenssiala = 1 m².

3.1.2 Melupäästön tunnusarvon määrittäminen

Teknisessä spesifikaatiossa IEC 61400-14 [4] kuvataan miten melupäästön tunnusarvot johdetaan mitatuista arvoista standardin ISO 7574 mukaista logiikkaa soveltaen.

Standardin IEC 61400-11 mukaisesti mitattuja turbiinin äänitehotasoja ja niiden tonaalisuustietoja tarvitsevat muun muassa suunnittelijat, valmistajat sekä viran-

omaiset. Tällä hetkellä turbiinien spesifikaatiot perustuvat yleensä vain yhdelle tietyn merkkiselle ja malliselle turbiinille tehtyihin mittauksiin ja näiden mittausten tuloksia pidetään edustavina kaikille samanmallisille turbiineille. Käytännössä kuitenkin samanmallisilla turbiineilla on yksilöllisiä eroja, joten samanmallisten turbiinien melupäästön tunnusarvot tulee määrittellä useamman näytteen perusteella. Tällainen menettely lisää tuulivoima-alueiden suunnittelun luotettavuutta ja helpottaa erityyppisten turbiinien äänitehojen ja tonaalisuustietojen vertailua.

Teknisen spesifikaation IEC 61400-14 mukaan turbiinin melupäästön tunnusarvo voidaan määrittää perustuen n kappaleelle samantyyppisen turbiinin yksittäisille turbiineille tehtyjä äänitehotason mittauksia. Mikäli turbiinien navan korkeudet ovat erilaiset, mittaustulokset muutetaan vastaamaan samaa navan korkeutta teknisen spesifikaation IEC 61400-14 liitteessä A esitetyllä tavalla. Yksittäisten turbiinien mittaustuloksista L_i saadaan keskiarvo \bar{L}_w ja keskihajonta s kaavoilla

$$\bar{L}_w = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n L_i$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (L_i - \bar{L}_w)^2}$$

Valmistettavan tuotesarjan yksittäisten tuotteiden melupäästön keskihajonta σ_p (standardissa suuresta käytetään nimitystä tuotannon keskihajonta) voidaan arvioida kaavalla

$$\sqrt{s^2 - \sigma_R^2} \leq \sigma_p \leq s$$

Mittausten toistettavuuden keskihajonnan (σ_R) arvioidaan olevan $\sigma_R = 0,9$. Mikäli saatavilla on vain rajoitettuja tietoja todellisesta toistettavuuden keskihajonnasta ja mikäli joissakin tapauksissa σ_R on hyvin pieni, määrittämisessä voidaan käyttää arvoa $\sigma_p = s$.

Yksittäiselle tuulivoimalalle (yksittäiselle tuotteelle) ilmoitettava keskihajonta σ määritetään kaavalla

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n}(\sigma_R^2 + \sigma_p^2) + (\sigma_R^2 + \sigma_p^2)} = \sqrt{\frac{1+n}{n}(\sigma_R^2 + \sigma_p^2)}$$

missä

$$\sigma_R = 0,9 \text{ dB ja } \sigma_p = s$$

Ilmoitettava näennäinen äänitehotaso (declared value) lasketaan kaavalla

$$L_{wd} = \bar{L}_w + K = \bar{L}_w + 1,645\sigma$$

Ääniteho ilmoitetaan kahdella luvulla: $\overline{L_w}$ ja K tai yhdellä arvolla L_{wd} , joka on edellisten summa.

K edustaa tiettyä varmuustasoa ja $K = 1,645\sigma$ kuvaa 5 % todennäköisyyttä sille, että standardin IEC 61400-11 mukaan mitattu tuotantoerään kuuluvan yksittäisen turbiinin ääniteho ylittää ilmoitetun arvon.

3.1.3 Tuulivoimalan melupäästön verifiointi

Tuuliturbiinien äänitehon määrittämiseen käytetään standardia IEC 61400-11. Olemassa olevan tuulivoimalan tai tuulivoimapuiston melupäästön verifiointiin tehtävään mittaukseen voidaan kuitenkin käyttää yksinkertaisempaa menetelmää. Liitteessä 1 esitetty tuulivoimalan melupäästön verifiointimittausohjeen luonnos perustuu standardiin IEC 61400-11 [3] ja Tanskassa 1.1.2012 voimaan tulleeseen säädökseen tuulivoimaloiden melusta [5]. Ohjeluonnoksen mukaisesti mitattuja äänitehoja voidaan käyttää myös lähtöarvona laskettaessa kauempana tuulivoimalasta vallitsevia melutasoja.

Ohjeluonnoksessa on tehty joissakin kohdissa ehdotuksia Suomessa käytettäväksi menettelytavoiksi ja nämä voidaan muuttaa, mikäli tähän on tarvetta. Seuraavassa on käyty läpi joitakin yksityiskohtia, jotka vaativat valintoja.

Luonnoksen mukaiset mittaukset tehdään A-painotettuna 1/3-oktaaveittain vähintään keskitaajuuksilla 20 Hz – 10 000 Hz. Jos tulokset tarvitaan 1/1-oktaaveittain, ne voidaan laskea perustuen 1/3-oktaaveittain määritettyihin tuloksiin. Käytännössä kaikki äänisignaalit tulee tallentaa lineaarisina ja A-painotus tehdään analyysivaiheessa lineaarisina tallennettuihin signaaleihin.

Luonnoksessa on käytetty tuulen nopeuden tavoitearvona arvoa 8 m/s (tuulen nopeus 10 m:n referenssikorkeudella ja maanpinnan karheuden arvolla 0,05 m) ja vaihtoehtona on annettu mittausten tekeminen tuulen nopeuksilla 6, 7, 8, 9 ja 10 m/s. Yleensä tuulen nopeuden tavoitearvona on käytetty arvoa 8 m/s, joten se on otettu lähtökohdaksi luonnoksessa. Referenssikorkeutena tuulen nopeuden määrittämisessä käytetään yleensä korkeutta 10 m, jolloin muilla korkeuksilla (esimerkiksi navan korkeudella) määritetyt tuulen nopeudet voidaan muuntaa vastaamaan 10 m korkeutta olettamalla, että tuulen nopeusprofiili on logaritminen. Ohjeluonnoksessa esitetty logaritminen korkeuskorjaus toimii kuitenkin vain ilmakehän stabiilisuusluokalla neutraali. Neutraalin stabiilisuusluokan sääolon vallitessa äänen kaareutuminen ylös- tai alaspäin on vähäistä, ja äänen etäisyysvaimentuminen on lähimpänä yleistä oletusarvoa, joka on 6 dB etäisyyden kaksinkertaistessa.

Erillisten äänenpainetasojen mittausajaksi luonnoksessa on valittu arvo 10 s (tanskalaisissa ohjeissa käytetään myös aikaa 60 s), mikä vastaa standardin IEC 61400-11 uusimmassa versiossa [8] käytettävää mittausaikaa. Mittauksia tehdään vähintään 10 kpl kutakin tuulen nopeusluokkaa kohden.

Ohjeluonnoksen mukaiset mittaukset edellytetään tehtäväksi siten, että kaikki mitaussignaalit (sekä melumittaukseen että tuulen nopeuden mittaukseen liittyvät) tallennetaan, jolloin analysointi voidaan tehdä myöhemmin. Tällöin esimerkiksi

mahdollisen amplitudimodulaation toteaminen ja modulaatioasteen määrittäminen on mahdollista tallennusten perusteella.

3.2 Melutason mittaaminen

Altistuvassa kohteessa tapahtuvalla melutason mittaamisella on tuulivoimalan tai tuulivoimapuiston rakentamisen jälkeen tarkoitus tarvittaessa varmistaa, että Tuulivoimarakentamisen suunnitteluoppaassa [1] esitetyt melutason suunnitteluohjeet alittuvat ja melumallinnuksen melutasoarvot alittuvat myös tuulivoimalan tai tuulivoimapuiston toiminnan aikana.

Liitteessä 2 esitetty ohjeluonnos melutason mittaamisesta altistuvassa kohteessa perustuu IEA:n suositukseen melutason mittaamisesta tuulivoimalamelulle altistuvassa kohteessa [6] sekä viitteisiin [9, 10, 11] ottaen huomioon ympäristöministeriön ohje ympäristömelun mittaamisesta [7].

Ohjeluonnoksen mukaisilla mittauksilla voidaan mitata tarkasteltavassa kohteessa vallitseva joko yksittäisen turbiinin tai useamman turbiinin aiheuttama A-painotettu keskiäänitaso L_{Aeq} . Menetelmä soveltuu parhaiten suurten (sähköteho yli 1 MW) nykyaikaisten turbiinien melun mittaamiseen. Tällöin mittaukset on mahdollista suorittaa luotettavasti noin 1000 m:n etäisyydelle turbiinista ulottuvalla alueella, mutta pitemmällä etäisyyksillä taustamelun ja turbiinin aiheuttaman melun erottaminen toisistaan voi osoittautua vaikeaksi.

Ohjeluonnoksessa on tehty joissakin kohdissa ehdotukset Suomessa käytettäväksi menettelytavoiksi.

Ohjeluonnokseen on otettu mukaan kaikki kolme IEA:n ohjeessa annettua mittausmenettelyä (A, B ja C). Mittausmenettelyn valinta riippuu myös siitä, mitä referenssiä tuulen nopeuden määrittämisessä käytetään. Referenssinä on mahdollista käyttää joko turbiinin kohdalla tai mittauspisteen kohdalla mitattua tuulen nopeutta ja turbiinin kohdalla on mahdollista käyttää 10 m korkeudella tai navan korkeudella vallitsevaa tuulen nopeutta. Samoin maan karheudelle on mahdollista käyttää joko referenssiarvoa tai turbiinin lähellä olevan maaston todellista karheutta laskettaessa tuulen nopeutta eri korkeuksilla.

Ohjeluonnoksessa on meluindikaattorina käytetty A-painotettua keskiäänitasoa L_{Aeq} . IEA:n ohjeessa vaihtoehtoisesti käytettäväksi tarkoitettu pysyvyystaso L_{A90} on jätetty pois, koska Suomessa melun ohjeet on annettu A-painotettuna keskiäänitasona. Jos kaikki mittaussignaalit nauhoitetaan, myös pysyvyystasojen määrittäminen on jälkikäteen mahdollista.

Mittauksissa suositellaan käytettäväksi ympyränmuotoista mittauslevyä, jonka halkaisijan tulee olla ainakin 1,0 m. IEA:n ohjeissa käytetään suorakaiteen muotoista mittauslevyä, mutta standardin IEC 61400-11 mukaisissa mittauksissa käytetään ympyränmuotoista levyä, joten se on valittu myös ohjeluonnoksessa suositeltavaksi levyksi.

Suosittelavaksi mittausajaksi erillisille äänenpainetaso mittauksille luonnoksessa on valittu aika 1 minuutti (IEA:n ohjeessa mittausaika on 1 – 10 minuuttia). Myös

standardin IEC 61400-11 uusimmassa versiossa erillisten äänenpainetasojen mitausaikaa on lyhennetty entisestä mittausajasta 60 s arvoon 10 s, joten 1 minuutti sopinee hyvin immissiotason mittauksessa käytettäväksi mittausajaksi.

Erillisten äänenpainetasomittausten vähimmäislukumääränä luonnoksessa on käytetty IEA:n ohjeen mukaista lukumäärää (10 mittausta vähintään 30 minuutin ajalta), mutta tätä voi tarvittaessa kasvattaa. Jos analysointi tehdään tallennetuista signaaleista, mittausten lukumäärän kasvattaminen ei lisää kovinkaan paljon kokonaistyömäärää, mutta mittauksilla saavutettava tarkkuus voi parantua.

Mittauspisteiden valinnassa viitataan IEA:n ohjeiden lisäksi myös ympäristöministeriön ohjeeseen ympäristömelun mittaamisesta [7].

Ohjeluonnokseen on lisätty IEA:n ohjeesta puuttuvia ohjeita pienitaajuisen melun mittaamisesta, mittauksista sisätiloissa sekä impulssimaisuuden ja amplitudimodulaation määrittämisestä. Näitä kohtia voi tarvittaessa vielä täydentää. Pienitaajuisen melun ja impulssimaisuuden mittaamisesta on saatavilla ohjeita, mutta amplitudimodulaation määrittämiseen ei ole vielä käytettävissä kansainvälisesti standardoitua menetelmää. Sisätiloissa tehtävissä mittauksissa viitataan ympäristöministeriön ohjeeseen ympäristömelun mittaamisesta [7] sekä sosiaali- ja terveysministeriön Asumisterveysohjeeseen [2].

4 Yhteenveto

Tässä raportissa on kuvattu yleisellä tasolla tuulivoimaloiden melupäästön ja altistuvan kohteen melutason mittaamiseen Suomessa soveltuvia menetelmiä. Näiden tarkastelujen pohjalta on laadittu ehdotukset tuulivoimaloiden melupäästön todentamiseen ja tuulivoimamelulle altistuvien kohteiden melutason mittaamiseen. Jälkimmäisiä mittauksia voidaan käyttää tuulivoima-alueiden melumallinnusten oikeellisuuden todentamiseen ja tuulivoimaloiden ohjearvojen mukaisuuden todentamiseen.

Tuulivoimalan melupäästön mittaamiseen on vakiintunut standardi IEC 61400-11 [3] ja teknisessä spesifikaatiossa IEC 61400-14 [4] kuvataan miten melupäästön tunnusarvot johdetaan mitatuista arvoista standardin ISO 7574 mukaista logiikkaa soveltaen. Raportissa kuvataan miten IEC 61400-11 mukaiset mittaukset tulee suorittaa ja miten IEC 61400-14 mukaiset melupäästön tunnusarvot voidaan johdattaa IEC 61400-11 mukaisista mitatuista melupäästöarvoista.

Tuulivoimalan tai tuulivoima-alueen melupäästön verifiointiin tarvittaessa tehtävän mittauksen ohjeluonnos perustuu standardiin IEC 61400-11 [3] sekä Tanskassa 1.1.2012 voimaan tulleeseen säädökseen tuulivoimaloiden melusta [5].

Altistuvassa kohteessa tapahtuvan melutason mittaamisella on tuulivoimalan tai tuulivoima-alueen rakentamisen jälkeen tarkoitus tarvittaessa varmistaa, että Tuulivoimarakentamisen suunnitteluoppaassa [1] esitetyt melutason suunnitteluohjeet alittuvat myös tuulivoimalan tai tuulivoima-alueen toiminnan aikana. Ohjeluonnos melutason mittaamisesta altistuvassa kohteessa perustuu IEA:n suositukseen melutason mittaamisesta tuulivoimalamelulle altistuvassa kohteessa [6]

sekä viitteisiin [9, 10, 11] ottamalla huomioon myös ympäristöministeriön ohje ympäristömelun mittaamisesta [7]. Kyse ei ole varsinaisesta altistuvan kohteen melutason määrittämisestä pitkäaikaismittauksella, vaan melumallinnuksen oikeellisuuden todentaminen verifiointimittauksella. Melumallinnuksen tulosten perusteella myönnettyssä rakennusluvassa on jo pitänyt ottaa huomioon melumallinnuksen epävarmuus, joten tämän ohjeen mukaisessa immissiomittauksessa ei ilmoiteta mittauksen epävarmuutta, vaan asianmukaisesti (mittausohjeen mukaisesti) suoritettujen mittausten tulos on suoraan verrattavissa mallinnuksen tulokseen ja/tai suunnitteluoppaan ohjeeseen.

Lähdeviitteet

1. Ympäristöministeriö. Helsinki 2012. Tuulivoimarakentamisen suunnittelu. Ympäristöhallinnon ohjeita 4 | 2012. 92 s.
2. Sosiaali- ja terveystieteiden ministeriö. Helsinki 2003. Asumisterveysohje. Sosiaali- ja terveystieteiden ministeriön oppaita 2003:1. 93 s.
3. IEC 61400-11. Wind turbine generator systems – Part 11: Acoustic noise measurement techniques, edition 2.1 2006-11. International Electrotechnical Commission.
4. IEC TS 61400-14. Wind turbines – Part 14: Declaration of apparent sound power level and tonality values. Technical specification. International Electrotechnical Commission.
5. The Danish Ministry of the Environment. 2011. Statutory Order on Noise from Wind Turbines. Translation of Statutory Order no.1284 of 15 December 2011. 14 s.
6. IEA Recommended Practices for Wind Turbine Testing and Evaluation. 10. Measurement of Noise Immission from Wind Turbines at Noise Receptor Locations, first ed., 1997.
7. Ympäristöministeriö, ympäristönsuojeluosasto. Helsinki 1995. Ympäristömelun mittaaminen. Ympäristöministeriön ympäristönsuojeluosaston ohje 1 | 1995. 82 s.
8. IEC 61400-11 Edition 3.0 2012-11- Wind turbines – Part 11: Acoustic noise measurement techniques.
9. Mätning av bullerimmission från vindkraftverk. Elforsk rapport 98:24. October 1998.
10. Compliance Protocol for Wind Turbine Noise. Guideline for Acoustic Assessment and Measurement. Ontario Ministry of the Environment.
11. Measurement of Audible Noise from Wind Turbines - Phase 1 Report - Literature and Jurisdictional Review. Ontario Ministry of the Environment. 11 June 2010.

Liite 1:
Tuulivoimamelun mittaaminen
- melupäästön todentaminen

SISÄLLYS

1 JOHDANTO	3
2 MÄÄRITELMIÄ	3
3 MITTAUSLAITTEISTO	5
3.1 MELUN MITTAAMINEN	5
3.2 SÄÄOLOJEN MITTAAMINEN	5
4 TUULIVOIMALOIDEN ÄÄNITEHOTASON MÄÄRITTÄMINEN	6
4.1 ÄÄNENPAINETASOJEN MITTAUKSET	6
4.1.1 Mittauspisteen sijainti	6
4.1.2 Mikrofonin sijoitus	7
4.1.3 Mittausten suorittaminen	8
4.2 TUULEN NOPEUDEN MÄÄRITTÄMINEN	8
4.3 TAUSTAMELUKORJAUS	9
4.4 ÄÄNITEHOTASON MÄÄRITTÄMINEN	10
4.5 TONAALISUUS	10
4.6 TUULIVOIMA-ALUEEN TUULITURBIINIEN MELUPÄÄSTÖN VERIFIOINTI	11
5 MITTAUSTEN RAPORTOINTI	11
5.1 TURBIINI JA MITTAUSPAIKKA	11
5.2 TURBIININ (TURBIINIEN) TIEDOT	11
5.3 MITTAUKSISSA KÄYTETYT LAITTEET	12
5.4 AKUSTISET TIEDOT	12
5.5 MUUT TIEDOT	12
VIITTEET	12

1 JOHDANTO

Tuulivoimaloiden melun mittaaminen poikkeaa muiden ympäristömelutyyppeiden mittaamisesta. Mittaukset joudutaan tekemään tuulisissa olosuhteissa, jotka aiheuttavat taustamelua, ja vaikeuttavat näin tuulivoimalasta syntyvän melun mittaamista. Tämän lisäksi tuulivoimalan teho ja samalla myös melu muuttuvat tuulen nopeuden vaihdellessa ja melu voi olla kaapeakaistaista tai pienitaajuista. Muun muassa näistä syistä johtuen vertailukelpoisten tulosten saaminen edellyttää, että melumittauksissa käytetään yksityiskohtaisesti määriteltyjä menetelytapoja.

Kovan tuulen ja runsaan taustamelun takia kaukana tuulivoimalasta tehtävät äänenpainetaso mittaukset (immissiomittaukset) eivät aina ole mahdollisia. Tästä syystä tuulivoimaloiden melu määritetään yleensä mittaamalla tuulivoimalan äänitehotaso (melupäästö) tarkoitusta varten laadittujen standardien mukaisesti ja laskemalla kauempana vallitsevat äänenpainetasot perustuen mitattuihin äänitehotasoihin, ympäröivän maaston ominaisuuksiin ja valittuihin sääolosuhteisiin.

Tuuliturbiinien melupäästön (äänitehotason) mittaamiseen käytetään standardia IEC 61400-11 [1]. Tuulivoimalan tai tuulivoima-alueen samanlaisten turbiinien melupäästön verifioimiseksi tehtävään mittaukseen voidaan kuitenkin käyttää yksinkertaisempaa menetelmää, jollainen on kuvattu viitteen [2] mukaisessa tanskalaisessa säädöksessä tuulivoimaloiden melusta.

Tämän ohjeen mukaisilla mittauksilla voidaan määrittää yksittäisen tuuliturbiinin äänitehotaso tai tuulivoima-alueen samanlaisten tuuliturbiinien äänitehotason keskiarvo, kun tarkoituksena on verifioida tuuliturbiin(e)ille standardin IEC TS 61400-14 [3] mukaisesti ilmoitettu äänitehotason tunnus- tai takuarvo (declared value). Ohjeen mukaiset tuuliturbiinin äänitehotason määritykset perustuvat standardiin IEC 61400-11 [1] sekä viitteeseen [2].

2 MÄÄRITELMIÄ

Äänenpaine p [Pa]

Ääneen liittyvä hetkellisen paineen ja staattisen ilmanpaineen ero, yleensä tehollisarvona.

A-painotettu äänenpaine p_A [Pa]

Äänenpaine määritettynä A-taajuuspainotusta käyttäen, yleensä tehollisarvona.

Äänenpainetaso L_p [dB]

Äänenpaineen tehollisarvon ja vertailuäänepaineen suhteen neliön kymmenkertainen kymmenlogaritmi.

A-äänitaso L_{pA} [dB]

Hetkellisen A-painotetun äänenpaineen tehollisarvon ja vertailuäänepaineen suhteen neliön kymmenkertainen kymmenlogaritmi.

Keskiäänitaso (ekvivalentti A-äänitaso, ekvivalenttitaso) L_{Aeq} [dB]

A-painotetun äänenpaineen keskimääräistä tehollisarvoa määritetyllä aikavälillä (T) vastaava A-äänitaso ($L_{Aeq,T}$).

Keskiäänitaso määritellään yhtälöllä

$$L_{Aeq,T} = 10 \lg \left(\frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} 10^{\frac{L_{pA}(t)}{10}} dt \right)$$

$$= 10 \lg \left(\frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} dt \right),$$

missä

t_1	on määritellyn aikavälin T alkuhetki
t_2	on määritellyn aikavälin T loppuhetki
$L_{pA}(t)$	on tarkasteltavan äänen A-äänitason hetkellisarvo [dB]
$p_A(t)$	on tarkasteltavan äänen A-painotetun äänenpaineen hetkellisarvo [Pa]
p_0	on vertailuäänepaine 20 μ Pa.

Tuulivoimalan näennäinen äänitehotaso (apparent sound power level) $L_{WA,k}$ [dB]

Taustamelukorjatuista äänenpainetasoista ($L_{Aeq,c,k}$) määritetty näennäinen äänitehotaso:

$$L_{WA,k} = L_{Aeq,c,k} - 6 + 10 \lg \left[\frac{4\pi R_1^2}{S_0} \right]$$

missä

$L_{Aeq,c,k}$	on taustamelukorjattu A-painotettu äänenpainetaso
R_1	on lyhyin etäisyys roottorin navasta mikrofoniin (m)
S_0	on referenssiala = 1 m ² .

Tonaalisuus

Yhden tai useamman ääneksen äänenpainetaso ja peittoäänien tason erotus kriittisellä kaistalla ääneksen (ääneksien) ympärillä.

Taustamelu

Muu kuin tuuliturbiinin synnyttämä (= mitattava) melu.

Tuulen nopeuden tavoitearvo

Tuulen nopeus, jonka vallitessa äänitehotaso halutaan määrittää. Voidaan ilmoittaa joko tuulen nopeutena 10 m korkeudessa tai turbiinin navan korkeudella. Ohjeiden mukaisissa mittauksissa suositellaan tuulen nopeuden tavoitearvona käytettäväksi 10 m korkeudella vallitsevaa tuulen nopeutta 8 m/s, mikäli muita nopeuksia ei ole vaadittu.

Mittausten aikana vallitsevat sääolot

Mittaukset tulee tehdä seuraavissa sääoloissa:

- tuulen nopeus on sama kuin tuulen nopeuden tavoitearvo (mikäli tavoitearvo on käytössä);
- tuulen suunta on turbiinista mittauspisteeseen päin $\pm 15^\circ$.

3 MITTAUSLAITTEISTO

3.1 Melun mittaaminen

Mittauslaitteiston (mukaan lukien mahdollisesti käytettävät vaihtoehtoiset laitteistot ja lisälaitteet, esimerkiksi tallennuslaitteet) tulee täyttää standardin IEC 61672-1 [4] vaatimukset tarkkuusluokan 1 äänitasomittareille. Oktaavi- tai terssikaistoittain tehtäviin mittauksiin käytettävien laitteistojen tulee täyttää standardin IEC 61260 [5] vaatimukset.

Mittauksissa käytettävän mikrofonin halkaisija saa olla enintään 13 mm.

Mittauslaitteiden toiminta tulee tarkistaa ja tarvittavat säädöt tehdä ulkoista kalibrointiäänilähdettä käyttäen. Kalibrointiäänilähteen tulee täyttää standardin IEC 60942 [6] vaatimukset. Kalibrointi tulee tehdä ennen jokaista mittaussarjaa ja mittaussarjan jälkeen. Poikkeama ennen mittauksia ja mittausten jälkeen tehtyjen kalibrointien välillä ei saa ylittää 0,2 dB. Mikäli kalibrointiarvojen ero ennen mittauksia ja mittausten jälkeen on suurempi kuin 0,2 dB, mittaukset tulee uusida. Kalibroinnissa tulee ottaa huomioon, että koko mittaus- ja tallennuslaitteistoketju on kalibroitava, esimerkiksi mikrofonin jatkokaapelin vaikutus on otettava huomioon. Kalibroinnin tulee tapahtua valmistajan ohjeiden mukaisesti. Kalibraattori on tarkistettava vähintään kahden vuoden välein.

Mikäli tulostuslaitteisto on osa mittaustuloksiin vaikuttavaa ketjua, myös tulostuslaitteiston on kuuluttava kalibroinnin piiriin.

Mittauksissa ja mittausten analysoinnissa käytettävät laitteet, myös oktaavi- ja terssisuodattimet, on aina kuvattava mittausraportissa. Kuvauksen tulee sisältää mm. laitteiden tyyppi, kalibrointi ja lyhyt selvitys näytteenottomenetelmästä (ks. luku 5). Laitteita on käytettävä valmistajan ohjeiden mukaisesti.

3.2 Sääolojen mittaaminen

Tuulen nopeuden mittaukseen tulee käyttää laitteita, joiden tarkkuus on vähintään $\pm 0,2$ m/s alueella 4 m/s – 12 m/s. Laitteilla tulee voida mitata keskimääräistä tuulen nopeutta samankaltaisesti ja synkronoituna äänitason mittaamisen kanssa.

Tuulen suunnan mittaukseen käytettävien laitteiden tarkkuuden tulee olla vähintään $\pm 5^\circ$.

Lämpötilan mittauksen tarkkuuden tulee olla vähintään $\pm 1^\circ\text{C}$.

Suhteellisen kosteuden mittauksen tarkkuuden tulee olla vähintään $\pm 2\%$ ja ilmanpaineen mittauksen tarkkuuden vähintään ± 1 kPa.

4 TUULIVOIMALOIDEN ÄÄNITEHOTASON MÄÄRITÄMINEN

Tuuliturbiinin äänitehotaso (L_{WA} 1/3-oktaavikaistoittain) määritetään turbiinin tuottaman sähkötehon eri arvoilla tuulen alapuolella sijaitsevassa pisteessä tehdyistä äänenpainetasomittauksista.

Koska turbiinin aiheuttama melu muuttuu tuulen nopeuden muuttuessa, melun mittaamisen lisäksi on määritettävä samanaikaisesti tuulen nopeus.

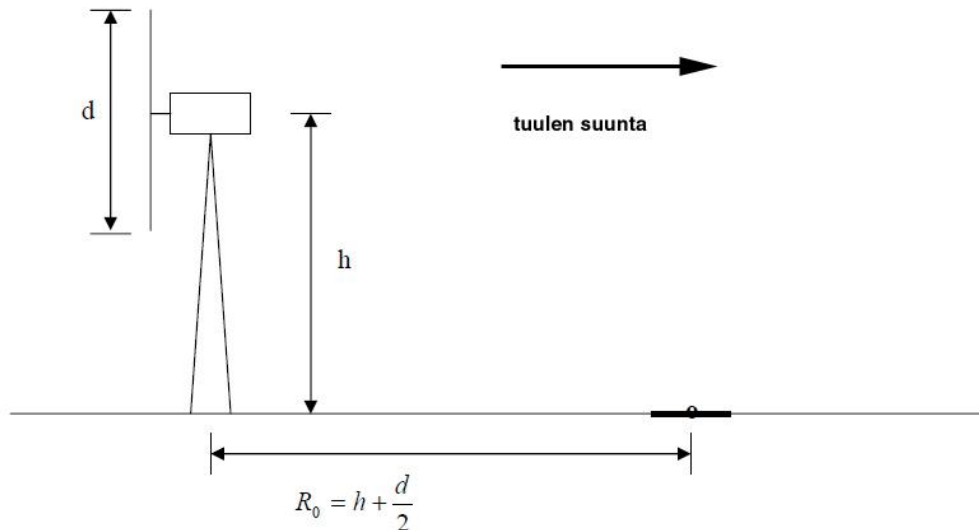
4.1 Äänenpainetasojen mittaukset

Äänitehotason määrittäminen perustuu ohjeiden mukaisesti sijoitetussa mittauspisteessä mitattuihin äänenpainetasoihin.

4.1.1 Mittauspisteen sijainti

Mittaukset tehdään etäisyydellä R turbiinin perustasta. Etäisyys R ei saa poiketa enempää kuin $\pm 20\%$ tai ± 30 m kuvan 1 mukaisesta etäisyydestä R_0 . Etäisyys $R_0 = h + d/2$, missä h on turbiinin napakorkeus ja d on roottorin halkaisija.

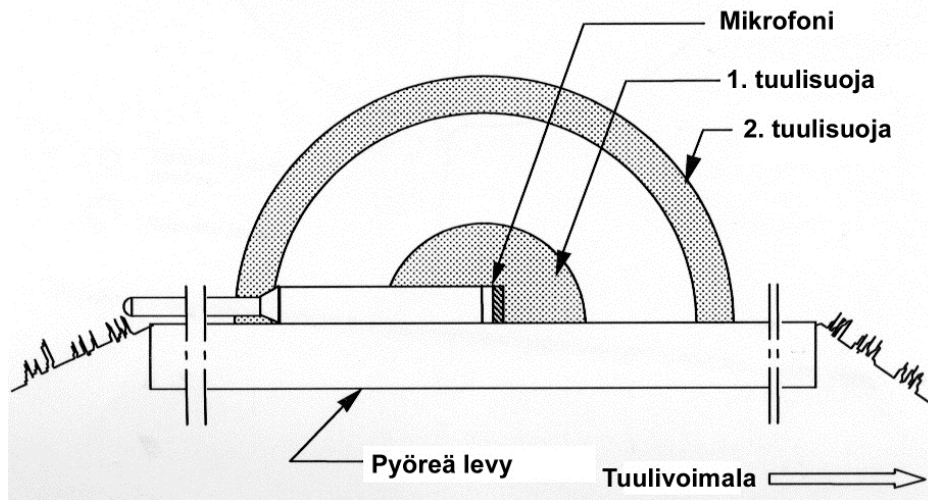
Mittauksen aikana mikrofoni sijoitetaan siten, että turbiinin ja mikrofonin välinen suunta ei poikkea enemmän kuin $\pm 15^\circ$ tuulen suunnasta.



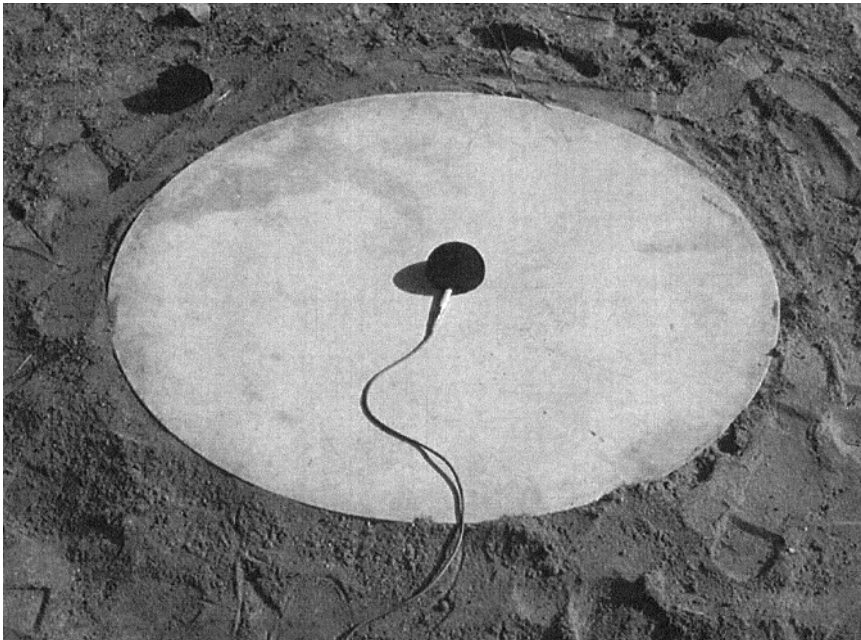
Kuva 1. Mittauspisteen sijainti ja etäisyydet.

4.1.2 Mikrofonin sijoitus

Mikrofoni sijoitetaan maan pinnalle asetetun akustisesti kovasta materiaalista tehdyn levyn päälle kuvien 2 ja 3 mukaisesti. Suositeltava levy on ympyränmuotoinen ja sen halkaisijan tulee olla vähintään 1,0 m. Mikrofonin ympärille sijoitetaan tuulisuoja (1. tuulisuoja) kuvan 2 mukaisesti ja tarvittaessa käytetään myös sekundaarista tuulisuojaa (2. tuulisuoja). Jos käytetään sekundaarista tuulisuojaa, mittaustulokset tulee korjata ottamalla tuulisuojan aiheuttama vaimennus huomioon 1/3-oktaaveittain.



Kuva 2. Pyöreä levy, jolle on asetettu mikrofoni tuulisuojiineen [1].



Kuva 3. Mikrofonin sijoitus pyöreän levyn päälle [1].

4.1.3 Mittausten suorittaminen

Mittauksilla on tarkoitus määrittää tuulivoimalan melupäästö (meluemissio) tuulen nopeuden tavoitearvolla, joka on yleensä 8 m/s (tuulen nopeus 10 m:n referenssikorkeudella) ja maanpinnan karheuden arvolla 0,05 m. Vaihtoehtoisesti mittaukset voidaan tehdä tuulen nopeuksilla 6, 7, 8, 9 ja 10 m/s.

Mittaukset tehdään A-painotettuna 1/3-oktaaveittain vähintään keskitaajuuksilla 20 Hz – 10 000 Hz. Vähintään 10 kpl (kutakin tuulen nopeusluokkaa kohden) 10 s kestävä mittaus tehdään siten, että samaan aikaan vastaava turbiinin tuottama keskimääräinen sähköteho sekä tuulen nopeus tallennetaan.

Mittaukset suositellaan tehtäväksi siten, että kaikki mittaussignaalit (sekä melumittaukseen että tuulen nopeuden mittaukseen liittyvät) tallennetaan, jolloin analysointi voidaan tehdä myöhemmin.

Samanlaiset mittaukset tehdään tuulivoimalan ollessa pysähtyneenä taustamelun mittaamiseksi ja tulokset korjataan ottamalla taustamelun vaikutus huomioon.

Jos mittaukset tehdään useilla tuulen nopeuksilla, tulosten analysoinnissa suositellaan käytettäväksi mittaustulosten jakamista kokonaisluvulla ilmoitettuihin tuulen nopeusalueisiin ("bin") siten, että kuhunkin alueeseen (esimerkiksi tuulen nopeusalueet 6, 7, 8, 9, 10 m/s) liitetään kokonaisluvulla ilmoitettua nopeusaluetta vastaavat mittaustulokset, joiden ero on enintään $\pm 0,5$ dB (esimerkiksi nopeusalue 8 sisältää tulokset väliltä 7,5 m/s – 8,5 m/s).

4.2 Tuulen nopeuden määrittäminen

Tuulen nopeus voidaan mitata turbiinin navan korkeudelle sijoitetulla anemometrillä tai vähintään 10 m:n korkeudella lähellä turbiinia paikassa, jossa turbiini tai mikään muu kohde ei vaikuta tuuleen.

Kun turbiinin tuottama keskimääräinen sähköteho on vähemmän kuin 0,95 kertaa sen nimellisteho, navan korkeudella vallitseva tuulen nopeus v_h voidaan määrittää turbiinin tehokäyrän avulla. Tuulen nopeus v_{ref} korkeudella 10 m voidaan määrittää kaavan 4.2.1 avulla.

Suuremmilla sähköntuotoilla tuulen nopeus v_h navan korkeudella määritetään sen sijaan käyttämällä turbiinin navan korkeudelle sijoitettua anemometriä ja tuulen nopeus v_{ref} korkeudella 10 m määritetään käyttämällä kaavaa 4.2.1.

$$v_{ref} = v_h \cdot \frac{\ln \frac{z_{ref}}{z_{0ref}}}{\ln \frac{h}{z_{0ref}}} \quad (4.2.1)$$

missä

h on turbiinin napakorkeus (m)
 z_{0ref} on maan karheuden referenssiarvo = 0,05 m
 z_{ref} on referenssikorkeus = 10 m.

Jos turbiinin tehokäyrää ei tunneta tai jos turbiini on pysäytetty taustamelun mittaamisen ajaksi, tuulen nopeus v_z määritetään käyttämällä vähintään 10 m korkeudella sijoitettua anemometriä. Tuulen nopeus v_{ref} määritetään tällöin käyttämällä kaavaa 4.2.2.

$$v_{ref} = v_z \cdot \frac{\ln \frac{z_{ref}}{z_0} \cdot \ln \frac{h}{z_0}}{\ln \frac{h}{z_0} \cdot \ln \frac{z}{z_0}} \quad (4.2.2)$$

missä

z on anemometrin korkeus maanpinnasta (m)

z_0 on maan karheuden arvo mittauspisteen kohdalla, taulukko 1.

Taulukko 1. Erityyppisten maanpintojen karheus.

Maanpinnan tyyppi	Karheus z_0 (m)
Vesi, lumi, hiekka	0,0001
Avoim tasainen maa, paljas maanpinta, leikattu nurmi	0,01
Viljelysmaa, jossa hieman kasvillisuutta	0,05
Asuinalue, pienet kaupungit, alueet, joilla on tiheää korkeaa puustoa	0,3

4.3 Taustamelukorjaus

Taustamelu mitataan turbiinin ollessa pysäytettynä käyttämällä samoja mittausaikoja, mitattavien spektrien määriä ja samoja tuulen nopeuden alueita kuin turbiinin käynnissä ollessa tehtävissä mittauksissa. Tuulen nopeus mitataan vähintään 10 m korkeuteen sijoitetulla anemometrillä ja tuulen nopeus v_{ref} lasketaan käyttämällä kaavaa 4.2.2.

Mitatun taustamelun energiakeskiarvot määritetään tuulen eri nopeuksilla ja näitä arvoja käytetään korjaamaan turbiinin mitattuja äänenpainetasoja $L_{A,ref}$ kullakin 1/3-oktaavikaistalla kaavan 4.3.1 mukaisesti.

$$L_{A,ref,k} = 10 \cdot \log \left(10^{\frac{L_{A,ref}}{10}} - 10^{\frac{L_{A,b}}{10}} \right) \quad (4.3.1)$$

missä

$L_{A,ref,k}$ on korjattu referenssiäänepainetaso 1/3-oktaaveittain

$L_{A,b}$ on keskimääräisen taustamelun äänenpainetaso kullakin 1/3-oktaavikaistalla.

Taustamelun A-painotettu keskiäänitaso (L_{Aeq}) tulee olla vähintään 6 dB pienempi kuin turbiinin tuottama A-painotettu keskiäänitaso (L_{Aeq}). Mikäli näin ei ole, mittaus tulee uusiksi taustamelun ollessa pienempi.

4.4 Äänitehotason määrittäminen

Turbiinin näennäinen äänitehotaso $L_{WA,k}$ määritetään 1/3-oktaaveittain (i) taustamelukorjattujen äänenpainetasojen $L_{Aeq,c,i,k}$ (tuulen nopeuden tavoitearvolle tai erikseen tuulen nopeuksille 6, 7, 8, 9 ja 10 m/s) perusteella seuraavasti:

$$L_{WA,i,k} = L_{Aeq,c,i,k} - 6 + 10 \lg \left[\frac{4\pi R_1^2}{S_0} \right] \quad (4.4.1)$$

missä

$L_{Aeq,c,i,k}$ on taustamelukorjattu A-painotettu äänenpainetaso 1/3-oktaavikaistalla i tuulen nopeusalueella k (6, 7, 8, 9 ja 10 m/s) ja referenssioloissa
 R_1 on lyhyin etäisyys roottorin navasta mikrofoniin (m)
 S_0 on referenssiala = 1 m²
 6 dB on levyn pinnalla mittauksesta aiheutuva korjaus.

4.5 Tonaalisuus

Standardin IEC 61400-11 mukaan tuulivoimalan melu tulee tutkia mahdollisen tonaalisuuden osalta. Tonaalisuusanalyysi tehdään samoilla tuulen nopeusalueilla kuin äänitehon määrittäminen. Kutakin nopeusaluetta kohden analysoidaan kaksi minuutin kestävää jaksoa, jotka ovat lähinnä tuulen kokonaisluvulla ilmaistuja nopeuksia 6, 7, 8, 9 ja 10 m/s. Nämä kaksi minuutin kestävää jaksoa jaetaan kahteentoista 10 sekuntia kestävään jaksoon, joista määritetään 12 energiakeskiarvostettua kapeakaistaista spektriä käyttämällä Hanning-ikkunointia. Taajuusresoluution tulee olla taulukon 2 mukainen.

Taulukko 2. Taajuusresoluutio tonaalisuuden määrittämisessä.

Taajuus (Hz)	< 2000	2000- 5000
Taajuusresoluutio	2 – 5 Hz	2 – 12,5 Hz

Kullekin 10 sekuntia kestäväälle spektrille ($j = 1 \dots 12$) kullakin tuulen nopeusalueella ($k = 6, 7, 8, 9, 10$) määritetään

- ääneksen (ääneksien) äänenpainetaso $L_{pt,j,k}$
- ääneksen ympärillä olevan kriittisen kaistanleveyden peiteäänän äänenpainetaso $L_{pn,j,k}$
- tonaalisuus $\Delta L_{tn,j,k}$ määritetään ääneksen äänenpainetason ja peiteäänän äänenpainetason erotuksena.

Kokonaistonaalisuus ΔL_k määritetään kahdentoista yksittäisen $\Delta L_{tn,j,k}$ -arvon energiakeskiarvona.

Standardissa IEC 61400-11 [1] on annettu lisäohjeita mahdollisten ääneksien toteamiseksi, mm. kriittisen kaistanleveyden määrittämiseksi ääneksen ympärillä.

4.6 Tuulivoima-alueen tuuliturbiinien melupäästön verifiointi

Tuulivoima-alueella tarkoitetaan tässä ohjeessa vähintään kolmen samanlaisen turbiinin muodostamaa kokonaisuutta.

Vähintään kolmen satunnaisesti valitun samantyyppisen turbiinin äänitehotasot $L_{WA, ref}$ määritetään 1/3-oktaaveittain.

Mikäli tuulen nopeus mitataan paikassa, joka on myötätuulen puolella suhteessa johonkin toiseen turbiiniin, mittauksissa käytettävän anemometrin etäisyyden siitä tulee olla vähintään 10 kertaa turbiinin roottorin halkaisija.

Mikäli jokaisen turbiinin äänitehotasot kullakin 1/3-oktaavikaistalla ovat enintään valmistajan ilmoittaman melupäästön tunnusarvon suuruisia, kaikkien tuulivoima-alueen turbiinien katsotaan olevan valmistajan ilmoittaman tunnusarvon mukaisia. Kaikille tuulipuiston samantyyppisille turbiineille voidaan mahdollisessa (lisä)melumallinnuksessa käyttää mitatun kolmen (tai useamman) turbiinin 1/3-oktaavikaistoittain määritettyä äänitehotason keskiarvoa.

5 MITTAUSTEN RAPORTOINTI

5.1 Turbiini ja mittauspaikka

Turbiinin ja mittauspaikan sijainti ja niiden ympäristö tulee kuvata tarkasti. Seuraavat tiedot kirjataan muistiin ja raportoidaan:

- turbiinin ja mittauspaikan sijainti: valokuvat, kartat, koordinaatit;
- maastotiedot: mäet, tasainen maasto, kalliot, vesialueet jne. noin 1 km etäisyyteen asti;
- maanpinnan tyyppi: ruoho, hiekka jne.;
- lähellä olevat heijastavat pinnat kuten rakennukset;
- taustamelua mittauspaikalle aiheuttavat lähteet: puut, muu kasvusto, vesialueet, tiet, rautatiet, teollisuuslaitokset jne.;
- valokuva levyn päälle asetetusta mikrofoniasta ja mittauspisteen ympäristöstä.

5.2 Turbiinin (turbiinien) tiedot

Turbiini(t) ja niiden käyttöolot tulee kuvata mahdollisimman tarkasti. Seuraavat tiedot kirjataan muistiin ja raportoidaan:

- turbiinin valmistaja, tyyppi ja sarjanumero;
- nimellisteho;
- tehokäyrä;
- navan korkeus;
- roottorin halkaisija;
- tornin tyyppi;
- tieto siitä, voidaanko turbiinia ohjata, turbiinin lapakulmat ja pyörimisnopeus tai muut ohjaukseen liittyvät seikat.

5.3 Mittauksissa käytetyt laitteet

Seuraavat tiedot kirjataan muistiin ja raportoidaan:

- mittauksissa käytetyt laitteet: tyyppi, sarjanumero, valmistajan nimi, viimeisin kalibrointipäivämäärä, näytteenottomenetelmä;
- mikrofonin sijainti ja tiedot mittauksissa mahdollisesti käytetystä mikrofonin sijoituslevystä;
- mahdollisesti käytettävän sekundaarisen tuulisuojan tiedot.

5.4 Akustiset tiedot

Kaikki mittaustiedot tallennetaan mittausten aikana. Seuraavat tiedot raportoidaan:

- näennäinen ääniteho $L_{WA,k}$ tuulen kullakin nopeusalueella (bin)
- näennäinen ääniteho $L_{WA,10m,k}$ tuulen kullakin nopeusalueella (bin) vastaten 10 m korkeutta;
- taustamelun taso;
- mittaustulosten mahdollinen tonaalisuus.

5.5 Muut tiedot

Seuraavat tiedot kirjataan muistiin ja raportoidaan:

- mittaajan nimi ja organisaation yhteystiedot;
- mittausten suorittamisen päivämäärä ja kellonaika;
- lämpötila ja ilmanpaine;
- turbulenssi tai pilvipeite (kahdeksasosina) ja auringon korkeus;
- tuulen nopeuden määrittämisen menettely;
- anemometrien ja tuulen suunnan mittareiden sijoitukset.

VIITTEET

1. IEC 61400-11 Edition 3.0 2012-11- Wind turbines – Part 11: Acoustic noise measurement techniques.
2. Statutory Order on Noise from Wind Turbines. Translation of Statutory Order no. 1284 of 15 December 2011.
3. IEC TS 61400-14. Wind turbines – Part 14: Declaration of apparent sound power level and tonality values. Technical specification. International Electrotechnical Commission.
4. IEC 61672-1:2002. Electroacoustics - Sound Level meters - Part 1: Specifications. 85 s.
5. IEC 61260. Electroacoustics - Octave-band and fractional-octave band filters.
6. IEC 60942. Electroacoustics - Sound calibrators. 177 s.

Liite 2:
Tuulivoimamelun mittaaminen
- melutason mittaaminen altistuvassa kohteessa (immis-
sionmittaukset)

SISÄLLYS

1 JOHDANTO	3
2 MÄÄRITELMIÄ	3
3 MITTAUSLAITTEISTO	5
3.1 MELUN MITTAAMINEN	5
3.2 TUULISUOJA	6
3.3 MITTAUSLEVY	6
3.4 SÄÄOLOJEN MITTAAMINEN	7
4 MITTAUKSET	7
4.1 MITTAUSMENETTELYT	8
4.2 MITTAUSPISTEET	9
4.3 TUULEN NOPEUDEN MÄÄRITTÄMINEN TURBIININ KOHDALLA	9
4.3.1 Tuulen nopeuden määrittäminen turbiinin sähkötehon ja tehokäyrän avulla	10
4.3.2 Tuulen nopeuden määrittäminen moottorikotelon päälle asennetun anemometrin avulla	10
4.3.3 Tuulen nopeuden määrittäminen 10 m korkeudelle sijoitetun anemometrin avulla	10
4.4 TUULEN NOPEUDEN JA SUUNNAN MITTAAMINEN MITTAUSPISTEEN KOHDALLA	11
4.5 MITTAUSTEN SUORITTAMINEN	11
4.5.1 Menettely A	11
4.5.2 Menettely B	11
4.5.3 Menettely C	11
4.6 TAUSTAMELUKORJAUS	12
4.7 MITTAUKSET KORKEAN TAUSTAMELUTASON VALLITESSA	12
4.7.1 Mittauksen ajankohdan siirtäminen	12
4.7.2 Mikrofonin sijoituksen muuttaminen	12
4.7.3 Kaksiosaisen tuulisuojan käyttäminen	13
4.7.4 Mittauslevyn käyttäminen	13
4.7.5 Mittaukset pienemmän tuulen nopeuden vallitessa	13
4.7.6 Mittaukset lähempänä turbiinia	13
4.8 KAPEAKAISTAISEN MELUN MITTAAMINEN	14
4.8.1 Mittauspisteet	14
4.8.2 Menetelmä 1	14
4.8.3 Menetelmä 2	15
4.9 PIENITAAJUISEN MELUN MITTAAMINEN	15
4.10 MITTAUKSET SISÄTILOISSA	15
4.11 MELUN IMPULSSIMAISSUUDEN JA VAIHTELUVOIMAKKUUDEN (AMPLITUDIMODULAATION) MÄÄRITTÄMINEN	16
5 MITTAUSTEN RAPORTOINTI	16
5.1 TURBIINI JA MITTAUSPAIKKA	16
5.2 TURBIININ (TURBIINIEN) TIEDOT	16
5.3 MITTAUKSISSA KÄYTETYT LAITTEET	17
5.4 ÄKUSTISET TIEDOT	17
5.5 MUUT TIEDOT	17
VIITTEET	18

1 JOHDANTO

Kovan tuulen ja runsaan taustamelun takia kaukana tuulivoimalasta tehtävät äänenpainetason mittaukset (immissiomittaukset) eivät aina ole mahdollisia. Tämän takia tuulivoimaloiden melu määritetään yleensä mittaamalla tuulivoimalan ääniteho tarkoitusta varten laadittujen standardien mukaisesti ja laskemalla kauempana vallitsevat äänenpainetasot perustuen mitattuihin äänitehoihin ja ympäröivän maaston ominaisuuksiin. Tapauksissa, joissa luotettavien immissiomittausten tekeminen on mahdollista, mittauksissa noudatetaan seuraavassa esitettyjä ohjeita.

Ohjeiden mukaisilla mittauksilla on mahdollista mitata ja kuvata tuulivoimaturbiinin aiheuttama äänenpainetaso äänitehotason määrittämissä kauempana tuulivoimalasta (meluimmissio).

Ohjeita voidaan käyttää melun suunnittelu- ja tunnusarvojen (ohje ja raja-arvot) täyttymisen todentamiseen sekä melumallinnuksilla saatujen tulosten verifiointiin.

Ohjeissa on annettu tietoja mittauksissa käytettävistä laitteista, mittausten menetelmistä ja tulosten esittämistavoista, kun tarkoituksena on määrittää tuuliturbiinin tai tuuliturbiiniryhmän aiheuttama meluimmissio.

Ohjeiden mukaiset mittaukset voidaan tehdä kaikissa suunnissa tuuliturbiinin (tai tuuliturbiiniryhmän) ympärillä.

Meluimmissio määritetään A-painotettuna äänitasona ja tarvittaessa myös taajuuskaistoittain.

Mittausten toistettavuuden parantamiseksi ja mallinnusten verifiointiin tarkoitettujen arvojen saavuttamiseksi on välttämätöntä, että mittaukset tehdään tiettyjen äänen etenemisolojen (sääolosuhteiden) vallitessa.

Ohjeet perustuvat viitteisiin [1-5].

2 MÄÄRITELMIÄ

Äänenpaine p [Pa]

Ääneen liittyvä hetkellisen paineen ja staattisen ilmanpaineen ero, yleensä tehollisarvona.

A-painotettu äänenpaine p_A [Pa]

Äänenpaine määritettynä A-taajuuspainotusta käyttäen, yleensä tehollisarvona.

Äänenpainetaso L_p [dB]

Äänenpaineen tehollisarvon ja vertailuäänepaineen suhteen neliön kymmenkertainen kymmenlogaritmi.

A-äänitaso L_{pA} [dB]

Hetkellisen A-painotetun äänenpaineen tehollisarvon ja vertailuäänepaineen suhteen nelion kymmenkertainen kymmenlogaritmi.

Keskiäänitaso (ekvivalentti A-äänitaso, ekvivalenttitaso) L_{Aeq} [dB]

A-painotetun äänenpaineen keskimääräistä tehollisarvoa määritetyllä aikavälillä (T) vastaava A-äänitaso ($L_{Aeq,T}$). Valtioneuvoston päätöksessä n:o 993/1992 suuresta käytetään nimitystä A-painotettu ekvivalenttitaso.

Keskiäänitaso määritellään yhtälöllä

$$L_{Aeq,T} = 10 \lg \left(\frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} 10^{\frac{L_{pA}(t)}{10}} dt \right)$$

$$= 10 \lg \left(\frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} dt \right),$$

missä

t_1	on määritellyn aikavälin T alkuhetki
t_2	on määritellyn aikavälin T loppuhetki
$L_{pA}(t)$	on tarkasteltavan äänen A-äänitason hetkellisarvo [dB]
$p_A(t)$	on tarkasteltavan äänen A-painotetun äänenpaineen hetkellisarvo [Pa]
p_0	on vertailuäänepaine 20 μ Pa.

Tonaalisuus

Yhden tai useamman äänksen äänenpainetaso ja peittoäänien tason erotus kriittisellä kaistalla äänksen (äänksien) ympärillä.

Taustamelu

Muu kuin tuuliturbiinin synnyttämä (=mitattava) melu.

Tuulen nopeuden tavoitearvo

Tuulen nopeus, jonka vallitessa äänenpainetaso halutaan mitata. Voidaan ilmoittaa joko tuulen nopeutena 10 m korkeudessa tai turbiinin navan korkeudella. Ohjeiden mukaisissa mittauksissa suositellaan tuulen nopeuden tavoitearvona käytettäväksi 10 m korkeudella vallitsevaa tuulen nopeutta 8 m/s, mikäli muita nopeuksia ei ole vaadittu.

Mittausten aikana vallitsevat sääolot

Mittaukset tulee tehdä seuraavissa sääoloissa:

- tuulen nopeus on sama kuin tuulen nopeuden tavoitearvo (mikäli tavoitearvo on käytössä);
- tuulen suunta on turbiinista mittauspisteeseen päin $\pm 45^\circ$;
- pystysuora lämpötilagradientti dT/dz on alueella $-0,05 \text{ }^\circ\text{C/m} < dT/dz < 0,05 \text{ }^\circ\text{C/m}$.

Lämpötilagradienttia koskeva vaatimus täyttyy yleensä, kun:

- mittaukset tehdään yöaikaan (aikana tunti ennen auringonlaskua ja tunti auringonnousun jälkeen);
- mittaukset tehdään päiväaikaan (aikana tunti auringonnousun jälkeen ja tunti ennen auringonlaskua), kun pilvisuus $> 4/8$.

3 MITTAUSLAITTEISTO

3.1 Melun mittaaminen

Mittauslaitteiston (mukaan lukien mahdollisesti käytettävät vaihtoehtoiset laitteistot ja lisälaitteet, esimerkiksi tallennuslaitteet) tulee täyttää standardin IEC 61672-1 [8] vaatimukset tarkkuusluokan 1 äänitasomittareille. Oktaavi- tai terssikaistoittain tehtäviin mittauksiin käytettävien laitteistojen tulee täyttää standardin IEC 61260 [7] vaatimukset.

Mittauksissa käytettävän mikrofonin halkaisija saa olla enintään 13 mm.

Mittauslaitteiden toiminta tulee tarkistaa ja tarvittavat säädöt tehdä ulkoista kalibrointiäänilähdettä käyttäen. Kalibrointiäänilähteen tulee täyttää standardin IEC 60942 [6] vaatimukset. Kalibrointi tulee tehdä ennen jokaista mittausarjaa ja mittausten jälkeen. Poikkeama ennen mittauksia ja mittausten jälkeen tehtyjen kalibrointien välillä ei saa ylittää 0,2 dB. Mikäli kalibrointi-ero ennen mittauksia ja mittausten jälkeen on suurempi kuin 0,2 dB, mittaukset tulee uusida. Kalibroinnissa tulee ottaa huomioon, että koko mittaus- ja tallennuslaitteistoketju on kalibroitava, esimerkiksi mikrofonin jatkokaapelin vaikutus on otettava huomioon. Kalibroinnin tulee tapahtua valmistajan ohjeiden mukaisesti. Kalibraattori on tarkistettava vähintään kahden vuoden välein.

Mikäli tulostuslaitteisto on osa mittaustuloksiin vaikuttavaa ketjua, myös tulostuslaitteiston on kuuluttava kalibroinnin piiriin.

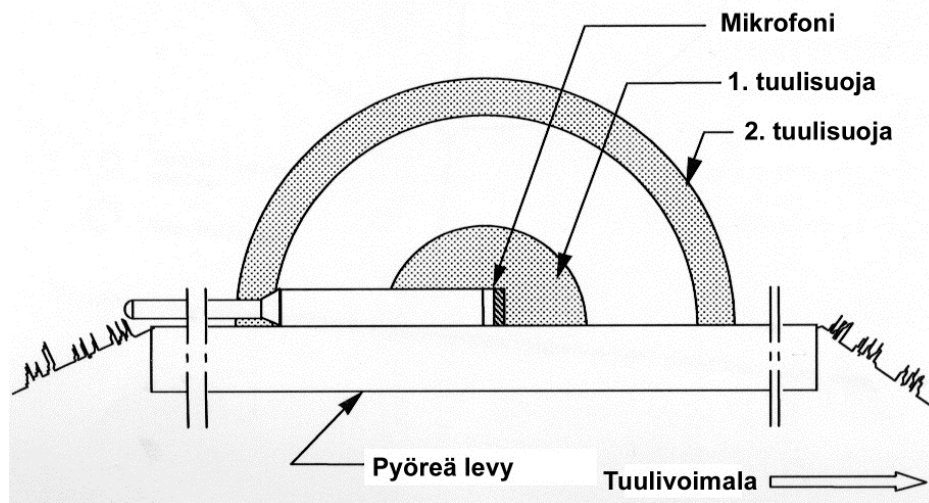
Mittauksissa ja mittausten analysoinnissa käytettävät laitteet, myös oktaavi- ja terssisuodattimet, on aina kuvattava mittausraportissa. Kuvauksen tulee sisältää mm. laitteiden tyyppi, kalibrointi ja lyhyt selvitys näytteenottomenetelmästä (ks. luku 5). Laitteita on käytettävä valmistajan ohjeiden mukaisesti.

3.2 Tuulisuoja

Riippuen mittausten tarkoituksesta ja mittauspaikan ominaisuuksista, mikrofoni voi olla asetettu mikrofonielineeseen tai maanpinnalle sijoitetulle mittauslevylle.

Telineelle asetetun mikrofonin tuulisuojana käytetään laitavalmistajan suosittelemaa primääristä tuulisuojaa. Tarvittaessa käytetään tämän ympärille asetettua toista tuulisuojaa.

Mittauslevyn päälle asetetun mikrofonin ympärille sijoitetaan puoliksi leikattu tuulisuoja (1. tuulisuoja) kuvan 1 mukaisesti ja tarvittaessa käytetään myös toista tuulisuojaa (2. tuulisuoja).

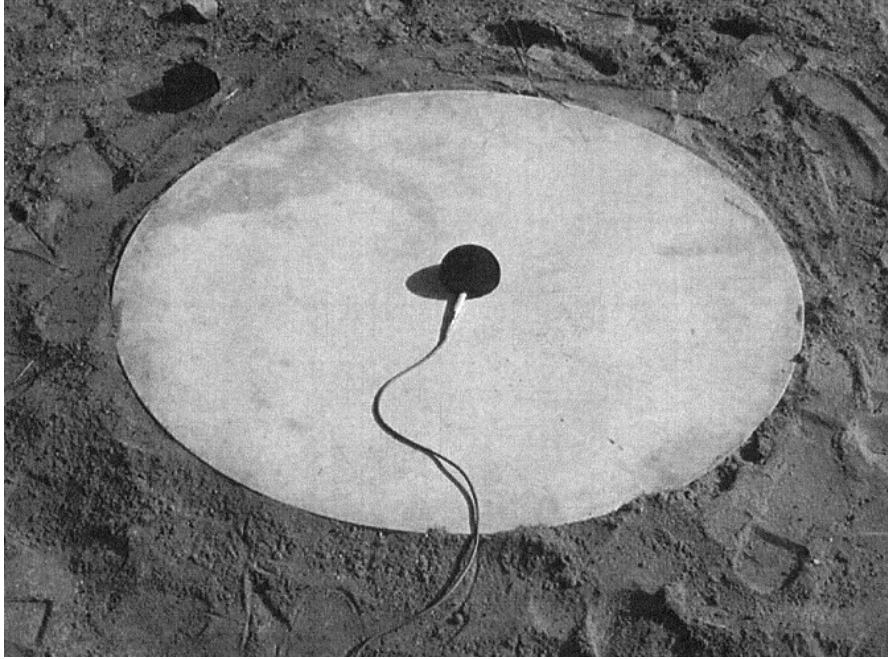


Kuva 1. Pyöreä levy, jolle on asetettu mikrofoni tuulisuojineen [9].

Tuulisuojan vaikutus mikrofonin taajuusvasteeseen on esitettävä mittausraportissa.

3.3 Mittauslevy

Tuulen aiheuttaman kohinan pienentämiseksi mikrofoni voidaan sijoittaa maan pinnalle asetetun akustisesti kovasta materiaalista tehdyn levyn päälle kuvan 2 mukaisesti. Suositeltava levy on ympyränmuotoinen ja sen halkaisijan tulee olla ainakin 1,0 m. Mikrofoni sijoitetaan mahdollisimman lähelle levyn pintaa.



Kuva 2. Mikrofonin sijoitus pyöreän levyn päälle [9].

3.4 Sääolojen mittaaminen

Tuulen nopeuden mittaukseen käytetään laitteita, joiden tarkkuus on vähintään $\pm 0,2$ m/s alueella 4 m/s – 12 m/s. Laitteilla tulee voida mitata keskimääräistä tuulen nopeutta samanaikaisesti ja synkronoituna äänitason mittaamisen kanssa.

Tuulen suunnan mittaukseen käytettävien laitteiden tarkkuuden tulee olla vähintään $\pm 5^\circ$.

Lämpötilan mittauksen tarkkuuden tulee olla vähintään $\pm 1^\circ\text{C}$.

Suhteellisen kosteuden mittauksen tarkkuuden tulee olla vähintään $\pm 2\%$ ja ilmanpaineen mittauksen tarkkuuden vähintään ± 1 kPa.

4 MITTAUKSET

Seuraavassa esitetään yleisiä ohjeita tuuliturbiinien aiheuttaman äänenpainetaso mittaamiseksi. Näiden lisäksi mittauksissa noudatetaan viitteessä [5] annettuja yleisiä ohjeita ympäristömelumittauksille.

Mittauksissa mitataan aikaa T vastaava melun keskiäänitaso $L_{\text{Aeq},T}$. Kokonaistulos määritetään useiden lyhytaikaisempien (yleensä 1 minuuttia kestävä) eri tuulen nopeuksilla mitattujen äänenpainetasojen perusteella ohjeiden mukaisesti.

Suurin mittaustekninen vaikeus tuuliturbiinien melua mitattaessa syntyy tuulen aiheuttamasta taustamelusta, esimerkiksi:

- tuulen vaikutus mikrofoniiin;
- tuulen vaikutus lähellä oleviin puihin, pensaisiin ja rakenteisiin;
- tuulen aiheuttamat aallot ja virtaukset vedessä.

Näiden lisäksi taustamelua voi aiheutua myös muista lähteistä, kuten liikenteestä, teollisuudesta, ihmisten toiminnasta jne.

Keskiäänitason $L_{Aeq,T}$ mittauksissa oletetaan, että turbiinin aiheuttama melu on turbiinin sijaintipaikalla vallitsevan tuulen nopeuden funktio ja että taustamelu on mittauspisteessä vallitsevan tuulen nopeuden funktio.

4.1 Mittausmenettelyt

Turbiinin aiheuttama äänitaso voi olla samaa suuruusluokkaa ja joissakin tapauksissa jopa alhaisempi kuin taustamelun äänitaso. Ohjeessa on annettu kolme erilaista mittausten menetelyä (A, B ja C) erilaisia mittaustilanteita varten.

Menettely A: Tuuliturbiinien aiheuttaman äänitason mittaaminen.

Turbiinien ja kaikkien taustamelulähteiden yhdessä aiheuttama äänitaso mitataan eri tuulen nopeuksilla. Tuulen nopeus mitataan samanaikaisesti ja samalla paikalla äänitasomittauksen kanssa. Tämän jälkeen turbiinit sammutetaan ja taustamelun äänitaso mitataan samanaikaisesti tuulen nopeuden kanssa. Näistä mittaustuloksista määritetään turbiinien aiheuttama äänitaso.

Menettelyllä A saatuja tuloksia voidaan käyttää verrattaessa turbiinien aiheuttamaa äänitasoa vaadittuun melutasoon edellyttäen, että melutasoa ei ole määritelty suhteessa turbiinien lähellä vallitsevaan tuulen nopeuteen.

Menettely B: Tuuliturbiinin ja taustamelun yhdessä tuulen nopeuden tavoitearvolla aiheuttaman äänitason mittaaminen.

Turbiinin ja kaikkien taustamelulähteiden yhdessä aiheuttama äänitaso mitataan mittauspisteessä. Tuulen nopeus mitataan turbiinin kohdalla käyttämällä joko anemometriä tai määrittämällä se turbiinin sähkötehon ja turbiinin tehokäyrän avulla. Tuulen nopeus muutetaan vastaamaan korkeutta 10 m tai turbiinin navan korkeutta. Äänitaso mitataan eri tuulen nopeuksilla ja erilliset mittaustulokset esitetään pisteittäin korjatun tuulen nopeuden funktiona. Äänitasopisteet approksimoidaan suoralla viivalla ja tuulen tavoitearvolla vallitseva äänitaso luetaan viivasta.

Menettelyllä B saatua arvoa voidaan pitää turbiinin aiheuttaman äänitason ylärajana tuulen nopeuden tavoitearvolla. Mitattua tulosta voidaan käyttää todentamaan, että turbiinin aiheuttama melutaso on pienempi kuin melun tunnusarvo (ohje- ja raja-arvot), mutta sitä ei voi käyttää tunnusarvon ylittymisen todentamiseen. Koska mittauksen tulosta voidaan käyttää vain silloin, kun turbiinin ja taustamelun yhdessä aiheuttama melutaso on alhaisempi kuin raja-arvo, menettelyn B käyttökelpoisuus on rajoitettua.

Menettely C: Tuuliturbiinien tuulen nopeuden tavoitearvolla aiheuttaman äänitason mittaaminen.

Turbiinien ja kaikkien taustamelulähteiden yhdessä aiheuttama äänitaso mitataan mittauspisteessä ja samanaikaisesti mitataan tuulen nopeus sekä turbiinien lähellä että äänitason mittauspisteessä. Samalla tavalla mitataan taustamelun äänitaso turbiinien ollessa sammutettuna. Molemmat äänitasot esitetään mittauspisteessä mitatun tuulen nopeuden funktiona. Taustamelun äänitasot arvioidaan käyrällä regression avulla ja turbiinien aiheuttamat äänitasot määritetään pisteittäin.

Turbiinien lähellä mitatut tuulen nopeudet muutetaan tarvittaessa vastaamaan samaa korkeutta kuin tuulen nopeuden tavoitearvon määrittelyssä on käytetty. Pelkästään turbiinien aiheuttamat korjatut äänitasot piirretään sitten tuulen nopeuden funktiona. Äänitasopisteet approksimoidaan suoralla viivalla ja tuulen tavoitearvolla vallitseva äänitaso luetaan viivasta. Tuulen nopeuden tavoitearvona käytetään tuulen nopeutta 8 m/s referenssikorkeudella 10 m.

Menettelyllä C saatua arvoa voidaan käyttää verrattaessa turbiinien aiheuttamaa äänitasoa vaadittuun melutasoon myös tilanteissa, jossa melutaso on määritetty suhteessa turbiinien lähellä vallitsevaan tuulen nopeuteen.

4.2 Mittauspisteet

Mittauspisteiden valinta tehdään mittausten tarkoituksen perusteella. Joissakin tapauksissa myös mittauspaikan olot mittausten aikana voivat vaikuttaa mittauspisteiden sijaintiin ja mitauksissa käytettävään mikrofonin sijoitukseen.

Mittaukset voidaan tehdä joko sijoittamalla mikrofoni telineeseen 1,5 m korkeudelle tai käyttämällä maahan sijoitettavaa mittauslevyä (katso kuva 2). Mikrofonin voidaan sijoittaa myös rakennuksen ulkoseinään asennetun levyn päälle. Levyn päälle asetettavaa mikrofonia käytettäessä mittaustuloksiin on tehtävä levyn vaikutuksen huomioon ottava korjaus. Telineeseen sijoitettua mikrofonia suositellaan käytettäväksi silloin, kun taustamelun taso on vähintään 3 dB turbiinin aiheuttamaa äänitasoa alhaisempi ja kun mikrofonin etäisyys heijastavista pystysuorista pinnoista on riittävän suuri. Mikrofonin sijoitetaan siten, että sen ja mitattavan turbiinin välissä on mahdollisimman vähän äänen kulkua haittaavia esteitä, esimerkiksi rakennuksia tai suurikokoisia puita. Mikrofonin sijoitus valitaan mahdollisuuksien mukaan myös siten, että aivan välittömässä läheisyydessä ei ole taustamelua mahdollisesti aiheuttavaa kasvillisuutta.

Jos taustamelun taso on vähemmän kuin 3 dB turbiinin aiheuttamaa äänitasoa alhaisempi, maan pinnalle asetetun levyn käyttö mikrofonialustana on parempi vaihtoehto (katso luku 3.3). Levyn käytöllä on mahdollista vähentää tuulen aiheuttamaa kohinaa mikrofonissa.

Mittauspisteiden valinnassa otetaan myös viitteen [5] ohjeet huomioon.

4.3 Tuulen nopeuden määrittäminen turbiinin kohdalla

Suosittelua tapa on määrittää mittausten aikana vallitseva tuulen nopeus perustuen turbiinin mitattuun sähkötehoon ja turbiinin tehokäyrään. Jos tehokäyrää ei ole saatavilla, tuulen nopeus voidaan määrittää navan korkeudelle tai vähintään 10 m korkeuteen sijoitetun anemometrin avulla.

4.3.1 Tuulen nopeuden määrittäminen turbiinin sähkötehon ja tehokäyrän avulla

Tuulen nopeus voidaan määrittää mittaamalla kunkin erillisen äänenpaineen mittauksen mitausaikaan vastaava turbiinin tuottama sähköteho. Tätä varten tarvitaan valmistajan ilmoittama turbiinin jäljitettävä tehokäyrä, josta selviää turbiinin tuottama sähköteho erilaisilla tuulen nopeuksilla. Mitattavan turbiinin asetusten tulee olla samat kuin tehokäyrän määrittämisessä käytetyllä turbiinilla. Tehokäyrän tietojen tulee vastata lämpötilaa 15 °C ja ilmanpainetta 101,3 kPa. Mikäli mittaukset on tehty erilaisissa oloissa, näiden vaikutus tulee ottaa huomioon.

4.3.2 Tuulen nopeuden määrittäminen moottorikotelon päälle asennetun anemometrin avulla

Mittausten aikana vallitseva tuulen nopeus mitataan turbiinin moottorikotelon (nacelle) päälle asennetun anemometrin avulla.

4.3.3 Tuulen nopeuden määrittäminen 10 m korkeudelle sijoitetun anemometrin avulla

Mikäli tuulen nopeutta ei ole mahdollista mitata turbiinin navan korkeudella, tuulen nopeus voidaan mitata vähintään 10 m korkeuteen sijoitetun anemometrin avulla. Anemometrin tulisi sijaita tuulen puolella turbiiniin nähden.

4.3.4 Eri korkeuksilla mitattujen tuulen nopeuksien normalisointi

Eri korkeuksilla mitatut tuulen nopeudet tulee normalisoida samaa korkeutta vastaavaksi, jotta ne olisivat vertailukelpoisia. Vertailuarvona voidaan käyttää korkeutta 10 m tai turbiinin navan korkeutta. Korjaus tehdään olettamalla, että tuulen nopeusprofiili on logaritminen.

Navan korkeudella mitattu tuulen nopeus v_h voidaan muuntaa 10 m korkeuteen (v_{10}) kaavalla

$$v_{10} = v_h \cdot \frac{\ln \frac{z_{ref}}{z_0}}{\ln \frac{h}{z_0}} \quad (4.3.1)$$

missä

h on turbiinin napakorkeus (m)

z_0 on maan karheus, taulukko 1

z_{ref} on referenssikorkeus = 10 m.

Taulukko 1. Eri tyyppisten maanpintojen karheus.

Maanpinnan tyyppi	Karheus z_0 (m)
Vesi, lumi, hiekka	0,0001
Avoin tasainen maa, paljas maanpinta, leikattu nurmi	0,01
Viljelysmaa, jossa hieman kasvillisuutta	0,05
Asuinalue, pienet kaupungit, alueet, joilla on tiheää korkeaa puustoa	0,3

4.4 Tuulen nopeuden ja suunnan mittaaminen mittauspisteen kohdalla

Tuulen nopeus mittauspisteen kohdalla mitataan edustavalla ja avoimella paikalla mikrofonin läheisyydessä ja vähintään 10 m korkeudella maan pinnasta. Tuulen suunta määritetään suunnilleen samalla kohdalla kuin tuulen nopeus. Jos tuulen nopeus mitataan sekä turbiinin että mittauspisteen kohdalla, tuulen suunnan määrittäminen vain turbiinin kohdalla on riittävää.

4.5 Mittausten suorittaminen

Mittaukset voidaan tehdä kolmella eri tavalla (menettely A, B ja C, katso luku 4.1). Kaikissa mittaustavoissa on välttämätöntä tallentaa kaikki mittaussignaalit (samanaikaisesti sekä melumittauksen että tuulen nopeuden mittauksen signaalit), jolloin tulosten tarkempi analysointi mittausten jälkeen on mahdollista.

4.5.1 Menettely A

Turbiinin ollessa käynnissä keskiäänitaso L_{AeqT} ja tuulen nopeus mitataan samanaikaisesti mittauspisteen kohdalla ja näiden keskiarvot määritetään samalle ajalle. Kunkin erillisen mittauksen suositeltava mittausaika T on 1 minuutti. Erillisiä mittauksia tulee olla vähintään 10 ja kokonaismittausajan tulee olla vähintään 30 minuuttia.

Taustamelun taso turbiinin ollessa pysäytettynä mitataan mieluummin juuri ennen turbiinin melun mittaamista tai heti turbiinin melun mittaamisen jälkeen. Taustamelun mittauksien aikana mitataan samanaikaisesti myös tuulen nopeus mittauspaikalla vastaavalla tavalla kuin turbiinin melun mittaamisessa.

Mikäli tuulen nopeudelle on asetettu tavoitearvo, vähintään kolme mittaustulosta tulee olla arvon yläpuolella ja kolme alapuolella siten että suurin poikkeama tavoitearvosta on ± 2 m/s.

4.5.2 Menettely B

Turbiinin ollessa käynnissä keskiäänitaso L_{AeqT} ja tuulen nopeus mitataan samanaikaisesti mittauspisteen kohdalla ja näiden keskiarvot määritetään samalle ajalle. Kunkin erillisen mittauksen suositeltava mittausaika T on 1 minuutti. Erillisiä mittauksia tulee olla vähintään 10, joista vähintään kolme mittaustulosta tulee olla tuulen tavoitearvon yläpuolella ja kolme sen alapuolella siten että suurin poikkeama tavoitearvosta on ± 2 m/s.

Kokonaismittausajan tulee olla vähintään 30 minuuttia ja vähintään 10 minuuttia tavoitearvon alapuolella ja yläpuolella olevissa mittauksissa.

4.5.3 Menettely C

Turbiinin ollessa käynnissä keskiäänitaso L_{AeqT} mitataan mittauspisteen kohdalla ja samanaikaisesti mitataan tuulen nopeudet turbiinin ja mittauspisteen kohdalla ja näiden keskiarvot määritetään samalle ajalle. Kunkin erillisen mittauksen suositeltava mittausaika T on 1 minuutti. Erillisiä mittauksia tulee olla vähintään 10, joista vähintään kolme mittaustulosta tulee olla tuulen tavoitearvon yläpuolella ja kolme sen alapuolella siten että suurin poikkeama tavoitearvosta on ± 2 m/s.

Kokonaismittausajan tulee olla vähintään 30 minuuttia ja vähintään 10 minuuttia tavoitearvon alapuolella ja yläpuolella olevissa mittauksissa.

Kun turbiini on pysäytettyä, taustamelun keskiäänitaso L_{AeqT} mitataan juuri ennen turbiinin melun mittaamista tai heti turbiinin melun mittaamisen jälkeen. Taustamelun mittauksien aikana mitataan samanaikaisesti myös tuulen nopeus mittausspaikalla vastaavalla tavalla kuin turbiinin melun mittaamisessa.

4.6 Taustamelukorjaus

Taustamelu mitataan turbiinin ollessa pysäytettynä käyttämällä samoja mittausaikoja, mitattavien spektrien määriä ja samoja tuulen nopeuden alueita kuin turbiinin käynnissä ollessa tehtävissä mittauksissa.

Mitatun taustamelun energiakeskiarvot määritetään tuulen eri nopeuksilla ja näitä arvoja käytetään korjaamaan turbiinin mitattuja äänenpainetasoja $L_{Aeq,free}$ kaavan 4.6.1 mukaisesti.

$$L_{Aeq,corr} = 10 \cdot \lg \left(10^{\frac{L_{Aeq,free}}{10}} - 10^{\frac{L_n}{10}} \right) \quad (4.6.1)$$

missä

$L_{Aeq,corr}$	on turbiinin yksistään aiheuttama äänitaso (korjattu arvo)
$L_{Aeq,free}$	on turbiinin ja taustamelun yhdessä aiheuttama äänitaso (mitattu arvo)
L_n	on keskimääräisen taustamelun äänenpainetaso kullakin tuulen nopeusalueella.

Kun $L_{Aeq,free} - L_n$ on välillä 3 – 6 dB, korjattuihin arvoihin tehdään tästä kertova merkintä. Jos $L_{Aeq,free} - L_n$ on 3 dB tai tämän alle, arvoa $L_{Aeq,free} - 3$ dB voidaan pitää turbiinin aiheuttaman melun ylärajana.

4.7 Mittaukset korkean taustamelutason vallitessa

Kaukana tuuliturbiinista tehtävissä immissiomittauksissa taustamelun vaikutus mittaustulokseen voi olla suuri ja joissakin tapauksissa vaaditaan erityistoimenpiteitä, jotta taustamelun vaikutus saataisiin minimoitua. Seuraavassa on esitetty joitakin mahdollisia keinoja taustamelun vaikutuksen pienentämiseksi.

4.7.1 Mittauksen ajankohdan siirtäminen

Taustamelu voi vaihdella eri vuorokaudenaikoina. Taustamelu on yleensä pienempi yöaikaan, joten tilanteissa, joissa taustamelun vaikutus päiväaikaan on liian suuri, mittaukset voidaan tehdä yöllä.

4.7.2 Mikrofonin sijoituksen muuttaminen

Mikäli mikrofonin lähellä olevista lähteistä (esimerkiksi kasvillisuudesta aiheutuva taustamelu) havaitaan syntyvän liian paljon taustamelua, mikrofonin sijaintia voidaan muuttaa edellyttäen, että uuden sijoituspaikan ominaisuudet vastaavat alkuperäisen mittauspisteen ominaisuuksia. Jos mikrofonin sijoituspaikka muutetaan, voi olla tarpeellista muuttaa myös tuulen nopeuden mittausspaikkaa.

4.7.3 Kaksiosaisen tuulisuojan käyttäminen

Tilanteissa, joissa tuulen aiheuttama kohina mikrofonissa muodostaa pääasiallisimman taustamelun, sekundaarisen tuulisuojan käyttö voi olla hyödyllistä (katso luku 3.2). Tämän tyyppinen tuulisuojaja voi vaikuttaa mitattavaan taajuusvasteeseen, joten tuulisuojan mahdollisesti aiheuttama vaimennus on otettava huomioon mittaustulokseen tehtävällä korjauksella.

4.7.4 Mittauslevyn käyttäminen

Katso kohta 3.3.

Mittauslevyä (sekä maan pinnalle että seinälle asetettavaa) käyttämällä saadut tulokset korjataan vapaan kentän arvoiksi kaavalla

$$L_{free} = L_{board} - 6 \text{ dB} \quad (4.7.1)$$

missä

L_{free} on korjattu $L_{Aeq,T}$

L_{board} on mittauslevyä käyttämällä mitattu $L_{Aeq,T}$.

4.7.5 Mittaukset pienemmän tuulen nopeuden vallitessa

Turbiinin ja taustamelun äänitasot riippuvat tuulen nopeudesta. Joissakin tapauksissa taustamelun taso pienenee enemmän tuulen nopeuden pienetessä kuin turbiinin äänitaso. Tällöin on mahdollista saada parannus signaali/kohinasuhteeseen tekemällä mittaukset pienemmän tuulen nopeuden vallitessa. Koska äänen eteneminen turbiinista mittauspisteeseen riippuu tuulen nopeudesta, ei ole suositeltavaa pienentää tuulen nopeuden tavoitearvoa enempää kuin 2 m/s.

Tuulen nopeuden pienentäminen on mahdollista, jos käytetään Menettelyä C ja jos tuulen suunta pysyy samana sekä turbiinin teho tuulen nopeuden funktiona on tiedossa. Tällä tavalla tehdyissä mittauksissa mittausten tarkkuus huononee kuitenkin jonkin verran. Pienemmällä tuulen nopeudella mitatut tulokset on korjattava ottamalla huomioon tuulen nopeuden muutoksen vaikutus.

4.7.6 Mittaukset lähempänä turbiinia

Mittausetäisyyden pienentäminen kasvattaa yleensä signaali/kohinasuhdetta. Yksittäisen turbiinin melua mitattaessa mittausetäisyyttä voidaan pienentää 25 % edellyttäen, että:

- etäisyys uuteen mittauspisteeseen ylittää arvon $1,5(H+D/2)$, missä H on turbiinin napaan korkeus ja D roottorin halkaisija;
- mittauspisteestä turbiinin napaan vedetyn viivan ja maanpinnan välinen kulma pysyy samana $\pm 5^\circ$ (myötätuulimittauksissa $\pm 10^\circ$);
- mikrofoni on samalla korkeudella maanpinnasta kuin alkuperäisessä mittauspisteessä;
- maaston tyyppi ja maanpinnan impedanssi on samanlainen kuin alkuperäisessä mittauspisteessä;
- uusi sijainti on samanlainen alkuperäisen paikan kanssa turbiinin melun mahdollisten varjostusten suhteen.

Lähempänä turbiinia tehtävillä mittauksilla saadut tulokset tulee korjata laskennallisesti ottamalla huomioon lyhyempi mittausetäisyys. Korjaus tehdään kaavalla:

$$L_{Aeq,corr} = L_{Aeq,red} - 20 \lg \left(\frac{R_1}{R_2} \right) \text{ dB} \quad (4.7.2)$$

missä

$L_{Aeq,corr}$ on korjattu äänitaso

$L_{Aeq,red}$ on lähempänä turbiinia mitattu (mittauslevyn ja taustamelun suhteen korjattu) äänitaso

R_1 on turbiinin navan ja alkuperäisen mittauspisteen välinen etäisyys

R_2 on turbiinin navan ja uuden mittauspisteen välinen etäisyys.

4.8 Kapeakaistaisen melun mittaaminen

Kapeakaistainen melu mitataan, jos on tarpeen määrittää turbiinin aiheuttaman melun tonaalisuus mittauspaiikalla. Mittauksessa voidaan käyttää kahta eri menetelmää. Menetelmässä 1 käytetään kapeakaistaista RMS-spektriä ja menetelmässä 2 käytetään tämän lisäksi myös yksittäisiä lyhytaikaisia spektrejä. Menetelmät antavat samat tulokset vain stationäärisille signaaleille. Kapeakaistaisuuden määrittämiseen tehdään mieluummin tallennetuista signaaleista.

Mahdollinen kapeakaistaisuus määritetään standardin IEC 61400-11 [9] ohjeiden mukaisesti.

4.8.1 Mittauspisteet

Kapeakaistaiset spektrit mitataan samoissa mittauspisteissä (mikrofonin ja anemometrien sijainnit) kuin varsinaisissa mittauksissa.

4.8.2 Menetelmä 1

Mittaukset tehdään käyttämällä äänitasomittarin lineaarista asetusta ja muut melulähteet kuin turbiini eivät saa häiritä mittausta. Vakionopeuksisille turbiineille mitataan 1 – 2 minuuttia kestävät tehollisarvot. Mikäli käytetään FFT-analysaattoria, mittauksessa tulee käyttää Hanning-ikkunointia.

Mittauksissa käytettävä taajuusresoluutio riippuu äänen taajuudesta taulukon 2 mukaisesti.

Taulukko 2. Taajuusresoluutio eri taajuusalueilla.

ääneksen taajuus (Hz)	resoluutio (Hz)
< 2000	2,0-5,0
≥ 2000	2,0 – 12,5

Vähintään viisi RMS-spektriä tarvitaan ± 1 m/s alueella suhteessa tuulen nopeuden tavoitearvoon. Lisämittauksia voidaan tehdä tuulen nopeuksilla, joilla ääneksien arvioidaan olevan merkityksellisimpiä.

Turbiineille, joiden nopeus vaihtelee, mitataan vähintään 30 kapeakaistaista spektriä (mittausaika 10 s) \pm 1 m/s alueella suhteessa tuleen nopeuden tavoitearvoon.

Muiden melulähteiden mahdollinen vaikutus mittaustulokseen on estettävä mittaolosuhteiden valinnalla tai muiden melulähteiden vaikutus on poistettava mittaustuloksista.

4.8.3 Menetelmä 2

Luvun 4.8.2 mukaisten mittausten lisäksi mitataan lyhytaikaisia hetkellisiä spektrejä käyttämällä aikapainotusta F. Kustakin 1 – 2 minuuttia kestävästä jaksosta määritetään vähintään 50 lyhytaikaista spektriä.

4.9 Pienitaajuisen melun mittaaminen

Pienitaajuisella melulla tarkoitetaan taajuusalueella 20 – 200 Hz esiintyvää melua. Alle 20 Hz taajuuksilla esiintyvää ääntä kutsutaan puolestaan infraääneksi.

Suuret tuulivoimalat voivat aiheuttaa pienitaajuisia melua, jonka mittaaminen ulkotiloissa on hankalaa tuulen mikrofonissa aiheuttaman pientaajuisen kohinan takia.

Pienitaajuisen melun mittaaminen tehdään vastaavalla tavalla kuin turbiinin aiheuttaman melun mittaaminen, mutta mittauksessa on käytettävä erityisesti pientaajuisen melun mittaukseen tarkoitettua sekundaarista tuulisuojaa, jonka aiheuttama vaimennus mitattavaan meluun on otettava huomioon. Tämän lisäksi mittauksessa käytettävän laitteiston taajuusvasteen tulee ulottua 4 Hz:iin asti.

Mittaukset tehdään 1/3-oktaaveittain keskitaajuuksilla 20 Hz – 200 Hz ilman A-painotusta (linearisella alueella).

Paras tapa tehdä pienitaajuisen melun mittaukset on tallentaa kaikki mittaussignaalit (samanaikaiset tuulen nopeustiedot ja äänitiedot) ja analysoida tulokset myöhemmin.

4.10 Mittaukset sisätiloissa

Sisätiloissa tehtävissä mittauksissa noudatetaan viitteiden [5 ja 10] ohjeita.

Pienitaajuisen melun mittaamisessa sisätiloissa noudatetaan seuraavassa annettuja lisäohjeita.

Pienitaajuinen melu mitataan kolmessa 1,5 m korkeudella lattian pinnasta sijaitsevassa pisteessä, joista kaksi sijaitsee oleskelualueella, joissa pienitaajuisen melun arvioidaan olevan voimakkaimmillaan ja yksi huoneen nurkassa (0,5 m – 1 m etäisyydellä seinistä). Mittaukset tehdään taajuusalueella 20 – 200 Hz ja lopputulos on kolmen mittauspisteen tulosten energia-keskiarvo.

Sisätiloissa vallitseva pienitaajuinen melu voidaan arvioida myös laskennallisesti perustuen tarkasteltavan turbiinin äänitehoon, äänen etenemiseen turbiinista tarkasteltavan rakennuksen luo sekä rakennuksen ääneneristykseen.

4.11 Melun impulssimaisuuden ja vaihteluvoimakkuuden (amplitudimodulaation) määrittäminen

Melun mahdollinen impulssimaisuus sekä amplitudimodulaatio ja sen aste määritetään mittauksen aikana tallennetuista signaaleista.

Impulssimaisuus määritetään äänitasomittarin impulssiaikavakiolla mitatun A-painotetun ekvivalenttitason ($L_{pA_{Ieq}}$) ja vastaavalta aikaväliltä määritetyn A-painotetun keskiäänitason ($L_{pA_{eq}}$) erotuksena standardin SFS-EN ISO 3744:2009, Annex D:n [11] mukaan. Impulssimaisuuden toteaminen on suhteellisen yksinkertaista kaksikanavaisella äänitasomittauksella. Melu määritellään impulssimaiseksi, jos erotus on suurempi kuin 3 dB.

Turbiinien amplitudimodulaation määrittämiseen ei tällä hetkellä ole käytettävissä standardoitua menetelmää. Amplitudimodulaation asteen määrittämiseen on kuitenkin olemassa kansainvälisesti käytettyjä menetelmiä, esim. [11, s. 137-139], joita voidaan hyödyntää määrittäessä tuuliturbiini(e)n amplitudimodulaation astetta mahdollisissa turbiinien melupäästön ja tuulivoima-alueiden aiheuttamien immissiotasojen määrityksissä. Tuulivoimalan tuotaman melun amplitudimodulaation asteen ja tuulivoimalan melun häiritsevyyden välille ei kuitenkaan ole yksikäsitteistä arviointiasteikkoa, joten amplitudimoduloituneen melun mahdollinen häiritsevyys on selvittävä kussakin tapauksessa erikseen.

5 MITTAUSTEN RAPORTOINTI

5.1 Turbiini ja mittauspaikka

Turbiinin ja mittauspaikan sijainti ja niiden ympäristö tulee kuvata tarkasti. Seuraavat tiedot kirjataan muistiin ja raportoidaan:

- turbiinin ja mittauspaikan sijainti: valokuvat, kartat, koordinaatit;
- maastotiedot: mäet, tasainen maasto, kalliot, vesialueet jne. noin 2-3 km etäisyyteen asti;
- maanpinnan tyyppi: ruoho, hiekka jne.;
- lähellä olevat heijastavat pinnat kuten rakennukset;
- taustamelua mittauspaikalle aiheuttavat lähteet: puut, muut kasvustot, vesialueet, tiet, rautatiet, teollisuuslaitokset jne.

5.2 Turbiinin (turbiinien) tiedot

Turbiini(t) ja niiden käyttöolot tulee kuvata mahdollisimman tarkasti. Seuraavat tiedot kirjataan muistiin ja raportoidaan:

- turbiinin valmistaja, tyyppi ja sarjanumero;
- nimellisteho;
- tehokäyrä;
- navan korkeus;
- roottorin halkaisija;
- tornin tyyppi;
- tieto siitä, voidaanko turbiinia ohjata, turbiinin lapakulmat ja pyörimisnopeus tai muut ohjaukseen liittyvät seikat.

5.3 Mittauksissa käytetyt laitteet

Seuraavat tiedot kirjataan muistiin ja raportoidaan:

- mittauksissa käytetyt laitteet: tyyppi, sarjanumero, valmistajan nimi, viimeisin kalibrointipäivämäärä, näytteenottomenetelmä;
- mikrofonin sijainti ja tiedot mittauksissa mahdollisesti käytetystä mikrofonin sijoituslevystä;
- mahdollisesti käytettävän sekundaarisen tuulisuojan tiedot.

5.4 Akustiset tiedot

Kaikki mittaustiedot tallennetaan mittausten aikana. Tämän lisäksi seuraavat tiedot kirjataan muistiin ja raportoidaan:

Menetelmä A:

- korjattu äänitaso $L_{Aeq,corr}$;
- taustamelun taso.

Menetelmä B:

- kokonaismelun (turbiinin aiheuttama melu + taustamelu) vapaan kentän arvo $L_{Aeq,free}$.

Menetelmä C:

- korjattu äänitaso $L_{Aeq,corr}$ tuulen nopeuden tavoitearvolla;
- korjattu äänitaso $L_{Aeq,corr}$ tuulen nopeuden funktiona 10 m tai navan korkeudella;
- taustamelu mittauspisteessä mitatun tuulen nopeuden funktiona.

Lisätietoja kaikille menetelmille:

- tiedot mahdollisesti käytetyistä likimääräisistä menettelytavoista;
- mittaustulosten mahdollinen tonaalisuus.

5.5 Muut tiedot

Seuraavat tiedot kirjataan muistiin ja raportoidaan:

- mittajaan nimi ja organisaation yhteystiedot;
- mittausten suorittamisen päivämäärä ja kellonaika;
- lämpötila ja ilmanpaine;
- turbulenssi tai pilvipeite (kahdeksasosina) ja auringon korkeus;
- tuulen nopeuden määrittämisen menettely;
- anemometrien ja tuulen suunnan mittareiden sijoitukset.

VIITTEET

1. IEA Recommended Practices for Wind Turbine Testing and Evaluation. 10. Measurement of Noise Immission from Wind Turbines at Noise Receptor Locations, first ed., 1997.
2. Mätning av bullerimmission från vindkraftverk. Elforsk rapport 98:24. October 1998.
3. Compliance Protocol for Wind Turbine Noise. Guideline for Acoustic Assessment and Measurement. Ontario Ministry of the Environment.
4. Measurement of Audible Noise from Wind Turbines - Phase 1 Report - Literature and Jurisdictional Review. Ontario Ministry of the Environment. 11 June 2010.
5. Ympäristömelun mittaaminen. Ympäristöministeriön ympäristönsuojeluosaston Ohje 1 1995. 81 s.
6. IEC 60942. Electroacoustics - Sound calibrators. 177 s.
7. IEC 61260. Electroacoustics - Octave-band and fractional-octave band filters.
8. IEC 61672-1:2002. Electroacoustics - Sound Level meters - Part 1: Specifications. 85 s.
9. IEC 61400-11 Edition 3.0 2012-11- Wind turbines – Part 11: Acoustic noise measurement techniques.
10. Sosiaali- ja terveysministeriö. Helsinki 2003. Asumisterveysohje. Sosiaali- ja terveysministeriön oppaita 2003:1. 93 s.
11. SFS-EN ISO 3744:2009. Acoustics. Determination of sound power levels of noise sources using sound pressure. Engineering method in an essentially free field over a reflecting plane. Suomen standardisoimisliitto SFS.
12. Karjalainen, M., Kommunikaatioakustiikka. Espoo 1999. Helsinki University of Technology, Laboratory of Acoustics and Audio Signal Processing. Report 51. 237 s.