



TAMPEREEN
AMMATTIKORKEAKOULU

SEKUNDÄÄRITUULISUOJAN KÄYTTÖ TUU- LIVOIMAMELUN MITTAUKSESSA MELULLE ALTISTUVASSA KOHTEESSA

Joel Lindholm

Opinnäytetyö
Joulukuu 2018

Degree Programme in Environmental Engineering



TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Environmental Engineering

LINDHOLM, JOEL:

Sekundäärituulisuojan käyttö tuulivoimamelun mittauksessa melulle altistuvassa kohteessa

Opinnäytetyö 86 sivua, joista liitteitä 6 sivua
Joulukuu 2018

Opinnäytetyön toimeksiantajana toimi konsultointiyritys WSP Finland Oy. Opinnäytetyön tavoite oli selvittää, miten sekundäärituulisuoja vaikuttaa tuulivoimamelulle altistuvan kohteen melumittauksen tulosten käsittelyprosessiin ja saatuihin tuloksiin. Osa opinnäytetyöstä koostui sekundäärituulisuojan valmistamisesta ja sen ominaisuuksien määrittämisestä kansainvälisen IEC 61400-11 (3.0) standardin mukaisesti. Opinnäytetyön tutkimusmenetelminä käytettiin kolmea erilaista mittausasetelmaa: mittaus 1,5 metrin korkeudella maanpinnasta jalustalla primäärituulisuojan kanssa, mittaus maassa levyn päältä primäärituulisuojan kanssa ja mittaus maassa levyn päältä sekä primääri- että sekundäärituulisuojan kanssa.

Tehtyjen mittausten tulosten perusteella voidaan todeta, että sekundäärituulisuojan käyttäminen tuulivoimamelun mittauksessa parantaa sekä mittaustulosten luotettavuutta että edistää tulosten käsittelyprosessia huomattavasti. Mikrofoniin kohdistuvat tuulen aiheuttamat häiriöäännet ovat merkittävästi vähäisempiä sekundäärituulisuojaa käytettäessä verrattuna kahteen muuhun käytettyyn mittaustapaan. Tuulen aiheuttamien häiriöäännet vähäisyys mittausdatassa tekee mittaustuloksesta luotettavamman ja helpottaa merkittävästi melun impulssimaisuusanalyysiä, joka tehdään mittauksen äänitallenteelle. Ilman sekundäärituulisuojaa tehtyjen mittausten äänitallenteet sisältävät runsaasti tuulen häiriöääniä, jotka WSP Finland Oy:n käytössä olevalla impulssimaisuusanalyysiohjelmalla osoittautuivat impulssimaisiksi. Tulosten käsittelyn kannalta nämä äänitason sanktioihin johtavat impulssit ja niiden aiheuttajat täytyy tunnistaa tuulivoiman tai muun lähteen aiheuttamiksi. Koska sekundäärituulisuojaa käyttäen tuulivoimalan aiheuttamasta melusta ei löydetty sanktiota aiheuttavia impulsseja, voidaan päätellä, että kahden muun mittauksen äänitallenteesta löytyvät sanktiota aiheuttavat impulssit ovat tuulen mikrofoneihin aiheuttamia häiriöääniä.

Johtopäätöksenä voidaan todeta, että valmistettu sekundäärituulisuoja on toimiva ja sitä tullaan jatkossakin käyttämään WSP Finland Oy:n tuulivoimamelumittauksissa. Suojan kehitystarpeena on selvittää sen lumen- ja pakkasenkestävyys sekä kestävyys pidempiaikaisissa, mahdollisesti kuukausia kestävässä, melumittauksissa. Lisäksi suojan ominaisuuksien paremmin tuntemiseksi on mahdollista koemittauksin selvittää ilmavirran nopeudet, joilla suoja ei enää estä äänitason vääristymistä tai äänisignaalin säröytymistä.

Asiasanat: tuulivoima, melu, melumittaus, tuulisuoja, melun impulssimaisuus

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Environmental Engineering

LINDHOLM, JOEL:

The Effect of A Secondary Windscreen on A Wind Turbine Noise Immission Measurement

Bachelor's thesis 86 pages, appendices 6 pages
December 2018

This thesis was commissioned by the consultancy company WSP Finland Ltd. The aim of the thesis was to research how the use of secondary windscreen affects immission measurement of wind turbine noise. The focus was on the question, how secondary windscreen affects measurement analysis and results and how usable it is in a real wind turbine noise immission measurement. Part of this thesis was also to produce the used secondary windscreen and define its qualities according to the international IEC 61400-11 3.0 standard. The research was carried out with three different noise immission measurements: microphone and primary windscreen on a stand at 1.5-meter height, microphone on wooden measuring board with primary windscreen and microphone on wooden measuring board with primary and secondary windscreens.

From the measurement results of this thesis, it can be concluded that the use of the secondary windscreen improves the reliability of the measurement results compared with the other two measurement methods. In addition, the impulsivity analysis is also a great deal of faster with the audio signal of the secondary windscreen measurement. Both results originate from the fact that without the secondary windscreen, the noise levels and the audio records contain high amounts of disturbance noises born when wind blows directly to the microphone. Low amount of wind noise makes the result more reliable since all data covered by disturbance noise is useless in the analysis. In addition to this, the wind noise is nearly impossible to remove from the sound levels and audio recordings. In this thesis it was also found out that the wind born disturbance noises in the microphones are impulsive and significance of these impulses would cause a sanction to the final sound level results. Audio recording from the immission measurement with the secondary windscreen contained only few impulses that would cause a sanction but none of the impulses were caused by the wind turbine. In the other two measurements the high amount of impulses that cause sanction, originate from the wind born disturbance noises in the microphones.

As a conclusion, secondary windscreen works well and it will be used in upcoming wind turbine noise measurements of the WSP Finland Ltd. As a target for development, the performance of the windscreen in snowy and low temperature conditions should be researched. Also, it could be usable information to find out what are the air flow speeds when the secondary windscreen is no more protecting the microphone from the wind distortions in sound levels or audio recordings.

Key words: wind power, noise, noise immission measurement, secondary windscreen, noise impulsivity

SISÄLLYS

1	EXTENDED ABSTRACT	9
1.1	Introduction.....	9
1.1.1	Immission measurement methods of wind power noise	9
1.1.2	Wind noise in microphones.....	9
1.1.3	Purpose and aim of this thesis	10
1.2	Materials and methods	10
1.2.1	Secondary windscreen.....	11
1.2.2	Immission measurement.....	11
1.3	Results and conclusions	13
2	JOHDANTO.....	16
3	AKUSTIIKAN PERUSTEET	19
3.1	Ääni.....	19
3.2	Äänenpaine p [Pa].....	19
3.3	Äänenpainetaso L_p [dB]	19
3.4	Keskiäänitaso eli ekvivalenttitaso.....	21
3.5	Melu.....	22
3.6	Äänen Taajuus ja spektri.....	24
3.6.1	Äänekkyyys ja ihmisen kuulokynnys	25
3.6.2	Oktaavikaistat ja 1/3-oktaavikaistat	26
3.6.3	A-taajuuspainotus.....	28
3.6.4	Äänen impulssimaisuus.....	29
3.6.5	Äänen kapeakaistaisuus	30
3.7	Vaaleanpunainen kohina.....	30
3.8	FFT (Fast Fourier Transform) Fourier-muunnos.....	31
3.9	Inversio	32
3.10	Mikrofonit ja tuulisuojat	33
3.10.1	Mikrofonin äänitason ja äänisignaalin mittaus ja tallennus	33
4	TUULIVOIMAMELU JA SEN MITTAAMISTA KOSKEVAT OHJEET, LAIT JA STANDARDIT	35
4.1	Tuulivoimamelu.....	35
4.2	Tuulivoimamelutasojen määrittäminen	36
4.3	Tuulivoimamelun mittaaminen.....	37
4.3.1	Tuulen vaikutus tuulivoimamelun mittaamiseen	38
4.4	Tuulivoimamelun mittaamista koskevat ohjeet, lait ja standardit	38
4.4.1	Ympäristöministeriön ohje: Tuulivoimaloiden melutason mittaaminen altistuvassa kohteessa	39

4.4.2	Sekundäärituulisuoja IEC 61400 -standardissa.....	40
4.4.3	Tuulivoimamelua koskevat ohjeavot ja toimenpiderajat	41
4.4.4	Muun ympäristömelun ulkoalueiden ohjeavot	43
5	SEKUNDÄÄRITUULISUOJA JA ALTISTUVAN KOHTEEN MITTAUKSEN MENETELMÄT.....	44
5.1	Sekundäärituulisuojan valmistaminen	44
5.1.1	Sekundäärituulisuojan ominaisuuksien määrittäminen.....	44
5.2	Altistuvan kohteen mittausmenetelmä ja mittaustulosten käsittely	47
5.2.1	Melun impulssimaisuuden ja kapeakaistaisuuden määrittäminen	50
5.3	Tutkimusvaihtoehdot	52
5.4	Mittausasetelma altistuvassa kohteessa	53
5.4.1	Sääolosuhteiden mittaus altistuvan kohteen mittauksessa	54
5.5	Tuulivoimalan tiedot.....	55
5.6	Mittausajankohta ja tuulivoimalan pysäytykset.....	55
6	MITTAUSTULOKSET JA JOHTOPÄÄTÖKSET	56
6.1	Sekundäärituulisuojan ominaisuudet	56
6.2	Altistuvan kohteen mittauksen sääolosuhteet ja voimalan tehontuotto ...	57
6.2.1	Mittausdatan häiriöäänät	60
6.2.2	Kokonais- ja taustamelutasojen kuvaajat.....	61
6.2.3	Muodostetut taustamelutasot.....	63
6.2.4	Tuulivoimalan aiheuttamat taustamelukorjatut äänitasot.....	63
6.3	Impulssimaisuus ja kapeakaistaisuus	66
6.3.1	Ympäristöministeriön ympäristömelun mittausohjeen mukainen tulosten käsittely	67
6.3.2	VTT:n tutkimusraportin mukainen tulosten käsittely	68
7	EPÄVARMUUSTARKASTELU	71
7.1.1	Sekundäärituulisuojan ominaisuuksien määrittäminen epävarmuus	71
7.1.2	Altistuvan kohteen mittauksen epävarmuus	73
8	YHTEENVETO	76
	LÄHTEET.....	78
	LIITTEET	81
	Liite 1. Mittauslevyltä sekundäärituulisuojan kanssa tehdyn mittauksen erillisten pysäytysten kuvaajat, kun tuulen aiheuttamat häiriöäänät on poistettu.....	81
	Liite 2. Mittauslevyltä ilman sekundäärituulisuojaa tehdyn mittauksen kuvaajat, kun tuulen aiheuttamia häiriöääniä ei ole poistettu.....	83
	Liite 3. Mittauslevyltä ilman sekundäärituulisuojaa tehdyn mittauksen kuvaajat, kun tuulen aiheuttamat häiriöäänät on poistettu	84
	Liite 4. Jalustalta tehdyn mittauksen kuvaajat, kun tuulen häiriöääniä ei ole poistettu.....	85

Liite 5. Jalustalta tehdyn mittauksen kuvaajat, kun tuulen häiriöäänet on poistettu.....	86
--	----

LYHENTEET JA TERMIT

Aikapainotus	Slow (S)-, Fast (F)- tai Impulse (I) –aikapainotus
Amplitudimodulaatio	Äänenvoimakkuuden ajallisia jaksollisia vaihteluita melulle altistuvalla alueella
Dodekaedri	12-tahokas monikulmio
IEA	Kansainvälinen energiajärjestö, (International Energy Agency)
IEC	Kansainvälinen sähköalan standardointiorganisaatio, (International Electrotechnical Commission)
Impulssi	Lyhytkestoinen ääni
Kapeakaistaisuus/ tonaalisuus	Yhden tai useamman ääneksen äänenpainetason ja peittoäänien tason erotus kriittisellä kaistalla ääneksen (ääneksien) ympärillä
L_{Aeq}	A-taajuuspainotettu ekvivalentti äänitaso, dB
$L_{Aeq, 7-22}$	A-taajuuspainotettu päiväajan ekvivalenttitaso, dB
$L_{Aeq, 22-7}$	A-taajuuspainotettu yöajan ekvivalenttitaso, dB
$L_{Aeq, corr.}$	A-taajuuspainotettu taustamelukorjattu äänitaso, dB
$L_{Aeq, free}$	A-taajuuspainotettu mitattu kokonaistaso, dB
L_n	Keskimääräinen taustamelutaso kullakin tuulen nopeusalueella, dB
$L_{AF, max}$	Aikavakiolla ”Fast” mitattu A-taajuuspainotettu enimmäisäänitaso
$L_{AI, max}$	Aikavakiolla ”Impulse” mitattu A-taajuuspainotettu enimmäisäänitaso
$L_{AS, max}$	Aikavakiolla ”Slow” mitattu A-taajuuspainotettu enimmäisäänitaso
L_p	Äänenpainetaso, dB
L_{pA}	Äänitaso/ melutaso (meluimmissio), dB
m/s	Nopeuden yksikkö, metriä sekunnissa
Meluemissio	Melupäästö
Meluimmissio	Altistuvaan kohteeseen melupäästöstä kohdistuva melu

Mittausjakso	Tuulivoimamelulle altistuvan kohteen mittausdata, jota käytetään tulosten käsittelyssä
p	Äänenpaine, Pa
p_A	A-painotettu äänenpaine, Pa
Pa	Paineen yksikkö, pascal
Signaali-kohinasuhde	Halutun signaalin (esimerkiksi tuulivoimalan äänen) erottuvuus taustakohinasta
TAMK	Tampereen ammattikorkeakoulu
Taustamelu	Melun mittauspaikalla vallitseva melu, kun tarkasteltava melulähde ei tuota melua. Esimerkiksi tuulivoimalan pysäytyshetkellä mittauspaikalla vallitsevat muut äänet
VTT	Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy
Äänes	Yksittäisestä taajuudesta syntynyt ääni

1 EXTENDED ABSTRACT

1.1 Introduction

1.1.1 Immission measurement methods of wind power noise

There are two methods to find out what are the sound levels caused by wind turbines: computer modelling and measuring. The noise immission measurements are done near the residential building which is, or might be, exposed to the wind power noise. The residential building can be used for constant living or vacations.

According to the Finnish Ministry of the Environment there are two basic ways to use sound level meter in the immission measurements: the microphone can be placed at a 1.5-meter height with a stand or the microphone can be placed on a wooden measuring board. The measuring board can be placed on a ground or vertically on a wall or stand. The measuring board can also be equipped with a secondary windscreen to add protection for the microphone against wind gusts. (Ympäristöministeriö 2014a, 12–13, 17.)

1.1.2 Wind noise in microphones

When measuring environmental noise, the wind speed limit usually is 5 m/s at 2-meter height (ympäristöministeriö 1995, 18). Wind turbine noise measurements are an exception in this, since it is needed that wind turbines operate in full power, or at least close to it. The wind speed needed for that varies with the turbine model and type, but usually the wind speeds need to be closer to 10 m/s.

Sound level meter microphones are usually equipped only with a primary windscreen, which is a sphere made from foam plastic or some similar material. Usually primary windscreen's diameter is 5–10 cm and delivered by the sound level meter manufacturer. Primary windscreen of this size is enough to protect the microphone from wind in most of the noise measurement situations. In wind power noise measurements primary windscreen is not often enough and wind can go through it and cause disturbance to the sound

levels and audio recordings. In some measurement cases the immission measurement point might be in a location that is covered from the higher wind speeds by a forest or a land formation, but usually the wind speeds are high also at the measurement point. To protect the microphone from these high wind speeds, it is possible to use a secondary windscreen with a primary windscreen to add protection against the wind.

Wind noise affects sound level meter microphone's logged data in two ways: in sound levels and audio recording of the measurement. In the analysis process it is important to have these disturbances as few as possible, since their removal is difficult or in some cases basically impossible. This is because the wind noise can be under the auditory threshold. In these cases, the wind noise is affecting the sound level, but can't be heard in the audio recording.

1.1.3 Purpose and aim of this thesis

The purpose of this thesis was to research how a secondary windscreen could improve WSP Finland Ltd.'s wind power noise measurement methods. Part of this thesis was also to build the secondary windscreen that was used in the measurements. The focus was in the question, how the use of the secondary windscreen affects the measured sound levels and the audio recordings of the measurement compared to the measurements without the secondary windscreen. The aim was also to find out if the secondary windscreen has any affects to the reliability of the measurement results or does the use of the secondary windscreen make the analysis process any easier or faster.

1.2 Materials and methods

The topic of this thesis was commissioned by the consultancy company WSP Finland Ltd. The instructors for this thesis were Business Unit Manager Ilkka Niskanen from WSP Finland Ltd. and Senior Lecturer in Physics Mr. Erkki Mäkinen from Tampere University of Applied Sciences. The thesis project started in August 2017.

The theory and literature research was made by utilizing TAMK's library and e-library resources, online articles, standards, noise guides by the Finnish Ministry of the Environment and literature owned by the WSP Finland Ltd. The availability of basic materials for the theory research varied. Materials and literature in relation to sound physics were widely available in multiple sources, but materials containing knowledge of the secondary windscreen were more difficult to find. Especially from Finnish literature it was difficult to find previous reports or examples concerning secondary windscreens. The theoretical research was conducted to create a basic understanding of wind turbine noise and measuring methods of it. Theory's purpose is also to familiarize the reader with the wind turbine noise terminology, standards, guidelines and legislation, and to offer a base of knowledge for the reader to understand the wind turbine noise measurement analysis.

1.2.1 Secondary windscreen

The secondary windscreen was made according to the IEC 61400-11 3.0 standard (2012). The secondary windscreen is composed of a metal frame and a 4-mm thick foam plastic cover that blocks the wind but lets the sound waves through it. When something is placed between the noise source and the microphone, it is obvious that the sound levels are also affected. This influence of the windscreen was determined for each 1/3-octave band according to the IEC -standard (2012). When the secondary windscreen is used, its absorbing effect must always be overridden to the measurement results.

1.2.2 Immission measurement

Immission measurement was about 750 meters away from the wind power plant, on the yard of a summer cottage. Three different measuring methods were used to measure the noise: first microphone on a stand with the primary windscreen, second microphone on a wooden measuring board with primary windscreen and third microphone on a wooden measuring board with primary and secondary windscreens.

The noise immission measurement guide by the Finnish Ministry of the Environment gives three optional proceedings to measure wind power noise and in this thesis, the procedure C is used (ympäristöministeriö 2014a, 16). In the procedure C, the wind turbines

are shut down during the measurements to measure the background noise levels. In this thesis three 45-minute shutdowns were made during the whole measurement. The basic idea of the data processing is to extract from total sound levels (wind turbine noise + background noise) the background noise levels and thus to define what is the sound level produced by the turbine. The measurement data analysis is done for all the three measurements and for each of these measurements it is done twice: before removing the wind disturbance noise in the microphone signals and after the removal. This gives some information on how the disturbance noises might affect the result.

All the measurements were done with one second resolution, and from this data, the one-minute equivalent A-weighted sound levels ($L_{Aeq,1min}$) were made. $L_{Aeq,1min}$ background noise levels are shown as a function of the wind speed at the measurement site. Wind speed was measured at the 10-meter height with a weather mast. A linear regression is made for that graph, and the formula of the linear regression is used as the function of the background noise level. The background noise level is presented as a function of the wind speed at the measurement site. This function is used to define the background noise levels for the moments when the turbine was on. Background noise level is defined for each 1-minute total sound level, since the 1-minute wind speed on the measurement site is known for each minute. After this, the extraction is made and background noise corrected sound levels are what remains as a result. It is possible for some of the 1-minute points that background noise levels are higher than the total sound levels. These 1-minute points are left out from the rest of the data processing. The residual 1-minute background noise corrected sound levels are shown as a function of the wind speed in the wind turbine at 10-meter height (the wind turbine wind speed is altered to 10-meter height with a specific formula that uses wind turbine height and the roughness of the ground). A linear regression is made for this graph and the formula of the linear regression is used to define the background noise corrected total sound levels caused by the wind turbine at wanted wind speed. The 8 m/s wind speed is the aim value for the wind speed and the result with the 8-meter wind speed is the value that is compared to the limit values set by the Finnish Council of State (valtioneuvosto 1107/2015, 3 §).

1.3 Results and conclusions

Background corrected A-weighted sound pressure levels are presented in the tables i-iii. Each table shows the result for the data from where the wind noise in microphone is not removed and for the data from where the wind noise in microphones is removed. The result at the 8 m/s wind speed is the one that is compared to the guideline limit values (40 dB is the night time equivalent limit value). Also, the results at wind speeds of 6–7 m/s and 9–11 m/s are reported. With the secondary windscreen the result is 35 dB and doesn't change when the wind noise is removed (table i). With the measuring board without the secondary windscreen (table ii), the results are 43 dB (wind noise not removed) and 35 dB (wind noise removed). The differences between these results are significant, since the 43 dB is clearly above the guideline limit 40 dB, but the 35 dB is clearly under it and it is also the same results that was received with the secondary windscreen measurement. It can be concluded that the wind noise removal was successful and that the wind noise can have a critical impact to the result. With the measuring stand (table iii) the results are 39 dB with and without the wind noise removal. It can be concluded that the wind noise removal was probably at least partly unsuccessful because the measurement data probably included low frequency wind noise that was not deleted in the wind noise removal. If the stand or the measuring board without the secondary windscreen would have been the only measuring method in the immission measurement, measurements would have probably failed because of the uncertainty of the wind noise's effect to the results. Thus, it can be said that in this immission measurement the secondary windscreen functioned well in the measurement and the result received with it was more reliable than with the other measuring methods.

TABLE i. Background noise corrected A-weighted sound levels caused by the wind turbine for different wind speed. Measurement with the measuring board and the secondary windscreen.

Wind speed (m/s)					
6	7	8	9	10	11
Wind noise in microphone not removed					
26 dB	30 dB	35 dB	39 dB	43 dB	47 dB
Wind noise in microphone removed					
27 dB	31 dB	35 dB	39 dB	43 dB	47 dB

TABLE ii. Background noise corrected A-weighted sound levels caused by the wind turbine for different wind speed. Measurement with the measuring board.

Wind speed (m/s)					
6	7	8	9	10	11
Wind noise in microphone not removed					
41 dB	42 dB	43 dB	44 dB	45 dB	46 dB
Wind noise in microphone removed					
28 dB	32 dB	35 dB	39 dB	42 dB	46 dB

TABLE iii. Background noise corrected A-weighted sound levels caused by the wind turbine for different wind speed. Measurement with the measuring stand at 1,5-meter height.

Wind speed (m/s)					
6	7	8	9	10	11
Wind noise in microphone not removed					
32 dB	35 dB	39 dB	43 dB	46 dB	50 dB
Wind noise in microphone removed					
33 dB	36 dB	39 dB	42 dB	45 dB	48 dB

The secondary windscreen also had a significant impact on the impulsivity analysis. With the secondary windscreen, the impulsivity sanction was 0 dB and there were only a few impulses that would cause a sanction, but those impulses were all identified from the audio as something else than the wind turbine noise. Because the measurement with the secondary windscreen made sure that the impulsivity sanction is 0 dB, the analysis with the other two audio files was simpler: if there were any impulses that would cause a sanction, they were automatically caused by something else than the wind turbine. The impulsivity results of the measuring board without the secondary windscreen and the stand are listed in the table iv. The listed numbers are the amount of impulses that would have to be ignored to have a 0-dB sanction. In other words, that amount of impulses would had to be identified if the stand or the measuring board without the secondary windscreen had been the only used measuring method. As an amount of work, the difference is critical: without the secondary windscreen the analysis would take multiple hours and could risk the whole project budget.

TABLE iv. Number of impulses that should be identified and removed to ensure the 0-dB sanction. Measurements with the stand and the board without the secondary windscreen.

Time	Number of impulses that would cause a dB sanction and that had to be thus identified to be sure that they were not caused by the wind turbine	
	Measuring board without the secondary windscreen	Measuring stand at 1,5-meter height
23:07-23:37	171	192
0:44-1:00 ja 1:05-1:15	343	317
1:15-1:45	170	159
2:29-2:59	169	183
2:59-3:29	178	180
3:29-3:58	146	162
4:44-5:14	236	219

It can be concluded that the secondary windscreen performed in the immission measurement very well. It didn't make any excess sounds and blocked the wind noise from the microphone with a good performance: only a few gusts were able to pierce it and cause noise in the microphone. A further study could be to research how weatherproof the windscreen is during a winter (freeze and snow).

2 JOHDANTO

Tuulivoima lienee yksi kiistellyimmistä energian tuotantomuodoista Suomessa. Kiistelyn syyt ovat moninaiset. Ensinnäkin keskustellaan tuulivoiman tuottaman energian todellisista kustannuksista ja päästöistä sekä sen ”puhtaudesta” verrattuna muihin energiantuotantomuotoihin. Toiseksi keskustelua on Suomessa lisännyt Euroopassakin yleiset syöttötariffit, joilla tuulivoiman rakentamista ja siihen sijoittamista on haluttu edistää. Tariffien seurauksena Suomeen on saatu myös ulkomaalaisella rahalla rakennettua tuulivoimaa, jota onkin epäilty hätiköinnistä ja ahneudesta (Saarinen 2013, 44–45). Toimiakseen tuulivoimala tarvitsee ennen kaikkea sijainnin, jossa tuulee. Tämän lisäksi voimala tarvitsee rakentamisen ja huoltamisen aikaisen tieinfrastruktuurin ja lisäksi voimala pitää yhdistää sähkön runkoverkkoon. Näistä vaatimuksista johtuen on selvää, että tuulivoimaa rakennuttavat tahot ovat halunneet toteuttaa uudet voimalahankkeet mahdollisimman lähellä jo olemassa olevia tie- ja sähköverkoja. Tästä on seurannut, että voimaloita on rakennettu myös asuinrakennusten lähialueille, jolloin ihmiset saattavat altistua muun muassa tuulivoimaloiden aiheuttamalle melulle.

Tuulivoiman ympärillä käytävä keskustelu on siirtynyt käsittelemään myös tuulivoimamelun mittaamista. Suomessa tuulivoimamelua mittaa vain muutama konsulttiyritys, jotka tekevät meluselvityksiä pääsääntöisesti tuulivoimayhtiöiden toimeksiannosta. Konsulttiyritysten lisäksi ainakin korkeakoulut ja valtion tahot (kuten työ- ja elinkeinoministeriö ja ympäristöministeriö) saattavat tehdä tai teettää tuulivoimamelun mittaamiseen liittyviä tutkimuksia ja selvityksiä. Tuulivoimamelun mittaamisen kehittämisessä käytetään lisäksi apuna ulkomaalaisia selvityksiä, sillä tuulivoimalla ja tuulivoimamelun mittaamisella on ulkomailla Suomea pidemmät perinteet.

Tuulivoimamelun mittaaminen on osaamista vaativaa ja mittaaja voi mittaustilanteessa tai tulosten käsittelyssä helposti tehdä virheitä, jotka johtavat virheelliseen lopputulokseen. Mittauksia kritisoidessa saatetaan myös kyseenalaistaa mittaukset suorittaneen tahon pätevyys ja osaaminen. Useimmiten tähän päädytään tilanteessa, jossa yksittäiselle voimalalle tai tuulivoimapuistolle tehdään useita selvityksiä ja niiden tulokset poikkeavat selvästi toisistaan. Mittausten dokumentaatioista voi olla mahdollista selvittää eroavuuksien syy, mutta jos syy jää selviämättä, lankeaa epävarmuus kaikkien tehtyjen selvitysten päälle.

Tuulivoimamelun mittaamisen mahdollisesti suurin ongelma liittyy melun mittaamisen tuuliolosuhteisiin. Teoriassa tuulivoimalan tuottama melu on sitä suurempi, mitä kovempaa tuulee ja mitä suurempi on voimalan tehontuotto. Jokaiselle voimalalle on olemassa tuulen nopeus, jonka ylittämisen jälkeen voimalan aiheuttama melutaso ei enää kasva: voimala käy täydellä teholla ja lisätuulesta ei enää saada hyötyä. Tuulivoimamittausten aikana vallitsevalla taustamelulla ei kuitenkaan ole vastaavaa rajaa vaan esimerkiksi 15 m/s tuuli tuottaa todennäköisesti aina enemmän taustamelua kuin 10 m/s puhaltava tuuli. Tästä syystä mittauksissa tuulennopeuden tavoitearvona käytetään 10 metrin korkeudella vallitsevaa 8 m/s nopeutta, mikäli muita tuulennopeuksia ei ole mittauksissa perustellusti edellytetty (esimerkiksi ympäristölupapäätöksen myötä) ja arvio äänenpainetasosta voidaan luotettavasti antaa 8 m/s nopeutta vastaavalla tavoitearvolla (ympäristöministeriö 2014a, 5).

Ympäristömelumittaukset pyritään yleensä suorittamaan alle 5 m/s (2 metrin korkeudella mitattuna) tuulennopeuksilla (ympäristöministeriö 1995, 18), joten tuulivoimamelumittaus on ympäristömelumittausten saralla poikkeustapaus. Ympäristömelumittaritkin on pääsääntöisesti suunniteltu mittaamaan melua joko kokonaan ilman tuulisuojaa (esimerkiksi sisätiloissa) tai yksinkertaisen ja pienen primäärituulisuojan kanssa. Yli 5 m/s puhaltava tuuli aiheuttaa mikrofoniin herkästi häiriöääntä aiheuttamalla mikrofoniin kalvoon eri suuruisia painevaihteluita. Lisäksi häiriöääntä saattaa aiheutua äänitasomittarin tallentamaan äänisignaaliin. Tämän ongelman ratkomiseksi äänitasomittareiden laitevalmistajat ovat kehittäneet niin sanotun sekundäärituulisuojan, joka voidaan asettaa mikrofoniin ja primäärin tuulisuojan päälle. Sekundäärituulisuojan valmistaja ilmoittaa suojan aiheuttaman vaimennuksen melutasoihin taajuuskaistoittain, minkä avulla mittaustuloksiin voidaan tehdä suojan aiheuttaman muutoksen kumoava korjaus. Sekundäärituulisuojia koskeva aikaisempi tutkimus käsittelee muun muassa signaali-kohinasuhteen paranevista ja tuulen aiheuttamien häiriöäänien vähenemisestä. Tarkkaa tietoa on kuitenkin mitausten monista muuttujista johtuen vaikea antaa, sillä sekundäärituulisuojan vaikutus tuloksiin ei ole vakio mittauksesta toiseen: signaali-kohinasuhde ei välttämättä parane ja tuulen nopeudet saattavat olla sellaisia, että tuulen aiheuttamat häiriöäänit mikrofoniin eivät välttämättä merkittävästi vähene, jos niiden lukumäärä on alun perinkin matala. Tästä huolimatta opinnäytetyössä käytettävien lähteiden selvitystyössä en onnistunut löytämään yhtäkään todellisessa altistuvan kohteen mittaustilanteessa toteutettua vertailua eri mittaustekniikoiden välillä. Ulkomailla vertailuja eri mittaustekniikoiden välillä on

suoritettu, esimerkiksi Australiassa on tehty selvitys, jossa vertailtiin neljän eri mittaus- tekniikan välillä saatuja tuloksia (Novak, Sjöström, Ule, Bard & Sandberg 2014). Ky- seissä tutkimuksessa ei kuitenkaan ole käsitelty kaikkia tuulivoimamelun mittaamiseen altistuvassa kohteessa liittyviä seikkoja, kuten esimerkiksi melun impulssimaisuutta tai kapeakaistaisuutta. Lisäksi kyseinen tutkimus tai muutkaan löydetyt tutkimukset eivät ota kantaa siihen, mikä merkitys erilaisella mittaustekniikalla on esimerkiksi mittaustulosten käsittelyn työmäärän ajalliseen keston ja hankaluuteen. Tätä ei tietenkään absoluuttisesti voidakaan esittää, sillä moni seikka riippuu selvityksen tekijästä ja työtaoista. Suhteel- lisesti asiaa voidaan kuitenkin tutkia, sillä esimerkiksi äänitallenteesta impulsseja kuun- neltaessa ja tuulivoiman aiheuttamia impulsseja etsittäessä, on hyvin olennaista, onko häiriöäänien aiheuttamia impulsseja mittaustuloksissa 10 vaiko kenties 1000.

Tässä työssä on keskitytty mittaustulosten laadulliseen vertailuun eri mittausmenetelmien välillä sekä siihen, voiko sekundäärituulisuojalla olla mittaustulosten käsittelyyn työtä vähen- tävä vaikutus, mikä tekisi sekundäärituulisuojan investoimisen kannattavammaksi. Se- kundäärituulisuojien hinnat vaihtelevat valmistajasta riippuen, mutta tämän työn resurs- sien rajoissa sellaista ei ollut mahdollista hankkia. Tästä syystä sekundäärituulisuoja pää- dyttiin valmistamaan itse. Suoja on valmistettu ja suojan ääntä vaimentavat ominaisuudet on määritetty kansainvälisen IEC 61400-11 3.0 (2012) tuulivoimastandardin mukaisesti.

Opinnäytetyö tehdään WSP Finland Oy:n tuulivoimamelumittausten mittaustekniikan pa- rantamiseksi. Mittaukset on suoritettu varsinaiselle tuulivoimalalle, mutta tulosten käsit- telyssä pääpaino on eri mittaustekniikoiden vertailussa, ei niinkään tuulivoimalan aiheut- tamien melutasojen ja ohjearvojen vertailussa. Ohjearvoihin on kiinnitetty huomiota ai- noastaan, jos eri mittaustekniikoilla saadut tulokset eroavat toisistaan niin paljon, että oh- jearvojen ylittyminen tai alittuminen on kiinni mittaustekniikasta.

Opinnäytetyön tavoitteena on selvittää tuulivoimamelulle altistuvan kohteen melumit- tauksen eri mittaustekniikoita ja niiden vaikutusta lopputulokseen sekä tulosten käsittelyn tehokkuuteen. Myös eri mittaustekniikoiden kenttäkelpoisuutta tarkastellaan osana koko- naisuutta. Tavoitteena on myös rakentaa itse sekundäärituulisuoja ja määrittää sille stan- dardin mukaisesti absorptio-ominaisuudet, jotta suojan kanssa tehdyt mittaukset ovat ym- päristöministeriön mittaushjeiden vaatimukset täyttävät.

3 AKUSTIIKAN PERUSTEET

3.1 Ääni

Ääni on ilmassa tai muussa väliaineessa esiintyvää paineenvaihtelua. Ihmisen kuulemisen kannalta paine on helpoin ääntä kuvaava suure, sillä korva reagoi paineen muutoksiin. Maan ilmakehässä vallitsee aina kokonaispaine, joka sekin itsessään on muuttuva. Ääneksi kutsutaan sitä osaa kokonaispaineesta, joka vaihtelee vallitsevan ilmanpaineen suhteen. Tätä vaihtelua nimitetään äänipaineeksi. (Lahti 2003, 9.)

Yleisesti kuultavien äänien vaihtelu on erittäin pientä vallitsevaan ilmakehän ilmanpaineeseen verrattuna. Ilmakehän paine on yleensä noin 100 kPa, kun taas ihmisen kuulokynnyksen alaraja, eli heikoin kuultavissa oleva ääni, on noin 20 μ Pa. Meluisa katuliikennekin (noin 100 mPa) on vain yksi miljoonaosa kokonaisilmanpaineesta. (Lahti 2003, 9.)

3.2 Äänenpaine p [Pa]

Äänenpaine p [Pa] on ääneen liittyvä hetkellisen paineen ja staattisen ilmanpaineen ero, joka esitetään yleensä tehollisarvona, joka on eräänlainen keskiarvo tietyn aikavälin hetkellisistä äänenpaineista. Hetkellinen äänenpaine vaihtelee jatkuvasti. (Lyytimäki, Hakala & Välimäki 2008, 212; ympäristöministeriö 2014a, 9.)

3.3 Äänenpainetaso L_p [dB]

Akustiikassa äänen voimakkuutta kuvataan yleensä termillä taso, jolla tarkoitetaan yleensä logaritmista mittaa. Logaritmista asteikkoa käytetään, koska ihmiskorva ja kuulolaisti toimivat logaritmisesti. Tämän lisäksi logaritmisella asteikolla lukuarvoja on yksinkertaisempi käsitellä. Esiintyvien äänenvoimakkuuksien valtava vaihteluväli (noin 1: 100 000 000) saadaan helpommin ymmärrettäväksi logaritmisella asteikolla (0 dB ... 160 dB). Aikaisemmin mainitun äänenpaineen sijasta käytetään logaritmisella asteikolla termiä äänipainetaso (tai äänitaso), jonka perusmääritelmä on

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

jossa p_0 on vertailupaine 20 μPa . Äänipainetaso yksikkö on desibeli, lyhennettynä dB. (Lahti 2003, 11.)

Heikoimman kuultavan äänen taso on noin 0 dB (äänenpaine 20 μPa) ja voimakkaimman ilman kipua kuultavan äänen taso on noin 120 dB (Lahti 2003, 11). Taulukossa 1 on esitetty yleisiä arjen äänenpainetasoja. Tuulivoimamelun mittaamisessa yleinen puiden havina tuulessa sijoittuu yleensä 20–40 dB:n välimaastoon.

TAULUKKO 1. Elämän ääniä desibeleinä (Starck, Teräsvirta & Työterveyslaitos 2009, 14)

Äänitaso, dB	Esimerkki
0	kuulokynnys
5-25	pensaiden lehtien havina
25-50	tietokone, tuuletin
50-70	äänekäs puhuminen
70-85	liikenne, ruohonleikkuri
85-90	moottoripyörä, sirkkeli
90-110	disko, painoilmatyökalut
110-130	kipukynnys, ilotulitus

Kun melumittauksissa mitataan äänitasoja ja ”melutasoja”, mitataan todellisuudessa äänenpainetasoja. Äänenpainetaso saadaan, kun äänenpaine muutetaan logaritmiselle dB-asteikolle (kaava 1). Äänenpainetasoista käytetään yleensä, ja tässä työssä, nimitystä melutaso, joka kuvaa selkeämmin sitä, mistä tasoista puhutaan. Termi ”melutaso” ei itsessään ole tarkka ilmaisu, sillä kuten aiemmin todettiin, melu on subjektiivinen käsite. Melumittauksissa ja laskennoissa se kuitenkin helpottaa erottelemaan, mistä äänenpainetasosta milloinkin puhutaan, koska melutasolla tarkoitetaan poikkeuksetta nimenomaan tarkastellun äänilähteen (tai lähteiden) aiheuttamaa äänenpainetasoa.

Koska desibeliasteikko on logaritminen, sen arvoja ei voi suoraan yhdistää lineaarisesti (Talbot-Smith 2000, 26). Esimerkiksi, jos kaksi äänilähdettä tuottavat molemmat 60 dB:n äänitason tarkasteltavaan kohteeseen, niiden aiheuttama kokonaisäänitasoa ei voida

laskea yhteen $60 \text{ dB} + 60 \text{ dB} = 120 \text{ dB}$. Sama pätee tuulivoimamelun taustamelukorjaamiseen, jossa kokonaisäänitasosta vähennetään taustäänitaso erotuslaskulla. Desibelien yhteen laskemiseen on oma kaavansa

$$10 * \log_{10} \left(\frac{P_T}{P_{ref}} \right)^2 = 10 * \log_{10} \sum_{i=1}^n \left(\frac{P_i}{P_{ref}} \right)^2, \quad (2)$$

jossa P_T on äänenpaineet yhteensä ja P_{ref} on vertailupaine $20 \mu\text{Pa}$. Kun kaavan (2) jälkimmäiseen osaan sijoitetaan kaavasta (1) johdettu kaava

$$p = p_0 * 10^{\frac{L_p}{20}}, \quad (3)$$

saadaan yhdistelmänä kaava

$$10 * \log_{10} \left(\frac{P_T}{P_{ref}} \right)^2 = 10 * \log_{10} \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_{Pi}}{10}}, \quad (4)$$

jossa L_{Pi} on äänitaso. Tämä kaava (4) voidaan tuulivoimamelun taustamelukorjauksen laskentaa varten kirjoittaa muotoon

$$L_{corr.} = 10 * \log_{10} \left(10^{\frac{L_{Aeq,free}}{10}} - 10^{\frac{L_n}{10}} \right), \quad (5)$$

jossa $L_{corr.}$ on tuulivoimalan aiheuttama taustamelukorjattu melutaso, $L_{Aeq, free}$ on A-painotettu kokonaismelutaso ja L_n on tuulivoimalan pysäytysten aikana vallitseva taustamelutaso.

3.4 Keskiäänitaso eli ekvivalenttitaso

Äänitasomittarin ilmoittama ympäristömelun kokonaismelutaso on harvoin vakio, sillä äänen aiheuttaa yleensä usea eri äänilähde, joiden aiheuttamiin tasoihin vaikuttaa muun

muassa myös ympäristön olosuhteet. Lisäksi äänen syntyminen saattaa vaihdella ajalliselta kestoaltaan tai voimakkuudeltaan. Äänen tasojen vaihtelun vuoksi onkin tarvetta yksinkertaiselle ja helposti ilmaistavalle termille. Tähän tarkoitukseen sopivin on keskiäänitaso eli ekvivalenttitaso. Keskiäänitaso kuvaa keskimääräistä melutasoa (Lyytimäki ym. 2008, 212). Keskiäänitason yhteydessä ilmaistaan yleensä mistä ajanjaksosta on kyse: esimerkiksi päiväaikainen keskiäänitaso ilmaistaan yleensä termillä $L_{Aeq, 7-22}$, joka ilmaisee, että kyseessä on A-painotettu keskiäänitaso aamuseitsemän ja iltakymmenen väliltä. Keskiäänitasa käytetään yleisesti kuvaamaan ympäristömelun voimakkuutta, sillä yksittäistä lukuarvoa on helppo verrata mahdollisesti asetettuun keskiäänitason ohjearvotsoon. Keskiäänitason periaate on, että mittausjakson aikana äänitaso saattaa hetkellisesti nousta ylitse keskiäänitason ohjearvon, mutta jos vastapainoksi äänitaso laskee myös alle keskiäänitason ohjearvon mittausjakson aikana, lopputuloksen kannalta olennaisinta on juuri keskiäänitaso.

3.5 Melu

Terveyden ja hyvinvoinnin laitoksen THL:n (2017) määritelmän mukaan ”melu on ei-toivottua ääntä, joka on epämiellyttävää, häiritsevää, odottamatonta tai kuulolle haitallista”. Melusta aiheutuvan haitan suuruuteen vaikuttaa äänen fysikaaliset ominaisuudet kuten voimakkuus, taajuus, kapeakaistaisuus, impulssimaisuus. Lisäksi vaikuttavia tekijöitä ovat melulle altistumisen aika ja paikka sekä altistujan yksilölliset ominaisuudet kuten meluherkkyys ja asenne äänilähdettä kohtaan. (Terveyden ja hyvinvoinnin laitos 2017.)

Tuulivoimamelun kohdalla melun fysikaalisiin ominaisuuksiin on hyvä lisätä melun mahdollinen amplitudimoduloituminen (melun jaksollisuus), joka voi omalta osaltaan lisätä melun häiritsevyyttä. Altistumisen aika on melun kohdalla oleellinen, sillä etenkin yöaikaan tapahtuva melu todennäköisemmin häiritsee terveydelle oleellista unta. Tämä on lähtökohtaisesti suurin syy siihen, että melun yöajan ohjearvo on yleensä päiväaikaista ohjearvoa pienempi. Melun ajankohdan lisäksi oleellista on melun ajallinen kesto. Päivittäin aina samaan aikaan tapahtuva louhoksen räjäytys hyväksytään mahdollisesti helpommin kuin ympäri vuorokauden melua tuottava tehtaan poistopuhallin tai läheinen rakennustyömaa satunnaisine äänineen.

Erilaisille melutasoille on määritelty turvallisuusaikarajoja (taulukko 2), joiden ylittäminen saattaa johtaa kuuloaistin vaurioitumiseen. Tuulivoimamelun tapauksessa taulukko ei ole niin oleellinen, sillä tuulivoiman aiheuttama melu on pääsääntöisesti huomattavasti vähäisempää ja ei aiheuta terveystarpeita kuuloelimille.

TAULUKKO 2. Turvallisuusaikarajat eri melutasoille (Starck, Teräsvirta ja Työterveyslaitos 2009, 12)

Jatkuva A-äänitaso (dB)	Melussaoloaika
85	8 tuntia
88	4 tuntia
91	2 tuntia
94	1 tunti
97	30 minuuttia
100	15 minuuttia
103	8 minuuttia
106	4 minuuttia
109	2 minuuttia
112	1 minuutti
115	ei lainkaan!

Melun aiheuttamat haitat voivat olla moniulotteisia ja aina oireita ei välttämättä yhdistetä juuri meluun. Käänteisenä tästä syntyy se, että melua saatetaan syyttää myös oireista, jotka johtuvat jostain muusta tekijästä. Terveiden ja hyvinvoinnin laitoksen mukaan melun tutkituimpia haittoja ovat kiusallisuus (ei-toivottu, kielteinen tai asuinympäristön laatua heikentävä melu) ja häiritsevyys (keskittymistä häiritsevä melu). Lisäksi melu saattaa aiheuttaa elimistöön stressireaktion, joka saattaa ilmentyä muun muassa verenpaineen, sykkeen ja stressihormonipitoisuuksien kohoamisena. Pitkittyneenä stressi saattaa muun muassa vaikuttaa rasva-aineenvaihduntaan ja heikentää kehon immuunijärjestelmää. Melu saattaa lisäksi häiritä unta ja nukahtamista, mikä saattaa tapahtua ihmisen tiedostaen tai tiedostamatta. (Terveiden ja hyvinvoinnin laitos 2017.)

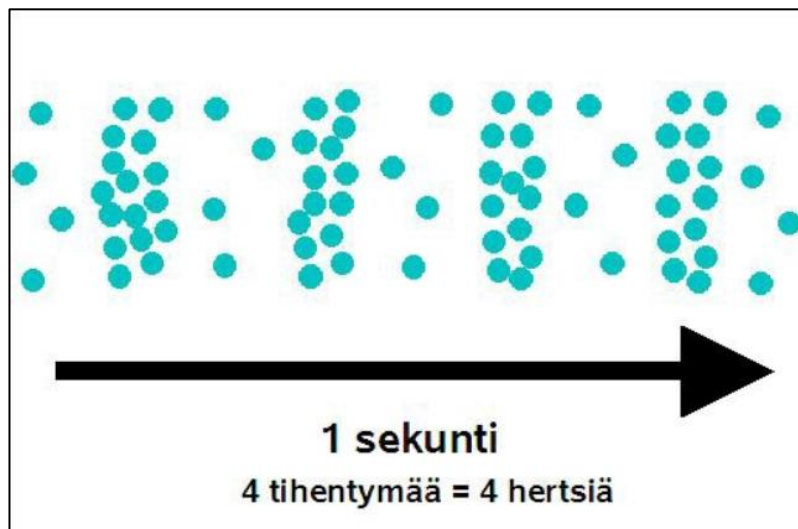
3.6 Äänen Taajuus ja spektri

Taajuus ilmaisee, kuinka monta täyttä edestakaista heilahdusta värähtelyliikkeessä tapahtuu aikayksikössä. Taajuus saadaan yhteen heilahdukseen kuluneesta ajasta kaavalla

$$f = \frac{1}{T}, \quad (6)$$

jossa f on taajuus ja T yhteen heilahdukseen kulunut aika. Taajuuden yksikkönä käytetään hertsiä (Hz). (Borenus, Jauhiainen, Lampio, Nuotio, Pesonen & Pyykkö 1981, 12.)

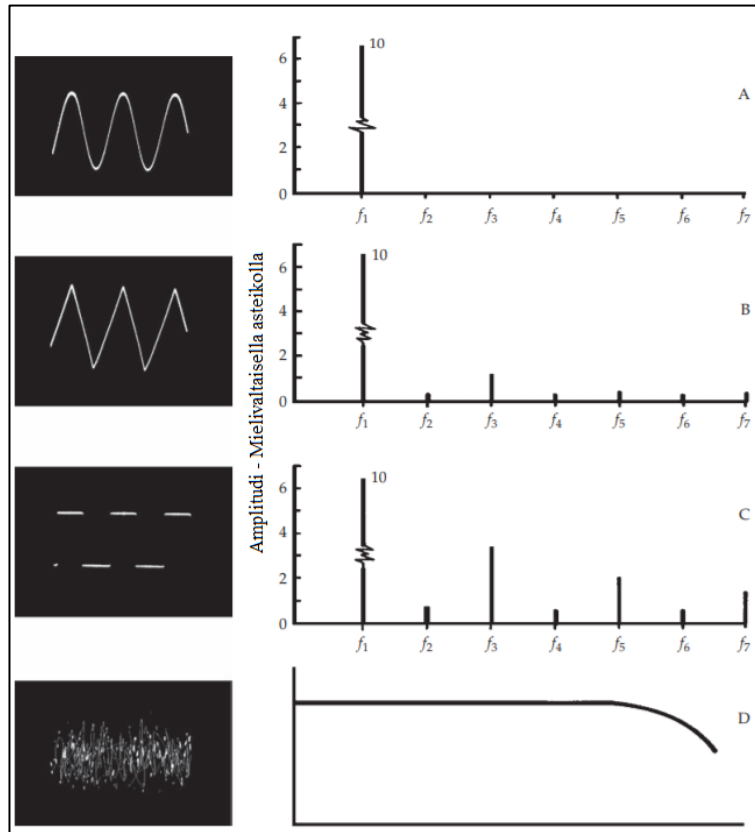
Ilmassa ääni etenee molekyylien tihentyminä ja harventumina. Näiden tihentymien tai harventumien lukumäärä sekunnissa on äänen taajuus (kuva 1) (Äänipää 2005).



KUVA 1. Äänen taajuus voidaan laskea molekyylien tihentymien lukumäärästä (Äänipää 2005)

Äänen taajuudesta puhuttaessa olennaista on myös äänen spektri. Spektri ilmaisee, miten äänen energia tai paine on jakautunut eri taajuuksille (Borenus ym. 1981, 23). Spektrin kohdalla voidaan siis puhua äänen taajuusjakaumasta. Yleisesti hyväksyttynä ihmisen kuuloalueen spektrinä pidetään taajuusaluetta 20 Hz – 20 kHz, jonka alapuolella olevia taajuuksia kutsutaan infraääniksi ja yläpuolella olevia taajuuksia ultraääniksi (Äänipää 2005). Kuvassa 2 on esitetty muutamana esimerkkinä erilaisia ääniaaltojen versioita, jotka edustavat rajatonta määrää erilaisia äänestä löytyviä aaltomuotoja (kuvassa vasemmalla). Lisäksi on esitetty näiden ääniaaltojen taajuusjakauma eli spektri (kuvassa oike-

alla). Kuvat on otettu oskilloskoopin näytöltä ja taajuusjakaumien pylväissä näkyvät taajuuspoikkeamat johtuvat värähtelyn tuottajan epätarkkuudesta. Kuvan esimerkissä analyysi on tehty laitteella, joka tunnistaa taajuudet 5 Hz tarkkuudella, joka riittää tunnistamaan A-C –kohtien signaalien jaksollisuudet, mutta ei D-kohdan sattumanvaraisen signaalin spektriä, joka on jakautunut taajuuksille pienemmällä resoluutiolla kuin 5 Hz. (Everest & Pohlmann 2009, 15.)

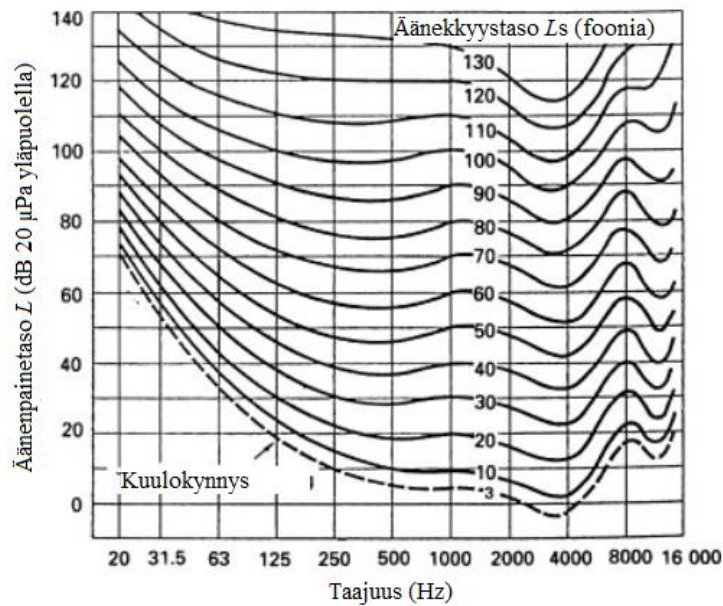


KUVA 2. Tavallisten ääniaaltomuotojen ja äänen taajuuden vertailu. (A) Siniaallon energia on keskittynyt yhdelle taajuudelle. Kolmionmuotoisen (B) ja neliönmuotoisen (C) ääniaallon taajuus on jakautunut usealle eri taajuudelle. Satunnaisen äänen (D) energia on jakautunut tasaisesti koko spektrille, kunnes jossain pisteessä energia alkaa pudota äänen tuottajan rajoitteista riippuen (Everest & Pohlmann 2009, 15, muokattu).

3.6.1 Äänekkyyys ja ihmisen kuulokynnys

Hyvän kuuloaistin omaava ihminen voi pystyä kuulemaan ääniä 20 Hz – 20 kHz välisiltä taajuuksilta. Kuuloaisti ei ole kuitenkaan vakio kaikilla taajuuksilla vaan se vaihtelee mainitun taajuusalueen sisällä. Ihmisen kuulokynnys on taajuudella 2000 Hz noin 0 dB. Kuviossa 1 on esitetty ihmisen kuulokynnyksen riippuvuus äänen taajuudesta. Samassa kuvassa on esitetty taajuuden vaikutus äänekkyyystasoihin. Äänekkyyystasolla tarkoitetaan akustiikan suuretta, joka kuvaa ihmisen subjektiivista äänenvoimakkuuden kokemusta.

Sen yksikkönä käytetään foonia, joka on sovitun määritelmän mukaan 1 kHz:n taajuiselle äänekselle yhtä suuri kuin kyseisen äänksen äänenpainetaso (dB). Muilla taajuuksilla äänekkyytason ja äänenpainetason korrelointi voidaan lukea niin sanotusta vakioäännekkyyssäyrästä (kuvio 1), joka on määritetty kokeellisesti. (Talbot-Smith 2000, 20–21.) Yksinkertaistettuna vakioäännekkyyssäyrästä voidaan lukea, kuinka voimakkaana minkäkin taajuuden ja minkäkin fyysisen voimakkuuden ääni koetaan. Tämä kuvaa hyvin sitä, miten riippuvainen ihmisen kuulo on äänen taajuudesta. Asia on olennainen myös äänitasojen taajuuspainotuksien kannalta (luku 5.3.1).



KUVIO 1. Kuulokynnyksen ja äänekkyytason riippuvuus taajuudesta (Talbot-Smith 2000, 21, muokattu)

3.6.2 Oktaavikaistat ja 1/3-oktaavikaistat

Oktaavikaistat ovat akustiikassa käytettävä nimitys logaritmisille taajuusalueille eli niin kutsutuille taajuuskaistoille. Taajuuden harmoniset monikerrat ovat lähtötaajuuden, esimerkiksi 100 Hz, kokonaislukumonikertoja, kun taas logaritmisella asteikolla yhden oktaavin siirtymä tarkoittaa taajuuden kaksinkertaistumista (kuva 3).

Harmoniset monikerrat							
Lähtötaajuus	2nd	3rd	4th	5th	6th	7th	8th
100 Hz	200	300	400	500	600	700	800

Oktaavit			
Lähtötaajuus			
100 Hz	200	400	800
	Octave	Octave	Octave

KUVA 3. Taajuuden harmoniset monikerrat ja oktaavit. Harmoniset monikerrat kasvavat lineaarisesti ja oktaavit logaritmisesti (Everest & Pohlmann 2009, 12, muokattu).

Oktaavikaistoista puhutaan kaistoina, koska taajuuskaista sisältää aina taajuuksiensa alaja ylärajataajuuksien välisen alueen. Kaistan ”nimenä” käytetään keskitaajuutta. Esimerkiksi 16 Hz oktaavikaistan taajuuden alaraja on 11 Hz ja yläraja 22 Hz. Taajuuskaistojen ylä- ja alarajat on mahdollista laskea kaavalla

$$\frac{f_1}{f_2} = 2^n, \quad (7)$$

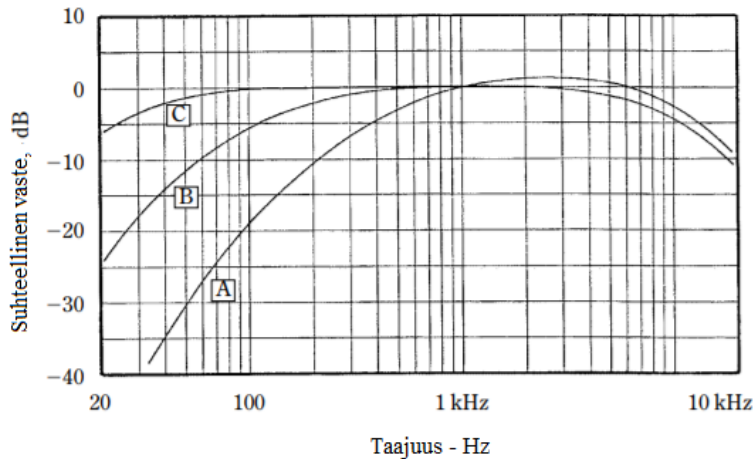
jossa f_1 on oktaavikaistan ylärajataajuus (Hz), f_2 on oktaavikaistan alarajataajuus (Hz) ja n on oktaavien lukumäärä. Terssikaistat ovat oktaavikaistojen kolmasosia ja niistä voidaan käyttää nimitystä 1/3-oktaavikaista. Terssikaistoja käytetään tarkkuuden esimerkiksi mittaustulosten tarkkuuden lisäämiseksi, sillä kuten kaistojen nimistä voidaan päätellä, yksi oktaavikaista voidaan jakaa kolmeksi terssikaistaksi. (Everest & Pohlmann 2009, 12–13.) Taulukossa 3 on esitetty yleisesti käytössä olevat oktaavi- ja terssikaistat.

TAULUKKO 3. Yleisesti akustiikassa käytetyt terssikaistat ja niistä muodostuvat oktaavikaistat (Garcia 2001, 19, muokattu)

Akustiikassa yleisesti käytetyt taajuuskaistat, Hz			
Oktaavi- kaista	Oktaavikaistan terssikaistat	Oktaavi- kaista	Oktaavikaistan terssikaistat
31,5	25	1000	800
	31,5		1000
	40		1250
63	50	2000	1600
	63		2000
	80		2500
125	100	4000	3150
	125		4000
	160		5000
250	200	8000	6300
	250		8000
	315		10000
500	400	16000	12500
	500		16000
	630		20000

3.6.3 A-taajuuspainotus

Ihmiskorva on yksinkertaistettuna kuin taajuus- eli spektrianalysoija. Kuuloaisti pyrkii tulkitsemaan erikorkuisten osääänien keskinäisiä voimakkuusvaihteluita ja tämä onkin suurin syy, miksi melua ei voida tarkastella pelkästään ajallisena ilmiönä. Koska taajuus vaikuttaa ihmisen aistimaan ääneen, on äänitasojen mittaamista varten kehitetty niin sanottu A-taajuuspainotus. A-taajuuspainotuksen lähtökohtana on, että se yrittää jäljitellä kuulon herkkyyttä eritaajuisilla äänillä. Käytännössä A-taajuuspainotus on yhteisesti sovittu kompromissi ja tekninen pelkistys ihmiskorvan taajuusvasteesta. (Lahti 2003, 16–17). A-taajuuspainotuksen graafinen esitys on esitetty yhdessä harvemmin käytettyjen B- ja C-taajuuspainotusten kanssa kuviossa 2. Tunnuslukuissa, kuten L_{Aeq} , A-kirjain viittaa siihen, että kyse on A-painotetusta äänitasosta.



KUVIO 2. A-taajuuspainotus eri taajuuksilla. Kuvassa myös mukana harvemmin käytettävät B- ja C-taajuuspainotukset (Everest & Pohlmann 2009, 31, muokattu).

3.6.4 Äänen impulssimaisuus

Impulssimaiseksi tai iskumaiseksi ääneksi sanotaan yleensä ääntä, jossa on erotettavissa yksi tai useita alle yhden sekunnin mittaisia voimakkaita ääniä. Impulssimaiselle äänelle voidaan määrittää tapauskohtaisesti tarkat määrittelykriteerit esimerkiksi ampumarata-melun tai tuulivoimamelun suhteen, mutta yleisinä kriteereinä voidaan pitää seuraavia:

- nopea ja suuri äänitason kasvu äänen alussa, tyypillisesti 20 dB/ms
- äänitason nousun jälkeen lyhytkestoinen vakio-osuus (noin 0–100 ms), jonka jälkeen äänitaso lähtee laskuun
- äänitason lasku on nopeudeltaan ja pituudeltaan vaihteleva, tyypillisesti noin 30–500 ms. (Pesonen 2005, 89.)

Yleisten kriteerien lisäksi tarkempia määritelmiä impulssimaisuudelle löytyy useita. Ympäristömelun mittausohjeessa (ympäristöministeriö 1995, 27) todetaan, että impulssimaisuuden toteamiseen voidaan käyttää kriteerinä yksittäisen äänipulssin arvojen erotuslaskukaavaa

$$L_{AImax} - L_{ASmax}, \quad (8)$$

jonka lopputuloksen ollessa 5 dB tai yli, melu todetaan impulssimaiseksi. Tässä työssä on edellä mainitun impulssimaisuuden analyysin lisäksi käytetty analysointiin Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy:n tutkimusraportin (Nykänen, Uosukainen, Antila

& Siponen 2014) menettelyä, joka on esitetty luvussa 5.2.1. Tutkimusraportin menettely on ympäristöministeriön tuulivoimamelun mittausohjeen (2014a) mukainen.

3.6.5 Äänen kapeakaistaisuus

Kapeakaistaisuus (myös tonaalisuus ja äänestäisyys) on äänen ominaisuus, joka voi lisätä tai vähentää melun erottuvuutta, äänekkyyttä, meluisuutta, kiusallisuutta, häiritsevyyttä tai epämiellyttävyyttä, kun sitä verrataan saman äänitason omaavaan meluun, joka ei ole kapeakaistaista. Tämän kapeakaistaisuuden aiheuttaman eron vuoksi mittaustulokseen tehdään erikseen määriteltävä korjaus. Äänes on diskreettitaajuinen siniaalto, kun taas yleensä melun kapeakaistainen komponentti on jatkuvaskaistainen. Tämän takia puhutaan äänestäisestä melusta. (Pesonen 2005, 79.) Ympäristömelun mittausohjeessa kapeakaistainen melu määritellään äänenä, jossa on selvästi kuultavia soivia ääniä. Mikäli kapeakaistaisuutta ei voida varmuudella kuulohavainnoin rajata pois, on mittausohjeen mukaan mahdollista todeta karkeasti niin, että jos 1/3-oktaavikaistan A-taajuuspainotettu äänenpainetaso on yli 5 dB suurempi kuin viereisten taajuuskaistojen äänenpainetaso, tulkitaan kyseinen havainto kapeakaistaiseksi. (Ympäristöministeriö 1995, 27.) Tässä työssä on edellä mainitun kapeakaistaisuuden analyysin lisäksi käytetty analysointiin tarkempaa VTT:n tutkimusraportin (Nykänen ym. 2014) menettelyä, joka on esitetty luvussa 5.2.1. Tutkimusraportin menettely on ympäristöministeriön mittausohjeen (2014a) mukainen.

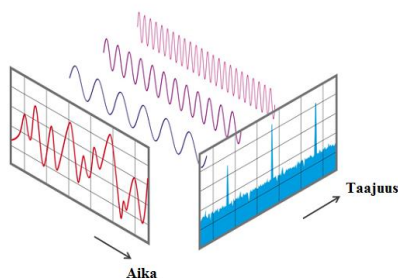
3.7 Vaaleanpunainen kohina

Vaaleanpunainen kohina (pink noise) on akustisissa mittauksissa yleisesti käytetty 1/f-kohinatyyppi. Vaaleanpunaisessa kohinassa jokaisella oktaavi- tai 1/3-oktaavikaistalla on sama määrä energiaa. Koska peräkkäiset oktaavikaistat sisältävät progressiivisesti isompia taajuusalueita, vaaleanpunaisella kohinalla on suhteessa enemmän energiaa pienillä taajuuksilla. Vaaleanpunaiselle kohinalle on tyypillistä, että matalat taajuudet sisältävät enemmän energiaa kuin korkeat ja liikuttaessa matalista taajuuksista korkeampiin taajuuksiin, äänen amplitudi laskee 3 dB jokaista oktaavikaistaa kohden. Vaaleanpunaista kohinaa käytetään yleensä akustisiin mittauksiin, koska energian jakautuminen

taajuuskaistoille vastaa erilaisista kohinatyypeistä parhaiten sitä, miten ihmiskorva subjektiivisesti kuulee. (Everest & Pohlmann 2009, 84–85.)

3.8 FFT (Fast Fourier Transform) Fourier-muunnos

Äänen aaltoliikkeet ovat hyvin harvoin pelkästään yhtä harmonista sinimuotoista aaltoa eli tonaalista ääntä. Ääni sisältää yleensä useita eri taajuuksia ja nykytekniikalla onkin mahdollista tunnistaa ja erotella äänestä sen sisältämät eri taajuudet ja määrittellä kunkin taajuuden osa-aallon intensiteetti. Tätä lopputulosta nimitetään taajuusspektriksi, kuten aiemmin todettiin. Kuvan 4 aaltoliike on purettu harmonisiin osa-aaltoihin, joista se koostuu.



KUVA 4. Signaali ajan suhteen ja taajuusjakauma eriteltynä (NTI Audio, muokattu)

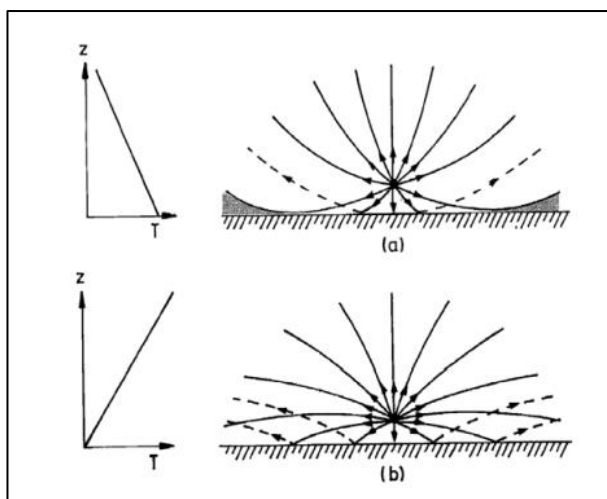
Jokainen näistä osa-aalloista edustaa omaa taajuuttansa. Jokainen jaksollinen funktio on aina harmonisten funktioiden summa. Tapaa, jolla nämä yksittäiset harmoniset funktiot erotellaan summafunktiosta, kutsutaan Fourier-muunnokseksi. Nykyaikaiset signaalien käsittelylaitteet, kuten äänitasomittari, pystyvät tekemään tämän muunnoksen käytännössä saman tien ja taajuusjakauma voidaan esittää äänitasomittarin näytöllä ajantaisena tietona kyseisen hetken taajuusjakaumasta. Fourier-muunnoksia tunnetaan useita, mutta yleisin käytössä oleva algoritmi on nimeltään Fast Fourier Transform (FFT). Fourier-muunnos perustuu useisiin Fourier-sarjoihin ja käytännössä jokainen jaksollinen funktio on mahdollista sinien ja kosinien summana eli Fourier-sarjana. (Peltonen, Perkkiö & Vierinen 2012, 116–117.) Fourier-muunnos on oleellinen sekundäärituulisuojan ominaisuuksien määrittämisessä, sillä kuten myöhemmin (luvussa 4.4.2) todetaan, signaalin muunnos aiheuttaa rajoituksia sekundäärituulisuojan vaimennuksen määrittämismittaukselle, jotta signaalin muutos ei aiheuta vääristyksiä lopputuloksiin.

3.9 Inversio

Tuulivoimamelun mittaamisajankohta altistuvan kohteen mittauksessa on yleensä yö. Tähän vaikuttaa vahvasti kaksi tekijää: taustamelutaso on yöaikana todennäköisesti pienempi kuin päiväaikana, kun liikenteen määrä putoaa ja lisäksi inversion esiintyminen on yöaikana todennäköisempää kuin päiväaikana.

Inversio tarkoittaa lämpötilan käänteistä muutosta. Yleensä ilman lämpötila lähellä maanpintaa (troposfäärissä) pienenee alhaalta ylöspäin. Toisinaan tapahtuu lämpötilan inversio, jolloin lämpötila nouseekin ylöspäin mentäessä. Niin sanottu maanpintainversio syntyy usein talvella selkeällä ja tyynellä säällä korkeapainetilanteessa maanpinnan voimakkaan jäähtymisen seurauksena. Kesäisin halla on tyypillinen maanpintainversion seuraus. Inversion voi havaita esim. kaukolämpöpiipuista nousevasta vesihöyryn tiivistyspatista, joka taittuu vaakasuoraan inversiokerroksessa, kun se tavallisesti olisi jatkanut nousuaan. (Ilmakehä-ABC 2018.)

Inversio perustuu siis maanpinnan nopeaan jäähtymiseen, jota esiintyy yleensä yöaikaan, kun aurinko ei paista ja talvisin, kun auringon lämmittävä vaikutus on vähäinen. Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy:n (Uosukainen 2010) laatimassa tiedotteessa ”Tuulivoimaloiden melun synty, eteneminen ja häiritsevyys” inversio on esitetty selkeästi kuvan 5 mukaisesti.



KUVA 5. Lämpötilan laskiessa korkeuden funktiona ääni taittuu ylöspäin (a), ja lämpötilan kasvaessa korkeuden funktiona (inversio) ääni taittuu alaspäin (b) (Uosukainen 2010, 25).

3.10 Mikrofonit ja tuulisuojat

Mikrofonin tehtävä on aistia ääntä ja muuttaa se sähköiseksi signaaliksi. Varsinaisen tallennettavan tai mitattavan niin sanotun hyötyäänän lisäksi mikrofoni reagoi muihinkin ilmavirtauksiin kuten tuuleen (Aro 2014). Davida Rochmanin (2012) mukaan mikrofonit reagoivat ilman liikkeeseen huolimatta siitä, mikä ilman liikkeen aiheuttaa. Tästä syystä mikrofonin on mahdotonta erottaa, mikä on tuulen aiheuttamaa ääntä ja mikä ei. Rochmanin mukaan tuulen aiheuttama melu on sisällöltään usein matalataajuisia, minkä seurauksena yksi yleinen tapa vähentää tuulen häiriöääniä on ”leikata” matalat taajuudet pois. Tämä ei kuitenkaan sovellu melumittauksiin, joissa matalatkin taajuudet ovat oleellinen osa melun kokonaistasoa ja matalataajuisen melun arviointia. Yhtenä ratkaisuna Rochman tarjoaa avoimen solurakenteen suojaa, joka onkin kokemukseni mukaan melumittauksissa yleisin käytetty suojatyyppe. Hänen mukaansa on kuitenkin tärkeää, että ulkoinen tuulisuoja ei pääse liikkumaan (mekaanisen äänen riski) ja että tuulisuoja on aerodynaaminen (ei teräviä kulmia), jotta tuuli ei aiheuta turbulenssiääniä ohittaessaan suojaa. Eero Aron (2014) mukaan tuulesta ei kuulu ääntä, jos ilmavirta ei osu mihinkään. Vasta, kun tuuli osuu johonkin, syntyy ääni. Kun ilma virtaa reunan tai kulman ohi, kulman taakse syntyy pyörteitä eli turbulenssia. Tässä turbulenssissa ilma liikkuu esineen (tuulisuojan) takana pienissä pyörteissä nopeasti ja kaoottisesti, lähes yhtä voimakkaasti kuin ”tuulen puolella”. Tämä ilmiö on nimeltään diffraktio. Tästä syystä tuulisuojien tulisikin olla mahdollisimman pyöreä tai tylppä, jotta ilmavirta kiertäisi suojan rauhallisempaa virtana.

3.10.1 Mikrofonin äänitason ja äänisignaalin mittaus ja tallennus

Tämän opinnäytetyön altistuvan kohteen mittauksissa käytetyt äänitasomittarit tallentavat samanaikaisesti äänitasoja sekä äänisignaalia. Äänitasoja käytetään analyysissä tuulivoimalan aiheuttamien äänitasojen selvittämiseen, kun taas äänisignaalia käytetään tuulivoimalan aiheuttaman melun kapeakaistaisuuden, impulssimaisuuden ja amplitudimodulaation analyysiin. Tuulivoimamelumittausten kannalta on tärkeää ymmärtää, että nämä kaksi mitattavaa ja tallennettavaa asiaa ovat toisistaan kaksi erillistä asiaa. Mikrofonin saavuttava tuuli voi vaikuttaa äänitasoihin hyvinkin herkästi tuottamalla matalataajuisia häiriöääntä mittausdataan, mutta nämä häiriöäännet eivät kuulu äänitallenteella, jos tasot

ovat alle ihmisen kuulokynnyksen. Mittauksen äänisignaalin kyllä sisältää nämä häiriöäänet taajuusjakaumassaan, mutta mikäli ne haluttaisiin poistaa olisi häiriöäänten tunnistamiseen käytettävä jotakin muuta tunnistustapaa kuin kuuloaistia.

Tuulivoimamelumittauksissa mikrofonin äänisignaalin tallentamisen kannalta olennainen osa on mikrofonissa sijaitseva vahvistin ja sillä signaaliin tehtävä vahvistus. Mikrofonin muuttaessa äänenpaineen vaihtelut sähköiseksi jännitteeksi, tulee jännitteestä hyvin pieni. Tämä johtuu siitä, että jo itse äänivärähtely on kokoluokaltaan niin pientä verrattuna valitsevaan ilmanpaineeseen. Äänitasomittareissa vahvistimen tekemää vahvistusta säädetään niin sanotulla ”gain” -asetuksella, joka tämän opinnäytetyön mittauksissa käytetyissä äänitasomittareissa syötetään dB-arvona. Sopiva vahvistuksen määrä on melumittauksista kertyvän kokemuksen perusteella tehtävä aina uudelleen jokaisen mittauksen alussa, jotta vahvistuksen suuruus olisi sopiva juuri kyseiseen mittaukseen.

Altistuvan kohteen tuulivoimamelumittauksissa vahvistuksen määrä on kriittinen, sillä mitattava tuulivoimalan aiheuttama äänitaso saattaa olla hyvinkin pieni, mutta tuulen mikrofoniiin aiheuttamat häiriöäänet helposti hyvinkin voimakkaita. Tuulen aiheuttamien piikkien ja mahdollinen äänen säröytyminen saattaa aiheuttaa äänitallenteeseen kohtia, jotka impulssimaisuuden analyysiohjelma tunnistaa impulssimaiseksi meluksi. Mikäli äänitasomittauksissa ei käytetä sekundäärituulisuojaa, pitäisi pystyä arvioimaan, minkä verran primäärituulisuojan läpi pääsee tuulta ja kuinka voimakkaita piikkejä se aiheuttaa äänitallenteeseen, jotta vahvistus pystyttäisiin asettamaan sopivalle tasolle. Jos vahvistuksen suuruuden valinta epäonnistuu, äänisignaali voi olla liian hiljainen tai säröytyä, minkä seurauksena äänitallennetta ei voida kokonaan käyttää. Äänitallenteen vahvistusta voidaan jälkikäteen muuttaa äänen muokkaamiseen tarkoitetuilla ohjelmistoilla, mutta hiljaisen äänitallenteen vahvistaminen vahvistaa myös äänitallenteeseen tallentunutta mikrofonin sisäistä kohinaa, mikä voi johtaa siihen, että äänitallenteesta etsityn äänen erotettavuus ei muutu paremmaksi. Jälkikäteen tehtävä negatiivinen vahvistaminen ei myöskään palauta säröytyneitä äänitallennetta ei-säröytyneeksi.

4 TUULIVOIMAMELU JA SEN MITTAAMISTA KOSKEVAT OHJEET, LAIT JA STANDARDIT

4.1 Tuulivoimamelu

Tuulivoimamelu ei fysikaalisilta ominaisuuksiltaan luonnollisesti eroa muusta melusta. Sen sijaan tuulivoimamelun syntymekanismit ovat erilaisia verrattuina moneen muuhun meluun, ja tuulivoimamelun käyttäytymistä ja syntymekanismeja ei vielä täysin tunneta. Tämän lisäksi tuulivoimamelu eroaa muusta melusta siinä, että äänilähde sijaitsee korkealla maanpinnasta, minkä vuoksi melu pääsee helpommin leviämään tuulivoimaloiden ympäristöön ilman, että meluntorjuntaa olisi mahdollista toteuttaa. Tämän seurauksena voimalat pyritään lähtökohtaisesti sijoittamaan riittävälle etäisyydelle asuinrakennuksista ja loma-asutuksesta, jotta altistuviin kohteisiin kohdistuvat melutasot olisivat ihmisten elämisen kannalta kohtuullisia ja asetettujen ohjeavotasojen rajoissa.

Tuulivoimaloiden tuottamalla äänellä on useita eri syntymekanismeja, joista normaaleissa toimintaolosuhteissa yleisin on roottorin siipien vuorovaikuttaminen voimalaa ympäröivän ilman kanssa. Tätä ääntä kutsutaan aerodynaamiseksi ääneksi. Sille tyypillistä on laajakaistaisuus sekä äänenpaineen jaksollinen vaihtelu. Tuulivoimamelu saattaa korostua etenkin yöaikaan taustamelutasojen laskiessa. (Lanki, Turunen, Yli-Tuomi, Heino-Guzejev, Majjala, Toivonen, Toivo, Kännälä & Ylikoski 2017, 130.) Yöaikaan korostumista saattaa korostaa lisäksi yöaikaan todennäköisemmin tapahtuva inversio, jonka vaikutus äänen etenemiseen on esitetty edellä (luvussa 3.7.1) tarkemmin.

Tuulivoimaloiden aiheuttamat melutasot ovat voimaloiden läheisissä asuin- ja lomakohteissa yleensä pienempiä kuin esimerkiksi vilkasliikenteisen tien varrella esiintyvät tasot. Tuulivoimamelussa mahdollinen äänenpaineen jaksollinen vaihtelu saattaa lisätä tuulivoiman aiheuttaman äänen häiritsevyyttä. Tuulivoimamelulle tyypillistä on lisäksi infraääni ja pienitaajuinen melu. Infraääneksi kutsutaan ääntä, jonka taajuus on alle 20 Hz. Mitä pienitaajuisempi ääni on, sitä suurempi äänenpainetaso siltä vaaditaan, jotta ihminen voi sen kuulla. 20 Hz:n taajuudelle kuulokynnys on noin 79 dB. Infraääni ei ole pelkästään tuulivoiman ominaisuus, sillä sitä esiintyy luonnossa ja varsinkin kaupunkialueella jo muutenkin. Yleensä sen tasot ovat kuitenkin selvästi kuulokynnyksen alapuolella. (Lanki ym. 2017, 131).

4.2 Tuulivoimamelutasojen määrittäminen

Tuulivoimaloiden aiheuttamia melutasoja voidaan arvioida kahdella eri tapaa; laskennallisesti (melumallinnus) tai mittaamalla melua altistuvassa kohteessa. Molemmissa tavoissa on omat hyvät ja huonot puolensa. Laskentamalli vastaa yleensä hyvin todellista tilannetta, kun melutasoja tarkastellaan pitkällä aikavälillä ja maasto on pääasiassa tasaista ja yksinkertaista. Mittaamisen etuna voidaan pitää sen mittauksen aikana vallitsevien tasojen todenmukaisuutta, jos mittausolosuhteet ovat hyvät. Samalla tämä on kuitenkin mittaamisen heikkous: vallitseva tilanne (sää, häiriöäänät jne.) voi olla mittauspäikälle niin harvinainen, että tuloksista ei voida vetää johtopäätöksiä pitkien aikavälien melutasoista. Mittauksen toinen huono puoli on halutun äänen erottaminen muista äänistä. Kovalla tuulella esimerkiksi puiden havina tuulessa saattaa peittää alleen tuulivoimalan melun. Lisäksi mittauspäikän lähistöllä saattaa sijaita muita epäsäännöllistä melua tuottavia kohteita, joiden melua voi olla tarvittaessa vaikea poistaa mittausdatasta.

Suomessa tuulivoimamelun mittaaminen altistuvassa kohteessa on yleistä ja usein tuulivoimaloiden ympäristöluvan myöntämisen ehtona, jos voimalan/voimaloiden lähistöllä on asuin- tai lomarakennuksia. Ympäristönsuojelulain (säädös 527/2014) neljännen luvun pykälässä 27 (ja liitteessä 1, johon pykälä 27 viittaa) listataan toiminnot, joihin ympäristöluva tarvitaan. Tuulivoimaa ei mainita erikseen, mutta pykälän 27 kohdassa sanotaan, että ”ympäristöluva on lisäksi oltava toimintaan, josta saattaa ympäristössä aiheutua eräistä naapuruussuhteista annetuin lain (26/1920) 17 §:n 1 momentissa tarkoitettua kohduttontarvitusta”. Myös ulkoilualueiden läheisyys voi olla peruste altistuvassa kohteessa mittaamiseen, sillä kuten aiemmin todettiin (taulukko 4), virkistysalueille, leirintäalueille ja kansallispuistoille on omat tuulivoimamelun ohjearvosot. Ympäristöhallinnon verkopalvelun (Usein kysytyt kysymykset tuulivoimasta 2018) mukaan tuulivoimaloiden sijainti määritetään maankäyttö- ja rakennuslain mukaisilla menetelmillä (kaava, suunnittelutarveratkaisu ja rakennuslupa). Jos ennen rakentamista tehtävä laskennallinen meluselvitys (tietokonemallinnus) ei osoita tuulivoiman aiheuttaman melun ylittävän ohjearvoja, ei ympäristöluvaakaan lähtökohtaisesti ole tarpeen.

4.3 Tuulivoimamelun mittaaminen

Melun mittaamista on Suomessa ohjeistettu ympäristöministeriön toimesta usean eri ohjeen muodossa. Tuulivoimamelun altistuvan kohteen mittaamisen kannalta olennaisin ohje on luonnollisesti ”Tuulivoimaloiden melutason mittaaminen altistuvassa kohteessa” (ympäristöministeriö 2014a). Koska tuulivoimamelun mittaaminen eroaa muun melun mittaamisesta selvästi, on tämän työn ymmärtämisen kannalta käytävä kohtia läpi myös ympäristömelun mittausohje ”Ympäristömelun mittaaminen” (ympäristöministeriö 1995).

Luvussa 4.1 mainittujen tuulivoimamelun erityispiirteiden vuoksi myös tuulivoimamelun mittaaminen melulle altistuvassa kohteessa eroaa muun melun mittaamisesta selvästi. Tavallisesti äänilähteen ja altistuvan kohteen välinen etäisyys on suurimmillaan joitakin satoja metrejä, kun tuulivoimamelun mittaamisessa etäisyys saattaa olla jopa 1–2 kilometriä. Lisäksi tuulivoimamelun ohjearvotasot ovat matalampia kuin muulle melulle asetetut ohjearvotasot (luvut 4.4.3 ja 4.4.4). Tämä johtaa luonnollisesti siihen, että tuulivoimamelun altistuvan kohteen mittauksessa tuulivoimalan ääntä on haastavampi erottaa taustamelusta.

Suurimman haasteen tuulivoimamelun mittaamiselle aiheuttaa kuitenkin tuuli ja taustamelu, joka usein on hyvinkin riippuvainen vallitsevasta tuulen nopeudesta. Jotta tuulivoimamelua voidaan mitata, tulee melua aiheuttavan voimalan/voimaloiden käydä täydellä teholla. Tämä vaatii tavallisesti korkeita tuulen nopeuksia: 10 metrin korkeudelta mitattuna noin ≥ 7 m/s tuulen nopeus tarkoittaa yleensä sitä, että voimalan napakorkeudella tuulen nopeus nousee riittävän suureksi, jotta voimala käy täydellä teholla. Asia on tietysti voimalan napakorkeudesta ja tyypistä riippuvainen ja tarkkaa tuulennopeustietoa ei voida nimetä. Tuulivoimaloiden melutason mittausohje ilmoittaaakin tuulen nopeuden tavoitearvoksi 10 metrin korkeudella 8 m/s nopeutta, mikäli muita tuulennopeuksia ei ole mittauksissa perustellusti edellytetty (ympäristöministeriö 2014a, 15).

Ei-tuulivoimamelun melumittauksissa edellytetään huomattavasti pienempiä tuulen nopeuksia. Ympäristömelun mittausohjeen mukaan tuulen nopeus katsotaan riittävän heikoksi, jos sen nopeus on enintään 5 m/s mitattuna vähintään 2 metrin korkeudella. Lisäksi mittausohjeessa todetaan, että mittaamista tulee pyrkiä välttämään hetkittäisten kovien

tuulenpuuskien aikaan. Mittaamista tulisi myös välttää yli 1000 metrin mittausetäisyyksillä. (Ympäristöministeriö 1995, 18.) Syynä näihin olosuhteiden rajoituksiin on mittaus tulosten luotettavuuden varmistaminen ja parantaminen. Yhteistä ympäristömelun ja tuulivoimamelun mittaushjeille on se, että tuulen suunnan tulee olla äänilähteestä ± 45 asteen sektorissa (ympäristöministeriö 1995, 18; ympäristöministeriö 2014a, 19).

4.3.1 Tuulen vaikutus tuulivoimamelun mittaamiseen

Tuulivoimaloiden toiminta edellyttää tuulta, joten tuulivoimamelua mitataan aina tuulissa olosuhteissa. Tuulivoimamelun mittaamiselta vaadittava tuulennopeus aiheuttaa todennäköisesti altistuvassa kohteessa korkeampia taustamelutasoja kuin tyynissä tai heikkotuulisissa olosuhteissa. Tämä johtuu siitä, että hyvin harvoin, jos koskaan, mittausta paikka sijaitsee kaukana kaikesta taustamelua aiheuttavasta kasvustosta. Lehtipuista esimerkiksi 10 m/s tuulennopeudella lähtevä A-painotettu äänitaso saattaa olla jopa 40-50 dB aiheuttaen sen, että tuulivoiman aiheuttamaa melua on vaikea tai mahdoton erottaa taustamelusta. Näin korkeat taustamelutasot ovat kuitenkin harvinaisempia ja yleensä tuulivoimamelu on taustamelusta vähintäänkin kohtuullisesti erotettavissa.

Toinen tuulen aiheuttama merkittävä mittauksia vaikeuttava tekijä on tuulen aiheuttamat suorat häiriöäänät mittausmikrofoniin. Äänitasomittareiden valmistajien mittareiden mukana toimittamat primäärituulisuojat on tarkoitettu melumittauksiin, joissa tuulennopeus ei nouse yli 5 m/s. Tuulennopeuden kasvaessa tätä suuremmaksi primäärituulisuoja ei yleensä enää riitä suojaamaan mikrofontia tuulelta, minkä seurauksena tuuli pääsee tunkeutumaan suoraan mikrofonin painetta aistivalle kalvolle aiheuttaen sen, että kalvo ei välttämättä kykene enää aistimaan ääniaaltojen sisältämää painevaihtelua. Tämän seurauksena äänitasomittari jättää mittauksen kannalta olennaista ääntä rekisteröimättä ja tämän sijaan tallentaa äänitason suuren nousupiikin ja virheellisen desibelilukeman.

4.4 Tuulivoimamelun mittaamista koskevat ohjeet, lait ja standardit

Ympäristöministeriö on antanut ympäristönsuojelulain (86/2000) 108 §:n ja 117 §:n nojalla ohjeet ”tuulivoimaloiden melutason mittaamisesta altistuvassa kohteessa” (ympäris-

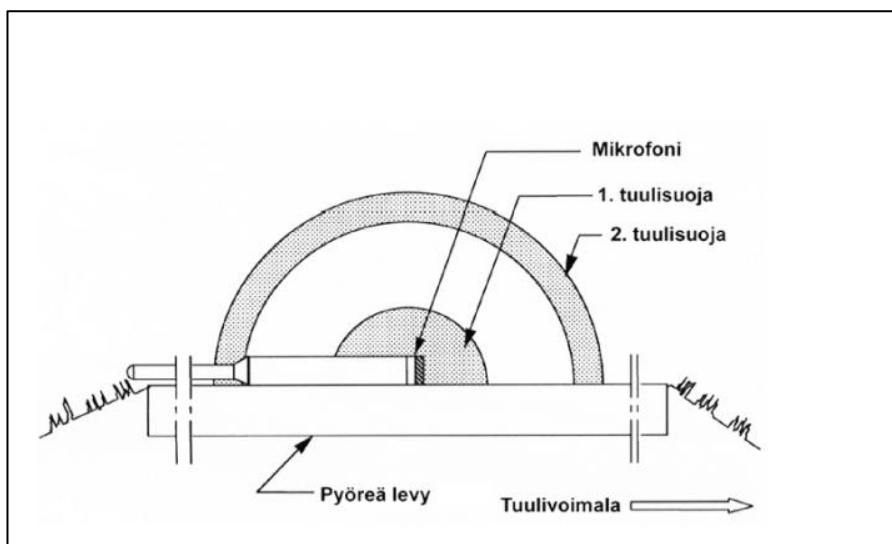
töministeriö 2014a) ja ”tuulivoimaloiden melupäästön todentamisesta mittaamalla” (ympäristöministeriö 2014b). Lisäksi yleisesti käytössä on ympäristöministeriön toimeksianosta tehty VTT:n tutkimusraportti ”Tuulivoimalan meluvaikutukset: Häiritsevyysmittaristo ja sen käyttö” (Nykänen ym. 2014). Tuulivoimamelun mittaamista määrittää kansainvälinen IEC 61400 standardi (2012), jonka 11. osa on nimeltään ”Wind turbines – Acoustic noise measurement techniques”. Standardin tarkoitus on tarjota yhdenmukaiset menetelmät, jotka takaavat, että tuulivoimaloiden tuottaman melun mittaustekniikat ja tulosten analyysit ovat yhdenmukaisia ja paikkansapitäviä.

4.4.1 Ympäristöministeriön ohje: Tuulivoimaloiden melutason mittaaminen altistuvassa kohteessa

Mitattaessa tuulivoimaloiden melutasoa altistuvassa kohteessa tai tuulivoimaloiden melupäästöä, ympäristöministeriön ohjeet (2014a, 22; 2014b, 15) määrittelevät mittaamisessa käytettävälle tuulisuojujalle kaksi päävaihtoehtoa:

- Mikrofoni voidaan asettaa mikrofonitelineeseen tai maanpinnalle sijoitetulle mittauslevylle, jota käytetään vähentämään tuulen aiheuttamaa kohinaa mikrofonissa. Telineeseen asetetun mikrofonin tuulisuojujana käytetään laitevalmistajan suosittelemaa primaarista tuulisuojuja. Tarvittaessa käytetään tämän ympärille asetettua toista tuulisuojuja, niin kutsuttua sekundäärituulisuojuja.
- Mittauslevyn päälle asetetun mikrofonin ympärille sijoitetaan primäärituulisuoja (kuva 6) ja tarvittaessa käytetään lisäksi toista tuulisuojuja (sekundäärituulisuoja). Levyn päältä mitattaessa laitevalmistajan suosittelema primäärituulisuoja leikataan kahtia ja suojan puolikas asetetaan levyn päälle primääriseksi tuulisuojuksi.

Mikrofoni voidaan sijoittaa myös rakennuksen ulkoseinään asennetun mittauslevyyn. Sekundääristä tuulisuojuja suositellaan käytettäväksi tilanteissa, joissa tuulen aiheuttama kohina mikrofonissa muodostaa pääasiallisimman taustamelun (ympäristöministeriö 2014a, 22).



KUVA 6. Halkaisijaltaan vähintään 1m pyöreä levy, jolle on asetettu mikrofoni primaari- ja sekundaärituulisuojan kanssa (ympäristöministeriö 2014a, 13)

Ympäristöministeriön ohjeet vaativat myös, että tuulisuojan vaikutus mikrofoniin taajuusvasteeseen on esitettävä mittausraportissa. Opinnäytetyötä varten rakennetun sekundaärituulisuojan vaikutukset mikrofoniin taajuusvasteeseen on esitetty luvussa 6.1. Maahan asetettavasta mittauslevystä ympäristöministeriön ohjeessa (2014a, 13) todetaan, että levyn tulee olla akustisesti kova, sen halkaisijan tulee olla ainakin 1,0 metriä ja että mikrofoni tulee sijoittaa mahdollisimman lähelle levyn pintaa.

4.4.2 Sekundaärituulisuoja IEC 61400 -standardissa

Kansainvälisen IEC 61400 standardin osa 11 versio 3.0 (2012) määrittelee tuulivoimamelun mittaamisessa käytettävän levyn ja tuulisuojat tarkemmin kuin ympäristöministeriön ohjeet. Standardin mukaan levyn tulee olla vähintään 1,0 metriä halkaisijaltaan. Levyn paksuudelle on myös asetettu rajat: mikäli levy on puuta, paksuuden tulee olla vähintään 12 millimetriä, mutta levyn ollessa metallia, paksuuden tulee olla vähintään 2,5 millimetriä. Standardin mukaan levyn ei välttämättä tarvitse olla yhtenäinen, vaan se voi olla kokoontaitettava, esimerkiksi kuljetuksen helpottamiseksi.

Sekundaärisen tuulisuojan ominaisuuksiin standardi (IEC 2012) antaa seuraavat ohjeet:

- Tuulisuojan vaikutus (vaimennus: negatiivinen tai positiivinen) mikrofoniin taajuusvasteeseen tulee raportoida. Lisäksi vaikutus tulee korjata mitattuihin arvoihin.

- Tuulisuojan aiheuttaman vaimennuksen tulee olla -1–3 dB jokaiselle 1/3-oktaavikaistalle.
- Kahden vierekkäisen 1/3-oktaavikaistan vaimennuksen erotus ei saa olla yli 2 dB, jotta FFT-spektri ei vääristy.
- Vaimennus tulee määrittää taajuuksille 100 Hz:stä ylöspäin, pienemmille taajuuksille lisäsvaimennukseksi merkitään yleensä 0 dB. Lisäsvaimennus tulee kuitenkin tutkia pienillekin taajuuksille (20–100 Hz).
- Tuulisuojan rungolle ei aseteta materiaalivaatimuksia, vaan se voi koostua esimerkiksi isoreikäisestä metalliverkosta.
- Rungon päälle asennettavan materiaalikerroksen tulee olla rakenteeltaan avointa solukkoa ja sen tulee olla 13–25 millimetriä paksu. Myös muita lisäsvaimennukseltaan sopivia tekstiilejä voidaan tarvittaessa käyttää.
- Sekundäärituulisuojan tulee olla muodoltaan puolipallo, jonka halkaisija on vähintään 450 mm.

4.4.3 Tuulivoimamelua koskevat ohjearvot ja toimenpiderajat

Valtioneuvoston asetuksessa (1107/2015) tuulivoimaloiden ulkomelutasojen ohjearvoista todetaan seuraavaa: ”Tuulivoimalan toiminnasta aiheutuva melupäästön takuuarvon perusteella määritelty laskennallinen melutaso ja valvonnan yhteydessä mitattu melutaso eivät saa ulkona ylittää melulle altistuvalla alueella melun A-taajuuspainotetun keskiäänitason (ekvivalenttitason L_{Aeq}) ohjearvoja seuraavasti:

TAULUKKO 4. Tuulivoimaloiden ulkomelutason ohjearvot (Valtioneuvoston asetus 1107/2015, 3 §)

	Ulkomelutaso L_{Aeq} päivällä klo 7–22, dB	Ulkomelutaso L_{Aeq} yöllä klo 22–7, dB
Pysyvä asutus	45	40
Loma-asutus	45	40
Hoitolaitokset	45	40
Oppilaitokset	45	-
Virkistysalueet	45	-
Leirintäalueet	45	40
Kansallispuistot	40	40

Jos tuulivoimalan melu on impulssimaista tai kapeakaistaista melulle altistuvalla alueella, valvonnan yhteydessä saatuun mittaustulokseen lisätään 5 dB ennen sen vertaamista 3 §:ssä säädettyihin arvoihin.”

Tuulivoimaloiden aiheuttamaan meluun sovelletaan myös sosiaali- ja terveysministeriön asetuksen (545/2015) 12 § annettuja toimenpiderajoja unihäiriötä aiheuttavalle melulle ja pienitaajuiselle melulle. Asetuksen 12 §:n mukaan yöaikainen (klo 22–7) musiikkimelu tai muu vastaava mahdollisesti unihäiriötä aiheuttava melu, joka erottuu selvästi taustamelusta, ei saa ylittää 25 dB yhden tunnin keskiäänitasona $L_{Aeq,1h}$ (klo 22–7) mitattuna niissä tiloissa, jotka on tarkoitettu nukkumiseen. Pienitaajuisen melulle on annettu toimenpiderajat terssikaistoille 20–200 Hz taajuuspainottamattomina tunnin keskiäänitasoina (taulukko 5). Pienitaajuisen melun toimenpiderajat eivät kuitenkaan ole tämän eri mittauksia vertailevan työn kannalta olennaisia.

TAULUKKO 5. Pienitaajuisen sisämelun tunnin keskiäänitason toimenpiderajat nukkumiseen tarkoitetuissa tiloissa (Sosiaali- ja terveysministeriö 2015)

Kaista Hz	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160	200
Yöajan (klo 22-7) $L_{Aeq, 1h}$ (dB)	74	64	56	49	44	42	40	38	36	34	32

4.4.4 Muun ympäristömelun ulkoalueiden ohjearvot

Ympäristömelun yleiset ohjearvot on säädetty valtioneuvoston päätöksessä (993/1992). Taulukossa 6 on esitetty ulkoa-alueiden päivä- ja yöajan keskiäänitasojen ohjearvotasot. Uusilla alueilla sovelletaan yöajalle 45 dB ohjearvotasoa, yöajan ohjearvotasoa ei sovelleta oppilaitoksia palveleviin alueisiin tai luonnonsuojelualueisiin, joita ei yleensä käytetä oleskeluun tai luonnon havainnointiin yöllä.

TAULUKKO 6. Ympäristömelutasojen yleiset ohjearvotasot ulkoalueilla (Valtioneuvoston päätös 993/1992)

Ulkoalueen kuvaus	Päiväajan (klo 7-22) keskiäänitason ohjearvot	Yöajan (klo 22-7) keskiäänitason ohjearvot
Asumiseen käytettävät alueet, virkistysalueet taajamissa ja niiden välittömässä läheisyydessä sekä hoito- ja oppilaitoksia palvelevat alueet	55 dB	45-50 dB
Loma-asumiseen käytettävät alueet, leirintäalueet, virkistysalueet taajamien ulkopuolella ja luonnonsuojelualueet	45 dB	40 dB

5 SEKUNDÄÄRITUULISUOJA JA ALTISTUVAN KOHTEEN MITTAUKSEN MENETELMÄT

5.1 Sekundäärituulisuojan valmistaminen

Sekundäärituulisuojien korkean hinnan vuoksi niitä ei ollut opinnäytetyön puitteissa mahdollista hankkia. Tästä syystä päädyttiin rakentamaan sekundäärituulisuoja itse. Suojan runko rakennettiin 5 mm paksusta metallitangosta, jotka taivutettiin halkaisijaltaan 460mm puolipallon muotoon ja viimeisteltiin hitsaamalla tangot toisiinsa. Tankojen päälle liimattiin 8 kappaletta 4 mm paksuisesta vaahtomuovista leikattuja sektoreita (kuva 7). Tuulisuojan kiinnitys mittauslevyyn on toteutettu levyssä kiinni olevilla kiristyslii-noilla (kuva 7). Mittauslevyyn on tehty lähelle keskipistettä reikä, josta mikrofoni ja mikrofonikaapeli voidaan pujottaa läpi niin, että mikrofoni saadaan kiinnitettyä levyn keskipisteeseen ja levyn pintaan kiinni.



KUVA 7. Vasemmalla sekundäärituulisuojan metallirunko ja 3mm paksu avoimen solurakenteen vaahtomuovipäällyste ja oikealla sekundäärituulisuojan kiinnitys mittauslevyyn.

5.1.1 Sekundäärituulisuojan ominaisuuksien määrittäminen

Sekundäärituulisuojan aiheuttama vaimennus (insertion loss) määritettiin IEC 61400-11 standardin 3:n version (2012) mukaan. Mittaukset tehtiin kaupunkiolosuhteissa. Puolikkaan dodekaedrin muotoinen vaaleanpunaista kohinaa tuottava kaiutin Norsonic Nor275

sijoitettiin 4 metrin korkeuteen (kuva 8) niin, että pysty- ja vaakasuora (kaiutin pystysuoralla pinnalla ja mikrofonit vaakasuoralla pinnalla) pinta ovat toisiinsa nähden suorassa kulmassa.



KUVA 8. Sekundäärituulisuojan ominaisuuksien määrittäminen mittauksilla. Vasemmalla suojan ominaisuuksien määrittämiseen käytetty mittari, oikealla referenssimittari

Mittauksissa käytettiin yhtä Norsonic 140 ja yhtä Norsonic 139 äänitasomittaria. Molemmat mittarit ovat 1-luokan äänitasomittareita. Ennen mittauksia ja mittausten jälkeen melumittarit kalibroitiin erillisellä Norsonic Nor1251 kalibraattorilla. Sekä melumittareiden, että erillisen kalibraattorin ulkopuolisen tahon suorittamat kalibroinnit oli tehty loppuvuodesta 2017, joten ne olivat opinnäytetyön mittausten aikaan voimassa.

Ominaisuuksien määrittämisen mittaukset tehtiin kolmella eri kohtisuoralla etäisyydellä äänilähteeseen nähden: 4,8m; 6,0m ja 7,2 m. Jokaiselle mittausetäisyydellä mitattiin yhteensä kuusi 30 sekunnin jaksoa: kolme jaksoa sekundäärituulisuojan kanssa ja kolme jaksoa ilman sekundäärituulisuojaa. Toinen mittari toimi referenssimittarina, jonka kaikki mittaukset tehtiin ilman sekundäärituulisuojaa. Näin saatiin selville ympäristön taustamelun aiheuttama vaikutus lopputuloksiin. Molempien mittareiden mittaukset tehtiin 1/3-oktaavikaistoittain.

Sekundäärituulisuojan aiheuttama vaimennus laskettiin yhdeksän ilman suojaa ja yhdeksän suojan kanssa tehdyn mittauksen erotuksen aritmeettisena keskiarvona. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että ensin mitattiin melutaso ilman suojaa ja sitten suojan kanssa, mistä muodostuu erotuksena yksi mittaustulos. Tämä toistettiin yhteensä yhdeksän kertaa, kolme jokaisella eri mittausetäisyydellä. Mittaustuloksista laskettiin lisäksi sekundäärituulisuojan aiheuttamien vaimennusten keskihajonta.

Koska suojan aiheuttamat vaimennukset taajuuskaistoilla ovat lähtökohtaisesti pieniä ja kaiuttimen tuottamat äänenpainetasot suuria (esimerkiksi kaiuttimen tuottama taso voi olla jollakin taajuuskaistalla 80 dB ja sekundäärituulisuojan aiheuttama vaimennus voi samalla taajuuskaistalla olla selvästi alle 1 dB), on mittaustulokset syytä normalisoida referenssimittarista saatavilla vastaavilla mittaustuloksilla. Tällä tarkoitetaan sitä, että sekundäärituulisuojan kanssa käytetyn mittarin tuloksista jollekin taajuuskaistalle voidaan saada vaimennukseksi esimerkiksi 3 dB, mutta samaan aikaan referenssimittarilla huomataan, että ilman suojaakin taajuuskaistan melutason vaimentuminen on ollut 2,5 dB. Tällöin suojan aiheuttama vaimennus olisikin enää 0,5 dB. Normalisointi on käytännössä tehty niin, että referenssimittarin tuloksille on tehty vastaava tulosten käsittely kuin varsinaiselle mittarille ja nämä tulokset on vähennetty varsinaisen mittarin mittaustuloksista taajuuskaistoittain.

5.2 Altistuvan kohteen mittausmenetelmä ja mittaustulosten käsittely

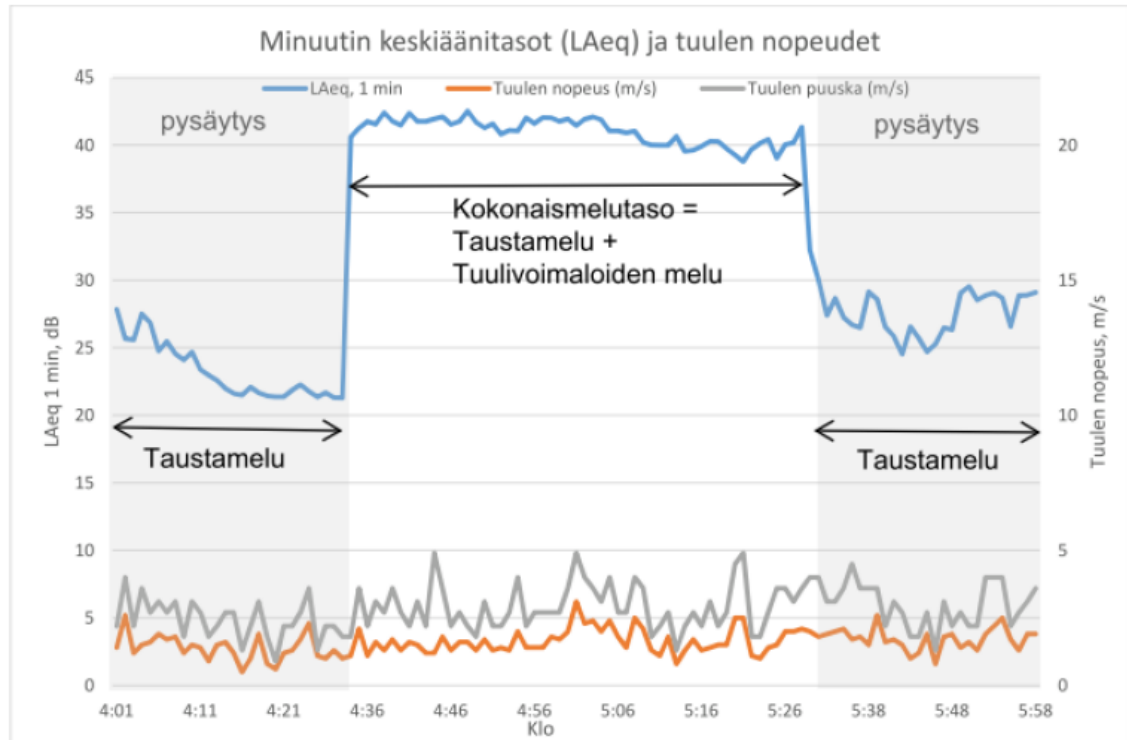
Altistuvan kohteen mittaukset on tehty siten, että käytetty menetelmä noudattaa ympäristöministeriön ohjeen (2014a, 16) mukaista menettelyä C ”Tuulivoimalan tuulen nopeuden tavoitearvolla tuottaman melutason mittaaminen”. Menettelyn C pääperiaate on seuraava:

- Tuulivoimalan ja taustamelulähteiden yhdessä tuottama melutaso mitataan mitauspisteessä.
- Taustamelutaso mitataan samalla tavalla tuulivoimalan ollessa pysäytettynä.
- Kumpikin mitatuista melutasoista esitetään mitauspisteessä mitatun tuulen nopeuden funktiona.
- Taustamelutasot arvioidaan käyrällä regression avulla ja tuulivoimalan tuottama melutaso määritetään pisteittäin.
- Tuulivoimalan tuottamat taustamelukorjatut melutasot piirretään tuulen nopeuden funktiona. Melutasopisteet approksimoidaan suoralla viivalla ja tuulen nopeuden tavoitearvolla vallitseva melutaso luetaan viivalta.

Menettelyllä saatua lukuarvoa voidaan käyttää verrattaessa tuulivoimalan tuottamaa melutasoa esimerkiksi suunnittelu- tai tunnusarvoon myös tilanteessa, jossa melutaso on määritetty suhteessa tuulivoimalan lähellä vallitsevaan tuulen nopeuteen. Menettelystä B saatua tulosta ei voi käyttää suunnittelu- tai tunnusarvon ylittymisen todentamiseen, koska sillä saatavaa tulosta voidaan käyttää vain todentamaan, että tuulivoimalan aiheuttama melutaso on pienempi kuin suunnittelu- tai tunnusarvo (tarkkaa lukuarvoa ei siis saada). Menettelystä A saatua tulosta voidaan käyttää verrattaessa tuulivoimalan tuottamaa melutasoa suunnittelu- tai tunnusarvoon. (Ympäristöministeriö 2014a, 16.)

Altistuvan kohteen mittauksen tulosten käsittely on tehty niin, että koko mittausjakson tuulivoimalan mittausdatat on käsitelty yksinä kokonaisuuksina: voimalan kaikkien pysäytysten mittausdata yhdessä ja voimalan kaikkien käynnissä oloaikojen mittausdata yhdessä. Vaihtoehtona tälle olisi tarkastella tuulivoimalan yksittäisten pysäytysten ja niitä ympäröivien voimalan käynnissä oloaikojen mittausdataa yksittäisinä tapauksina. Esimerkiksi kolmen pysäytyksen tapauksessa tällä tavalla saataisiin kolme lopputulosta tai mahdollisesti jopa neljä, jos kaikki data käsitellään myös yhdessä. Mittaustapojen vertailuun tällä on kuitenkin niin vähäinen merkitys, että on päädytty helpommin ymmärrettävään esitystapaan.

Tuulivoimalan pysäytysten tarkoituksena on määrittää taustamelutaso tilanteissa, joissa tuulivoimala ei ole toiminnassa (kuvio 3). Altistuvan kohteen mittauksessa äänitasomittareiden mittausresoluutio oli yksi sekunti. Tästä sekuntidatasta on muodostettu minuutin jaksojen A-painotetut keskiäänitasot sekä tuulivoimalan käynti- että pysäytysjaksoille.



KUVIO 3. Esimerkki tuulivoimalan aiheuttaman melutasojen arvioinnista yöaikaisella mittausjaksolla. Havainnekuva, joka ei liity opinnäytetyön mittauksiin.

Mittauspaikkojen kokonaismelutasoista ja taustamelutasoista on mittausjakson ajalta laadittu kuvaajat, joissa minuutin keskiäänitasot on esitetty mittauspaikalla mitatun tuulen nopeuden suhteen. Kokonaismelutasojen kuvaajaa ei itsessään käytetä tulosten käsittelyssä lainkaan, mutta se havainnollistaa äänitasoja, joita lähdetään taustamelukorjaamaan. Lisäksi kuvaajaa on mahdollista käyttää kokonaistilanteen arviointiin: jos kokonaismelutasot laskisivat tuulen nopeuden kasvaessa pitäisi asialle etsiä selitystä, jotta voidaan varmistua mittauksen virheettömyydestä. Taustamelutasolle määritellylle kuvaajalle on tämän jälkeen määritetty regressiosuora, joka kuvaa taustamelun ja mittauspaikalla vallitsevan tuulen nopeuden suhdetta. Regressiosuoran funktion avulla on mittauspaikan kokonaismelutasoille määritetty vastaavien minuutin jaksojen tuulen nopeutta vastaavat taustamelun äänitasot. Tämän jälkeen mitatuista kokonaismelutasoista on vähennetty

taustamelutaso, jolloin on saatu tuulivoimalan aiheuttama taustamelukorjattu kokonaistaso $L_{Aeq, corr}$. Erotus on laskettu kaavalla

$$L_{Aeq,corr} = 10 \times \lg \left(10^{\frac{L_{Aeq,free}}{10}} - 10^{\frac{L_n}{10}} \right), \quad (9)$$

jossa $L_{Aeq, corr}$ on tuulivoimalan tuottama melutaso (korjattu arvo), $L_{Aeq, free}$ on tuulivoimalan ja taustamelun yhdessä aiheuttama melutaso (mitattu arvo, kokonaismelutaso) ja L_n on keskimääräinen taustamelutaso kullakin tuulen nopeusalueella. (Ympäristöministeriö 2014a, 21.)

Ympäristöministeriön mittausohjeen mukaan, kun $L_{Aeq, free} - L_n$ on välillä 3–6 dB, kuvaajaan merkittyihin 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 tuulivoiman tuottaman melutason ylärajana. (Ympäristöministeriö 2014a, 21.) Korkeiden taustamelutasojen vuoksi tuulivoimalan aiheuttamaa melutasoa ei voida välttämättä luotettavasti antaa, mutta monesti tuulivoimalan aiheuttaman melutason ylärajan tietäminen riittää, koska yläraja saattaa olla jo alle ohjearvotason. Myöskään eri mittaustapoja vertailtaessa ei ole oleellista puhutaanko tuulivoimalan aiheuttamista melutasoista vai niiden ylärajoista. Tulosten käsittelyssä on jopa mahdollista huomata, että jokin mittaustapa antaa toista mittaustapaa luotettavamman tuloksen. Osa lasketuista taustameluista voi myös olla suurempia kuin kokonaismelutaso, jolloin taustamelukorjattua tasoa ei ole voitu muodostaa. Taustamelukorjattu taso on laskettu vain, mikäli kokonaistason ja taustamelutason erotus on ollut suurempi kuin 0 dB. Nämä tulokset on esitetty tuloksissa erikseen taulukoituna.

Edellä mainittu taustamelukorjattu tuulivoimalan aiheuttama kokonaistaso on esitetty tuulivoimalasta mitatun ja 10 metrin korkeuteen muutetun tuulen nopeuden suhteen. Tuulen nopeus 10 metriin korkeuteen on laskettu kaavalla:

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

jossa v_h on tuulen nopeus nasellista mitattuna, h on tuulivoimalan napakorkeus, z_0 on maan karheus (taulukko 7) ja z_{ref} on referenssikorkeus, johon tuulen nopeus muutetaan.

TAULUKKO 7. Eri maanpinnan tyyppien karheus (ympäristöministeriö 2014a, 18)

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 puustoa	0,3

Mittauspaikan vaihtelevien maaston muotojen ja osittain tiheän puuston vuoksi maanpinnan karheutena on tässä työssä käytetty arvoa 0,3.

5.2.1 Melun impulssimaisuuden ja kapeakaistaisuuden määrittäminen

Tuulivoimalan aiheuttamaa melun impulssimaisuutta, jaksollisuutta ja merkittävää sykintää arvioitiin mittauspaikalla tehdyillä kuulohavainnoilla sekä äänitallenteista tehtyjen kuulohavaintojen perusteella. Kapeakaistaisuutta arvioitiin lisäksi myös terssikaistoittain mitattujen äänenpainetasojen perusteella. Alustavien analyysien lisäksi mittausdatalle tehtiin Teknologian tutkimuskeskus VTT tutkimusraportin (Nykänen, Uosukainen, Anttila & Siponen 2014) mukainen impulssimaisuuden ja kapeakaistaisuuden analyysi. Analyysissä mittausjakson äänitallennedat jaettiin 30 minuutin (tai lyhyempiin) jaksoihin ja ajettiin analysointiohjelman läpi. Analyysiohjelma ilmoittaa kapeakaistaisen tai impulssimaisen äänen sijaintikohdan äänitallenteessa, jonka jälkeen mittauksen äänitallenteesta tarkistetaan manuaalisesti, onko kapeakaistaisuus tai impulssimaisuus aiheutunut tuulivoimasta vai jostain muusta (esimerkiksi linnunlaulu tai tuulen häiriöääni mikrofoniin). VTT:n tutkimusraportin (Nykänen ym. 2014) mukaan impulssimaisuuden sanktiota määritettäessä tulisi ottaa huomioon 10 suurinta tuulivoiman aiheuttamaa impulssia ja niiden niin sanotun P-arvon (impulssimaisuuden ennakoitu merkittävyys) keskiarvo. Mittausjakson impulssimaisuuden ennakoitu merkittävyys P määritetään valitun impulssin perusteella kaavalla

$$P = 3 \times \log_{10} \left(\text{nousuaika} / \left[\frac{dB}{s} \right] \right) + 2 \times \log_{10}(\text{tasoero} / [dB]), \quad (11)$$

jossa nousuaika on impulssin nousunopeus (nousujan gradientti) ja tasoero on impulssin äänenpainetason nousu desibeleissä. Impulssilta edellytetään nousunopeuden olevan suurempi kuin 10 dB/s. (Nykänen ym. 2014, 8.)

P-arvoltaan suurimman tuulivoiman aiheuttaman impulssin perusteella määritetään liukuva sanktio K_i kaavalla

$$K_i = 1,8 \times (P - 5)dB, \text{ kun } P > 5 \quad (12)$$

$$K_i = 0 \text{ dB, kun } P \leq 5.$$

(Nykänen ym. 2014, 8.)

Äänitallenteessa on tavallisesti runsaasti myös muun kuin tuulivoiman aiheuttamia impulsseja. Tässä analysointitavassa niiden tunnistamista ja poissulkemista on olennaista jatkaa niin kauan, että voidaan varmistaa impulssimaisuuden ennakoitun merkittävyyden P olevan ≤ 5 . Tämän jälkeen mittauksen äänitallenteen analysointia ei ole syytä jatkaa, sillä liukuva sanktio K_i on automaattisesti 0 dB.

VTT:n tutkimusraportin (Nykänen ym. 2014, 11) mukaan tuulivoiman aiheuttaman kapeakaistaisuuden sanktio määräytyy ääneksien tai kapeakaistaisten äänikomponenttien kuultavuuden (ΔL_{ta}) mukaan. Kuultavuus ΔL_{ta} lasketaan kaavalla

$$\Delta L_{ta} = L_{pt} - L_{pn} + 2 + \log \left(1 + \left(\frac{f_c}{502} \right)^{2,5} \right), \text{ dB re MT}, \quad (13)$$

jossa L_{pt} on tonaalisten komponenttien kokonaistaso kriittisellä kaistalla, L_{pn} on peittoäänien taso kriittisellä kaistalla, f_c on kriittisen kaistan keskitaajuus ja MT on peittoäänien (masking threshold) taso. Mahdollinen sanktio k määräytyy suurimman tonaalisen komponentin ΔL_{ta} perusteella ja kaavoilla

$$k = 0 \text{ dB, kun } \Delta L_{\text{ta}} < 4 \text{ dB,} \quad (14)$$

$$k = \Delta L_{\text{ta}} - 4 \text{ dB, kun } 4 \text{ dB} \leq \Delta L_{\text{ta}} \leq 10 \text{ dB ja} \quad (15)$$

$$k = 6 \text{ dB, kun } \Delta L_{\text{ta}} > 10 \text{ dB.} \quad (16)$$

(Nykänen ym. 2014, 11.)

Kapeakaistaisen melun analyysissä on olennaista jatkaa analysointia niin kauan, että voidaan varmistaa, että mittausdatasta löytyvien kapeakaistaisten komponenttien aiheuttama sanktio k on 0. Tämä saavutetaan, kun mittauksen äänitallenteista tunnistetaan kapeakaistaisia komponentteja sisältävät äänet ja jätetään ne huomiotta, mikäli ne eivät ole tuulivoiman aiheuttamia. Tätä jatketaan niin kauan, että jäljelle jääneiden kapeakaistaisten äänien suurin tonaalinen komponentti ΔL_{ta} on alle 4 dB.

Impulssien ja kapeakaistaisten melun komponenttien aiheuttajien tunnistaminen äänitallenteesta on työlästä ja aikaa vievää. Näin ollen sekundäärituulisuojalla voidaan saavuttaa huomattavia hyötyjä tulosten käsittelyyn, jos tuulen aiheuttamat häiriöäänet mikrofoneihin osoittautuvat sisältävän impulssimaista tai kapeakaistaista melua.

Melun merkityksellisen sykinnän (amplitudimodulaatio) ja sen asteen (modulaatio-syvyys) määrittämiseen ei tällä hetkellä ole käytettävissä standardoitua menetelmää tai vertailuarvoa merkityksellisen sykinnän todentamiseksi (ympäristöministeriö 2014a, 25), minkä vuoksi tässä työssä on sivuutettu eri mittaustekniikoiden vaikutus tuulivoimamelun mahdolliseen amplitudimodulaatioon.

5.3 Tutkimusvaihtoehdot

Altistuvan kohteen mittauksissa tarkasteltiin altistuvaan kohteeseen kohdistuvia tuulivoimamelutasoja kolmella eri mittaustavalla:

- mittausmikrofoni sijoitettu 1,5 metrin korkeudelle ja varustettu mittarivalmistajan suosittelemalla primaarituulisuojalla
- mittausmikrofoni puisen levyn päällä maanpinnan tasolla varustettuna mittarivalmistajan suosittelemalla primaarituulisuojalla

- mittausmikrofoni puisen levyn päällä maanpinnan tasolla varustettuna mittarivalmistajan suosittelemalla primaarituulisuojoilla sekä itse tehdyllä sekundäärituulisuojoilla.

Eri mittaustapojen tuloksia tarkastellaan niin, että tulosten käsittely on tehty mittausdatoille, joista ei ole poistettu tuulen aiheuttamia häiriöääniä ja mittausdatoille, joista tuulen aiheuttamat häiriöäänit on poistettu. Tällä tavoin voidaan vertailla, miten tuulen mikrofoneihin aiheuttamat häiriöäänit saattavat vaikuttaa mittaustuloksiin. Tuulen aiheuttamat häiriöäänit poistetaan siitäkkin huolimatta, että poistamiseen liittyy oma epävarmuutensa. Häiriöääni tunnistetaan mittauksen äänitasokuvaajasta ja tarkistetaan äänitallenteesta kuuntelemalla, että äänitasossa näkyvä piikki johtuu tuulen osumisesta suoraan mikrofooniin eikä esimerkiksi muusta melutason äkillisestä noususta. Jos äänitason nousun ja laskun muodostama äänitason ”piikki” tunnistetaan tuulen aiheuttamaksi häiriöääniksi, se poistetaan tämän jälkeen mittauksen sekuntidatasta. Lopputuloksena tuulen aiheuttamien häiriöäänien lukumäärä ja ajallinen yhteiskesto raportoidaan. On hyvä huomioida, että tuulenpuuskan pitkittyessä häiriöäänikin saattaa olla useiden sekuntien mittainen.

Impulssimaisuuden ja kapeakaistaisuuden osalta arvioidaan erilaisten mittaustapojen vaikutusta mikrofoneihin syntyvien impulssien tai kapeakaistaisten äänien lukumäärään ja analysoinnin tehokkuuteen. Mittausdatasta halutaan tunnistaa nimenomaan tuulivoimalan aiheuttamat impulssit ja kapeakaistaiset äänet. Näin ollen kaikki muut impulssimaiset ja kapeakaistaiset äänet vaikeuttavat ja hidastavat mittausdatan analyysiä.

5.4 Mittausasetelma altistuvassa kohteessa

Sekundäärituulisuojan ominaisuuksia ja vaikutuksia mittaustuloksiin tutkittiin tuulivoimamelulle altistuvan asuinalueen ympäristömelumittauksella 4.–5.6.2018. Altistuvan asuinalueen piha-alueelle sijoitettiin kolme melumittaria (kuva 9) alueelle, joka edustaa mahdollisimman hyvin asuinalueen oleskelualueen melutasoja. Kuvan ottamisen jälkeen ilman sekundäärituulisuoja olevan mittauslevy korjattiin vaakatasoon.



KUVA 9. Kolmen ympäristömelumittarin asettelu altistuvan kohteen ympäristömelumittauksessa. Tuulivoimalan lapa puiden latvojen yläpuolella.

5.4.1 Sääolosuhteiden mittaus altistuvan kohteen mittauksessa

Sääolosuhteita mitattiin mittauspaikalla 10 metriä korkeaan mastoon (kuva 10) sijoitettulla Kestrel K4500 Pocket Weather© Tracker –sääasemalla. Mittaustiedot tallennettiin laitteen muistiin yhden minuutin jaksoissa. Tuulen nopeuden ja suunnan lisäksi mittalaitteella rekisteröitiin tiedot ilman lämpötilasta, suhteellisesta kosteudesta ja ilmanpaineesta.



KUVA 10. Säämaston altistuvan kohteen mittauspaikalla 4.-5.6.2018

5.5 Tuulivoimalan tiedot

Mittauksissa käytetyn tuulivoimalan valmistaja on Vestas. Voimalan generaattorin teho on 3,3–3,45 MW, napakorkeus 87 metriä ja roottorin halkaisija 126 metriä. Voimalan muille yksityiskohtaisille tiedoille ei ole julkaisulupaa. Altistuvan kohteen mittauspaikka sijaitsi noin 750 metrin etäisyydellä voimalasta. Sekä voimala, että mittauspiste sijaitsivat meren rannalla ja niiden välissä on merta, vaihtelevan korkuisia rantakallioita ja vaihtelevaa puustoa.

5.6 Mittausajankohta ja tuulivoimalan pysäytykset

Mittaukset toteutettiin 4.–5.6.2018 yhtäjaksoisesti aikavälillä 22:00–6:15. Voimala pysäytettiin tai se pysähtyi itsestään mittausten aikana jaksoilla 23:38–0:43, 1:01–1:04, 1:46–2:28 ja 3:59–4:43. Pysäytykset ajoitettiin yöaikaan, jotta ulkoisten häiriöäänten aiheuttamat vaikutukset olisivat mahdollisimman vähäiset ja inversion esiintyminen olisi todennäköisempää. Pysäytysten välissä voimala oli käynnissä normaalisti. Tulosten käsittelyssä on tarkasteltu kaikkia tuulivoimalan käynti- ja pysäytyshetkiä aikavälillä 22:00–6:15 Tuulivoimalan aiheuttama taustamelukorjattu keskiäänitaso on laskettu koko mittausjakson tuulivoimalan käyntihetkille.

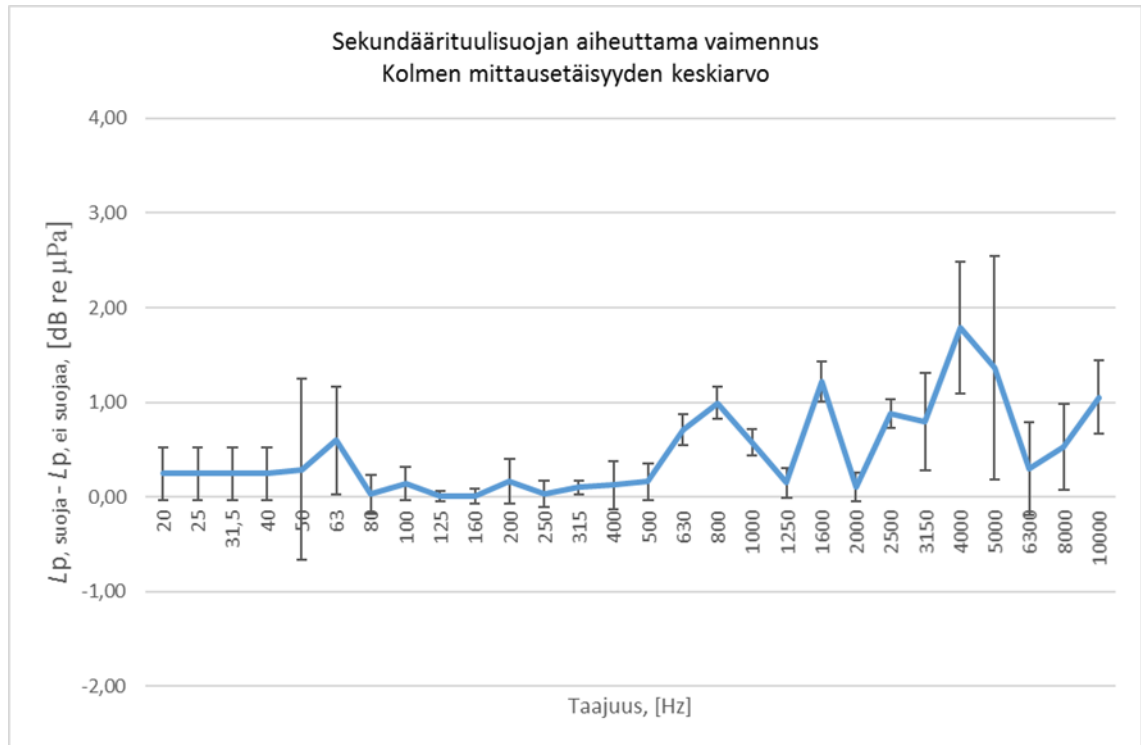
6 MITTAUSTULOKSET JA JOHTOPÄÄTÖKSET

6.1 Sekundäärituulisuojan ominaisuudet

1/3-oktaavikaistoista taajuudet 20, 25 ja 31,5 Hz eivät läpäisseet ehtoa, jonka mukaan taustamelutason ja kaiuttimen tuottaman tason erotuksen tulee olla yli 3 dB. Tästä syystä näille kaistoille ei voitu luotettavasti määrittää sekundäärituulisuojan aiheuttaman vaimennuksen määrää. Näiden kolmen taajuuskaistan vaimennuksen määränä on näin ollen käytetty taajuuskaistalle 40 Hz laskettua vaimennusta. IEC 61400-11 3.0 standardin (2012, 50) mukaan alle 100 Hz taajuuskaistoille on mahdollista käyttää taajuuskaistalle 125 Hz laskettua vaimennusta, jos taustamelu estää vaimennuksen määrittämisen. Taajuuskaistoille 20 Hz, 25 Hz ja 31,4 Hz on käytetty taajuuskaista 40 Hz tulosta, koska 40 Hz oli alin taajuus, jolle tulos pystyttiin taustamelun vuoksi määrittämään. Sekundäärituulisuojaalle määritetyt vaimennukset ja vaimennuksien keskihajonta on esitetty alla (taulukko 8 ja kuvio 4).

TAULUKKO 8. Rakennetulle sekundäärituulisuojaalle määritetyt vaimennukset ja vaimennuksien keskihajonnat 1/3-oktaavikaistoittain

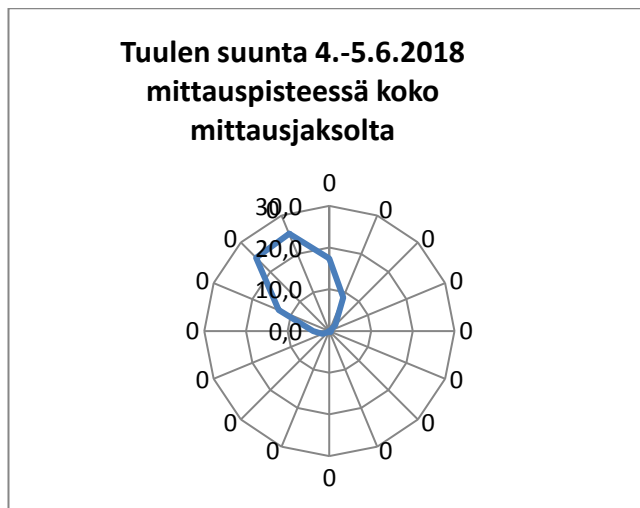
1/3-oktaavikaista, Hz	Sekundäärituulisuojan aiheuttama vaimennus, dB	Keskihajonta, dB	1/3-oktaavikaista, Hz	Sekundäärituulisuojan aiheuttama vaimennus, dB	Keskihajonta, dB
20	0,25	0,3	500	0,16	0,2
25	0,25	0,3	630	0,71	0,2
31,5	0,25	0,3	800	0,99	0,2
40	0,25	0,3	1 000	0,58	0,1
50	0,29	1,0	1 250	0,15	0,2
63	0,60	0,6	1 600	1,22	0,2
80	0,03	0,2	2 000	0,11	0,2
100	0,14	0,2	2 500	0,88	0,1
125	0,01	0,1	3 150	0,79	0,5
160	0,01	0,1	4 000	1,79	0,7
200	0,16	0,2	5 000	1,36	1,2
250	0,03	0,1	6 300	0,30	0,5
315	0,10	0,1	8 000	0,53	0,5
400	0,13	0,3	10 000	1,05	0,4



KUVIO 4. Sekundäärituulisuojan aiheuttama äänitasojen vaimennus 1/3-oktaavikaisesti

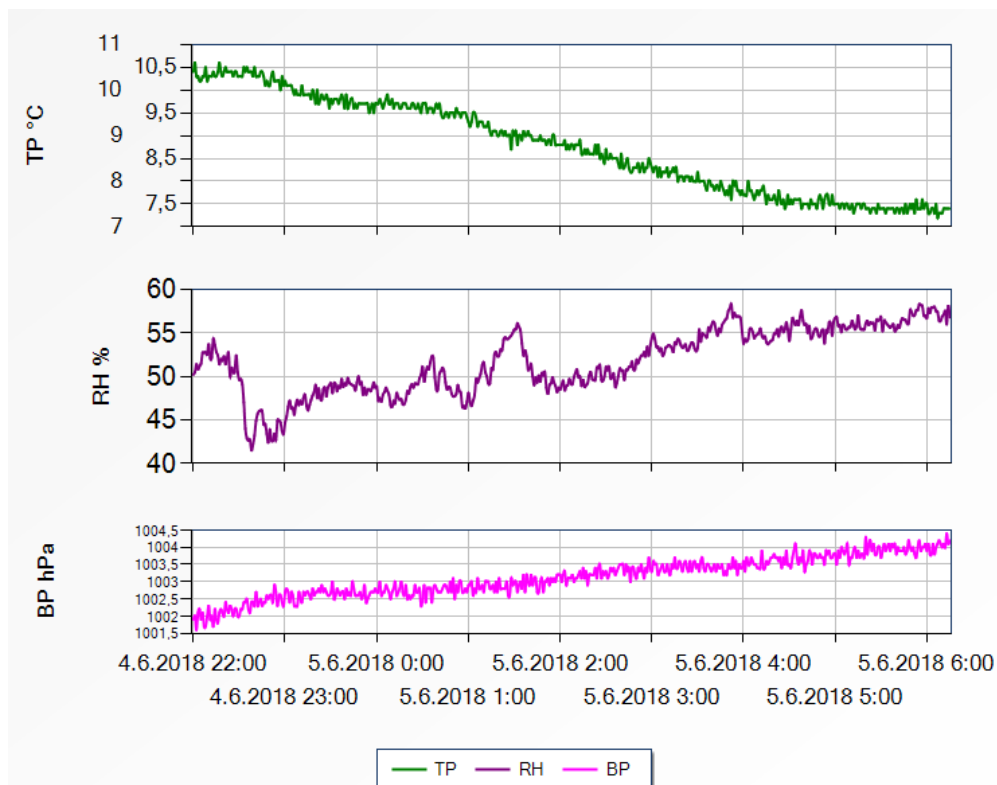
6.2 Altistuvan kohteen mittauksen sääolosuhteet ja voimalan tehontuotto

Mittauspaikalla vallitseva tuulen suunta oli suurimmaksi osaksi luode-pohjoisluode (kuvio 5), mikä pääsääntöisesti täyttää mittausohjeen vaatimuksen siitä, että tuulen suunnan pitää olla ± 45 asteen sektorissa tuulivoimalasta mittauspisteeseen päin (ympäristöministeriö 2014a, 19). Mittausdatasta poistettiin sektorin ulkopuolelle jäävän tuulen suunnan vuoksi 7 minuuttia mittausdataa.



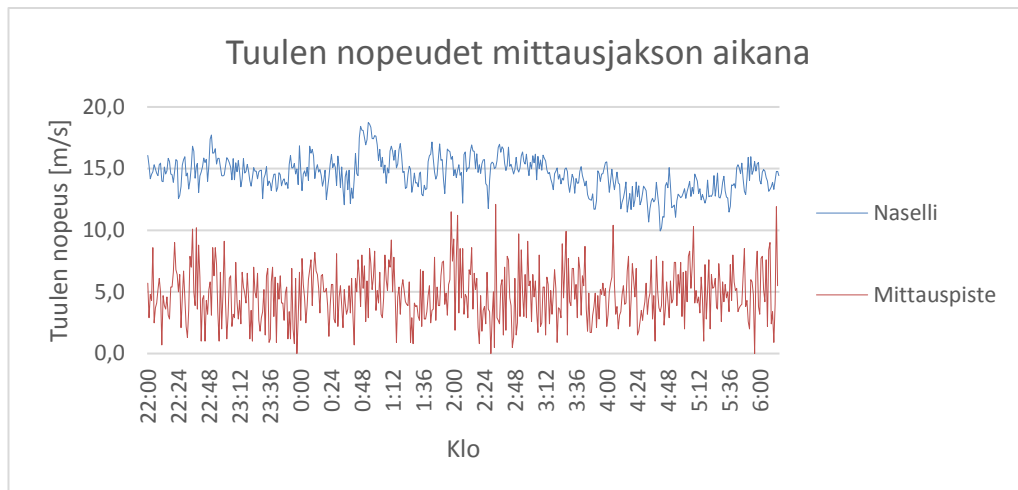
KUVIO 5. Tuulen suunta altistuvassa kohteessa

Mittausten aikana ilman lämpötila oli 7–11 °C, suhteellinen kosteus 40–60 % ja ilmanpaine 1001,5–1005,5 hPa (kuvio 6). Lämpötilan, suhteellisen kosteuden ja ilmanpaineen voidaan katsoa olleen mittausten aikana soveltuvat melun mittaamiseen tuulivoimamelle altistuvassa kohteessa.

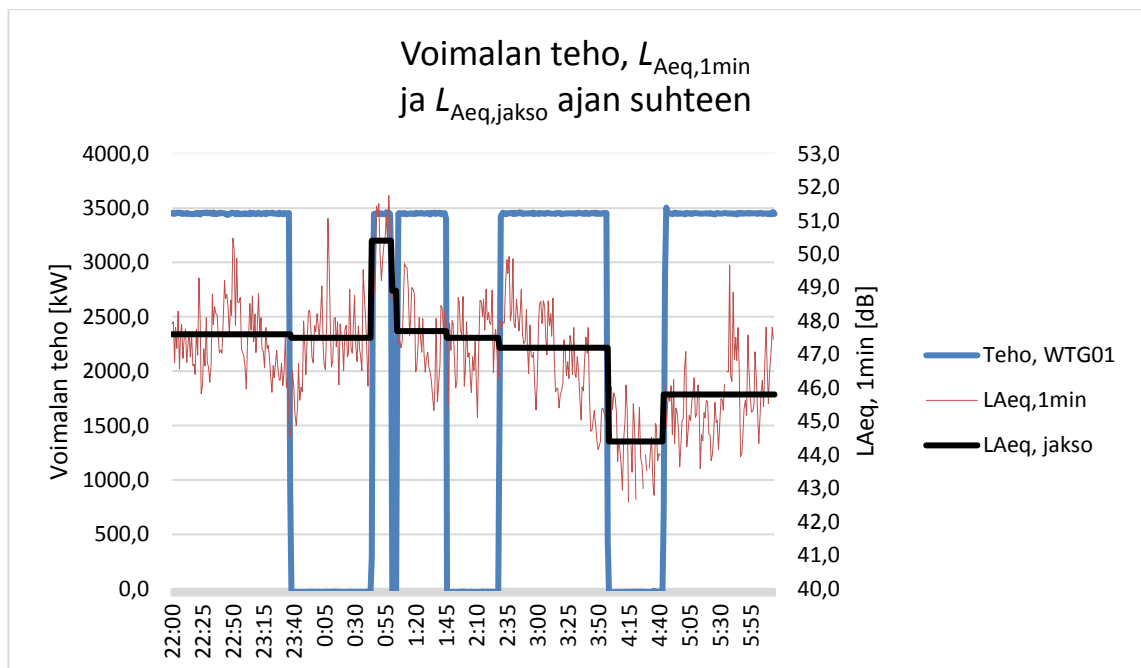


KUVIO 6. Mittausjakson aikainen lämpötila, suhteellinen ilmankosteus ja ilmanpaine mittauspaikalla

Mittauksen aikana vallinnut tuuli (kuvio 7) oli voimakkuudeltaan niin suuri, että tuulivoimala kävi pysäytyksiä ja niihin liittyviä käynnistys- ja sammutushetkiä lukuun ottamatta koko mittausjakson ajan täydellä teholla (kuvio 8). Voimalan tehontuotto korreloi mittausjakson aikana pääosin heikosti mittauspaikalla mitattuihin minuutin keskiäänitasoihin ja pysäytys- ja käyntijaksojen keskiäänitasoihin. Selvimmät korrelaatiot keskiäänitasojen ja voimalan käymisen välillä on nähtävissä vähän ennen klo 1:00 ja noin klo 4:00 jälkeen (kuvio 7).



KUVIO 7. Tuulivoimalan nasellista ja mittauspaikalla mitattu tuulen nopeus mittausjakson aikana



KUVIO 8. Voimalan tehontuotto sekä mittauspaikan minuutin ja pysäytys- ja käyntijaksojen keskiäänitasot mittausjakson aikana

6.2.1 Mittausdatan häiriöäänät

Mittaustuloksien sekuntidatasta poistettiin aluksi häiriöäänät (ihmisen puhe, mittaajan aiheuttamat äänet mittauspaikalla jne.). Linnunlaulua ja tuulen mukana liikkuvien irtokaislojen ja maa-aineksien aiheuttamia ääniä ei ole poistettu. Yhteensä mitaustuloksista poistettiin 210 sekunnin havaintoa. Tämä tehtiin kaikille kolmelle mitaustavalle.

Edellä mainittujen häiriöäänien lisäksi mikrofoneihin häiriöääniä aiheutti tuuli. Tyypillisesti tuulen aiheuttamien häiriöäänien poisto on yhtä haastavaa tai jopa haastavampaa kuin linnunlaulun poistaminen. Tästä huolimatta kaikkien kolmen mitaustavan tulokset on käsitelty niin, että tuulen aiheuttamia häiriöääniä ei ole poistettu ja niin, että tuulen aiheuttamat häiriöäänät on poistettu mahdollisimman hyvin. Sekundäärituulisuojan päätarkoitus on vähentää juuri näitä tuulen häiriöääniä mikrofoneissa ja tästä syystä karkean vertailun tekemiseksi häiriöääniä on yritetty poistaa. Sekundäärituulisuojan vaikutus on häiriöäänten lukumäärästä ja ajallisista kestoista selvästi nähtävissä (taulukko 9). Häiriöt on poistettu mitausten sekuntidatasta, minkä seurauksena häiriöäänten lukumäärä ei ole sama kuin niiden ajallinen kesto sekunteina.

TAULUKKO 9. Tuulen mikrofoneihin aiheuttamien häiriöäänten lukumäärä ja ajallinen kesto.

Mittaustapa	Häiriöäänten lukumäärä	Häiriöäänten ajallinen kesto
Levy + sekundäärituulisuoja	54	7 min 18 s
Levy	900	1 h 53 min 2 s
Jalusta	1002	2 h 15 min 42 s

Levyttä ilman sekundäärituulisuojaa mitattaessa mitaustataa on poistettu vähän alle kaksi tuntia ja jalustalta mitattaessa noin kaksi tuntia ja 15 minuuttia. Kun otetaan huomioon mitausten ajallinen kesto 8 h 15 min, niin tuulen aiheuttamien häiriöäänten määrää voidaan pitää merkittävänä. Toinen oleellinen seikka häiriöäänten lukumäärässä on työmäärä, joka jouduttaisiin käyttämään häiriöäänten poistamiseksi. Tässä työssä tuulen häiriöäänten etsimiseen ja poistamiseen käytettiin noin 30 työtuntia ja koska tuulivoiman melumittaukset lähtökohtaisesti suoritetaan tarjouskilpailun jälkeen, ei voida olettaa, että yhteenkään mitaustavalle olisi mahdollista sisällyttää tällaista työmäärää. Tämän lisäksi tulee ottaa huomioon, että tuuli saattaa aiheuttaa mikrofoneihin häiriöääntä, joka

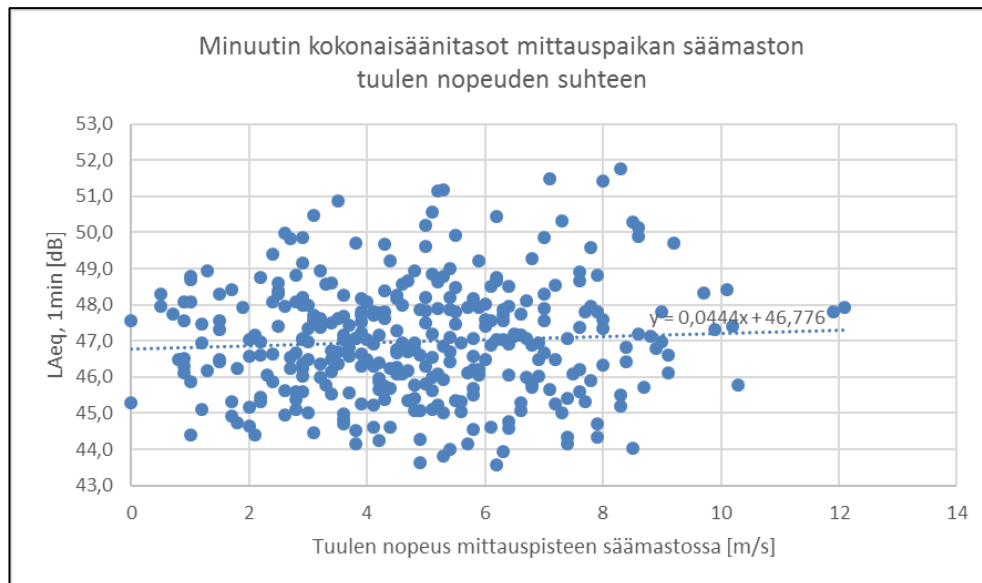
vaikuttaa äänitasoihin, mutta ei kuulu äänitallenteessa. Tässä piileekin tuulen aiheuttamien häiriöäänten poistamisen riski, sillä todennäköisesti kaikkia häiriöääniä ei ole onnistuttu poistamaan. Tämän vuoksi tuulen mikrofoneihin aiheuttamien häiriöäänten lukumääriä tulisi pyrkiä estämään sekundäärituulisuojaa tai, jos mahdollista, muuta tapaa käyttäen. Kuitenkin, sekundäärituulisuojan voidaan katsoa merkittävästi vähentäneen tuulen aiheuttamia häiriöääniä verrattuna mittauksiin ilman sekundäärituulisuojaa.

6.2.2 Kokonais- ja taustamelutasojen kuvaajat

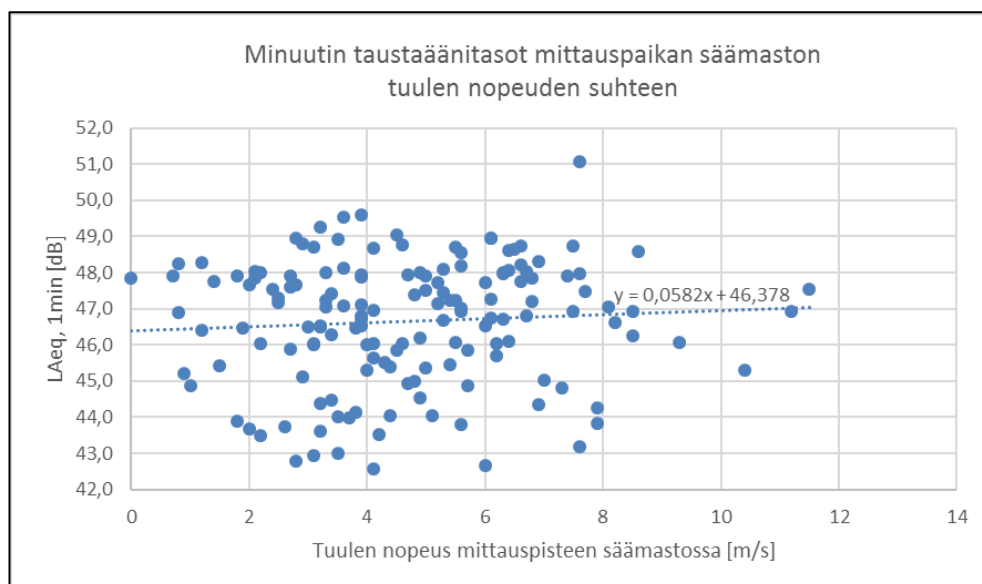
Mittausdatasta muodostettiin kokonaismelutasojen ja taustamelutasojen minuutin A-painotettujen keskiäänitasojen kuvaajat mittauspaikan tuulen nopeuden suhteen. Nämä kuvaajat on määritetty jokaiselle eri mittaustavalle. Mittauslevyn ja sekundäärituulisuojan tuloksista on määritetty kuvaajat tuulen häiriöäänten poistamisen jälkeen. Ilman sekundäärituulisuojaa olleen mittauslevyn ja jalustan tuloksista on määritetty kuvaajat sekä ennen, että jälkeen tuulen häiriöäänten poistamisen, jotta häiriöäänten merkitys lopputulokseen olisi konkreettisemmin ymmärrettävissä. Jokaisessa näissä tulosten käsittely on tehty koko mittausjaksolle klo 22:00–6:15.

Sekundäärituulisuojan ja mittauslevyn tulosten kokonais- ja taustaäänitasojen minuutin keskiäänitasokuvaajat on esitetty alla (kuvio 9 ja kuvio 10). Näistä tuloksista ei vielä ole poistettu tuulen mikrofoniin aiheuttamia häiriöääniä. Muiden tulosten käsittelyvaihtoehtojen vastaavat kuvaajat on esitetty liitteissä 1–5. Sekundäärituulisuojalla tehdyn mittauksen kokonais- ja taustaäänitasot korreloivat heikosti mittauspaikan tuulen nopeuden suhteen, mutta kuitenkin niin, että tuulen voimistuessa myös äänitasot voimistuvat (kuvio 7 ja kuvio 8). Sekundäärituulisuojan kanssa tehdyn mittauksen kokonais- ja taustaäänitasot eivät juurikaan muuttuneet tuulen mikrofoniin aiheuttamien häiriöäänten poistamisen jälkeen (liite 1). Mittauslevyltä ilman sekundäärituulisuojaa tehdyn mittauksen kokonais- ja taustaäänitasot ovat selvästi suurempia ennen tuulen aiheuttamien häiriöäänten poistamista (liite 2), mutta häiriöäänten poistamisen jälkeen ne ovat hyvin lähellä sekundäärituulisuojalla tehdyn mittauksen kuvaajia (liite 3). Jalustalta tehdyn mittauksen kokonais- ja taustaäänitasojen kuvaajat eroavat selvemmin kahdesta muusta mittaustavasta sekä ennen tuulen mikrofoniin aiheuttamien häiriöäänten poistoa, että niiden jälkeen (liitteet 4 ja 5). Jalustalla tehdyn mittauksen tuulen mikrofoniin aiheuttamien häiriöäänten poistami-

nen ei tuottanut samaa tulosta kuin levyttä ilman sekundäärituulisuojaa tehdyssä mittauksessa, joten tuloksista voidaan päätellä, että tuulen häiriöääniä ei todennäköisesti ole onnistuneesti kokonaan poistettu ja ne vaikuttavat edelleen kokonais- ja taustäänitasoihin.



KUVIO 9. Mittauspisteessä sekundäärituulisuojan kanssa mitatut minuutin A-painotetut keskiäänitasot tuulivoimalan käydessä. Tuulen häiriöääniä ei ole poistettu



KUVIO 10. Mittauspisteessä sekundäärituulisuojan kanssa mitatut minuutin A-painotetut keskiäänitasot tuulivoimalan ollessa pysäytettynä. Tuulen häiriöääniä ei ole poistettu

Kaikissa mittauksissa sekä kokonais- että taustäänitasot korreloivat verrattain heikosti tuulen nopeuden kanssa, mikä on tuulivoimamelumittauksille usein epätyypillistä, sillä

pääsääntöisesti ainakin taustamelutason pitäisi selvästi kasvaa tuulen nopeuden kasvaessa. Altistuvan kohteen mittaukset on kuitenkin tehty meren rannalla, minkä pääteltiin aiheuttavan taustamelun verrattain korkean, ja mittauspaikan tuulen nopeudesta riippumattoman, tason pienilläkin tuulen nopeuksilla.

6.2.3 Muodostetut taustamelutasot

Kuten aiemmin todettiin, tuulivoimalan aiheuttama melutaso voi olla jopa pienempi kuin kyseiselle jaksolle laskennallisesti muodostettu taustamelutaso. Muodostetuista taustamelukorjatuista melutasoista on poistettu nämä minuutit, jolloin laskennallisesti muodostettu taustamelutaso on ollut kokonaismelutasoa suurempi (taulukko 10). Kaikkien mittaustapojen osalta poistettujen havaintojen osuus on tuulivoimamelumittauksille tavallinen ja tuulen häiriöäänten poistaminen ei olennaisesti muuta poistettujen havaintojen osuutta, kun suurin muutos on mittauslevyltä tehdyn mittauksen poistettujen havaintojen määrän putoaminen 7 %:lla (taulukko 10).

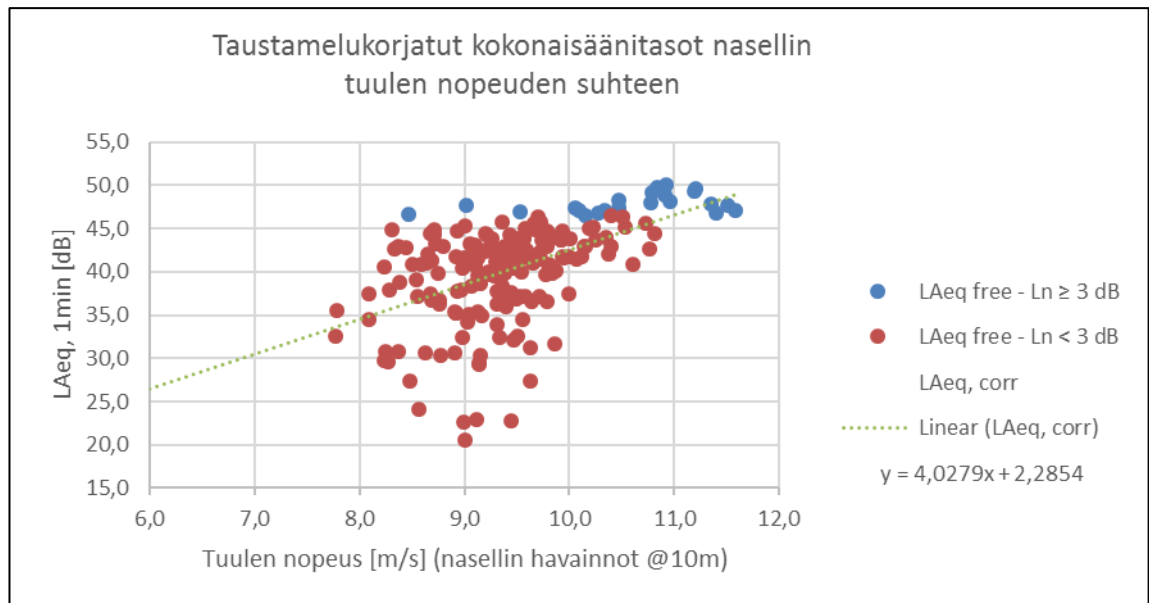
TAULUKKO 10. Poistettujen minuutin keskiäänitasojen prosenttiosuus kaikista minuutin kokonaisäänitasohavainnoista. Poisto on tehty, kun määritetty taustamelutaso on suurempi kuin mitattu minuutin kokonaisäänitaso

Mittaus	Taustamelutaso > tuulivoimalan taustamelukorjattu melutaso (%-osuus minuutin havainnoista)	
	Tuulen häiriöääniä ei poistettu	Tuulen häiriöäänit poistettu
Mittauslevy + sekundäärituulisuoja	42	43
Mittauslevy	51	44
Jalusta	46	43

6.2.4 Tuulivoimalan aiheuttamat taustamelukorjatut äänitasot

Sekundäärituulisuojaalla tehdyn mittauksen jäljelle jääneet taustamelukorjatut kokonaisäänitasot taulukoitiin tuulivoimalan nasellista mitattuun ja 10 metrin korkeuteen muutettuun tuulen nopeuteen (kuvio 11). Tästä kuvaajasta tuulen mikrofoniin aiheuttamia häiriöääniä ei vielä ole poistettu. Sinisellä on merkitty havainnot, joissa taustamelukorjattu kokonaisäänitaso on ollut vähintään 3 dB suurempi kuin kyseiselle minuutille määritetty

taustamelutaso. Punaisella on merkitty havainnot, joissa vastaava erotus on ollut alle 3 dB. Sekundäärituulisuojalla tehdyn mittauksen häiriöäänten poistamisen jälkeen tehty vastaava kuvaaja on esitetty liitteessä 1. Muiden mittaustapojen vastaavat kuvaajat on esitetty liitteissä 2–5.



KUVIO 11. Tuulivoimalan aiheuttamat taustamelukorjatut kokonaisäänitasot koko mittausjaksolta tuulen nopeuden suhteen

Tuulivoimamelun mittausohjeen (ympäristöministeriö 2014a, 21) mukaisesti tuloksiin on merkitty, kun tuulivoimalan ja taustamelun yhdessä aiheuttama melutaso (mitattu arvo) on ≥ 3 dB suurempi kuin keskimääräinen taustamelutaso kullakin tuulen nopeusalueella. Näitä tuloksia voidaan pitää tuulivoimalan aiheuttamana melutasona, kun taas erotuksen ollessa alle 3 dB, voidaan tulosta pitää tuulivoimalan tuottaman melutason ylärajana. Mittausohje ei kuitenkaan määrittele, mikä osuus havainnoista tulisi olla ≥ 3 dB, jotta regressiosuoralta voitaisiin lukea tuulivoimalan aiheuttama taustamelukorjattu melutaso (eikä vain sen ylärajaa). $L_{Aeq, free} - L_n$ erotuksen tulosta voidaan kuitenkin käyttää erilaisten mittaustapojen vertailussa: mitä enemmän 3 dB ylittäviä tuloksia on, sitä todennäköisemmin saatu tulos on tuulivoimalan aiheuttama melutaso. Saadut tulokset on esitetty taulukossa 11. Sekundäärituulisuojalla tehdyn mittauksen $L_{Aeq, free} - L_n \geq 3$ dB -havaintojen osuus pienenee lievästi tuulen häiriöäänten poistamisen jälkeen. Mittauslevyltä ilman sekundäärituulisuojaa tehdyn mittauksen vastaava prosenttiosuus laskee 20,3 % tuulen häiriöäänten poistamisen jälkeen, kun taas jalustalta tehdyn mittauksen vastaavien havaintojen osuus kasvaa 6,7 % tuulen häiriöäänten poistamisen jälkeen.

TAULUKKO 11. $L_{Aeq, free} - L_n \geq 3$ dB havaintojen prosenttiosuus kaikista minuutin taustamelukorjatuista tasoista.

Mittaus	$L_{Aeq, free} - L_n \geq 3$ dB minuuttihavaintojen osuus kaikista minuuttihavainnoista, joissa $L_{Aeq, free} > L_n$ (%)	
	Tuulen häiriöääniä ei poistettu	Tuulen häiriöäänät poistettu
Mittauslevy + sekundäärituulisuoja	11,2	10,0
Mittauslevy	31,9	11,6
Jalusta	2,7	9,4

Tuloksia tarkastellessa on hyvä huomioda, että ennen tuulen häiriöäänien poistoa tehdyn tulosten käsittelyn suuri prosenttiosuus ei välttämättä takaa tuloksen ”laatua”, vaan se saattaa johtua häiriöäänien aiheuttamista korkeista kokonaismelutasoista. Lisäksi tuulen mikrofoneihin aiheuttamien häiriöäänien vääristämät taustamelutasot saattavat olla virheellisiä ja niiden perusteella muodostettu tuulen nopeudesta riippuvainen taustamelutasokaava on myös virheellinen. Näistä molemmista seuraa virheellisiä lopputuloksia, kun kokonaisäänitasoja ja taustäänitasoja vähennetään toisistaan.

Kuvion 9 regressiosuoran kaavan avulla voidaan laskea tuulivoimalan aiheuttama taustamelukorjattu kokonaisäänitaso halutulla tuulen nopeudella. Sekundäärituulisuojalla tehdyn mittauksen pyöristetyt tulokset on esitetty taulukossa 12. Mittauslevyltä sekundäärituulisuojan kanssa mitattaessa tuulivoimalan aiheuttamaksi taustamelukorjatuksi melutasoksi 8 m/s tuulen nopeudella saatiin 35 dB sekä ennen, että jälkeen tuulen mikrofoniin aiheuttamien häiriöäänien poistoa. Mittauslevyltä ilman sekundäärituulisuojaa tehdyn mittauksen tulokset muuttuvat selvästi tuulen mikrofoniin aiheuttamien häiriöäänien poistamisen jälkeen (taulukko 13). Ennen häiriöäänien poistamista 8 m/s tuulen nopeudella tulokseksi saadaan 43 dB, mutta häiriöäänien poistamisen jälkeen 35 dB, joka on sama kuin sekundäärituulisuojalla tehdyn mittauksen tulokset. Jalustalla tehdyn mittauksen tuulen nopeudella 8 m/s saatavat tulokset eivät tuulen häiriöäänien poistamisen jälkeen muutu (taulukko 14). Molemmilla analyysitavoilla tulokseksi saadaan 39 dB, joka on 4 dB suurempi kuin sekundäärituulisuojalla tehdyn mittauksen tulos ja mittauslevyllä ilman sekundäärituulisuojaa tehdyn mittauksen tulos tuulen häiriöäänien poistamisen jälkeen. Syytä tähän jalustalta tehdyn mittauksen suurempaan tulokseen on vaikea arvioida varmaksi, mutta todennäköisin lienee se, että mittaus sisältää runsaasti matalataajuisia tuulen häiriöääntä, jota ei tämän opinnäytetyön puitteissa ole mahdollista lähteä analysoimaan ja poistamaan.

TAULUKKO 12. Tuulivoimalan aiheuttamat taustamelukorjatut kokonaisäänitasot tuulen eri nopeusluokille, kun mittaus on tehty mittauslevyä ja sekundäärituulisuojaa käyttäen

Tuulen nopeus (m/s)					
6	7	8	9	10	11
Tuulen aiheuttamia häiriöääniä ei poistettu					
26	30	35	39	43	47
Tuulen aiheuttamat häiriöäänit poistettu					
27	31	35	39	43	47

TAULUKKO 13. Tuulivoimalan aiheuttamat taustamelukorjatut kokonaisäänitasot tuulen eri nopeusluokille, kun mittaus on tehty mittauslevyä käyttäen

Tuulen nopeus (m/s)					
6	7	8	9	10	11
Tuulen aiheuttamia häiriöääniä ei poistettu					
41	42	43	44	45	46
Tuulen aiheuttamat häiriöäänit poistettu					
28	32	35	39	42	46

TAULUKKO 14. Tuulivoimalan aiheuttamat taustamelukorjatut kokonaisäänitasot tuulen eri nopeusluokille, kun mittaus on tehty 1,5 metrin korkuista jalustaa käyttäen

Tuulen nopeus (m/s)					
6	7	8	9	10	11
Tuulen aiheuttamia häiriöääniä ei poistettu					
32	35	39	43	46	50
Tuulen aiheuttamat häiriöäänit poistettu					
33	36	39	42	45	48

6.3 Impulssimaisuus ja kapeakaistaisuus

Mittausdatoille tehtiin kaksi erilaista kapeakaistaisuuden ja impulssimaisuuden analyysiä: ympäristömelun mittausohjeen (1995) mukaiset analyysit sekä tuulivoimamelulle altistuvan kohteen mittausohjeen (ympäristöministeriö 2014a, 24–26) mukaiset analyysit. Tuulivoimamelulle altistuvan kohteen mittausohjeessa nimetyt analyysit on tarkemmin

eritelty VTT:n tutkimusraportissa (Nykänen ym. 2014), jossa esitettyjä analyysyjä on käytetty tämän työn kapeakaistaisuuden ja impulssimaisuuden pohjana.

6.3.1 Ympäristöministeriön ympäristömelun mittausohjeen mukainen tulosten käsittely

Taulukossa 15 on esitetty impulssimaisten ja kapeakaistaisten havaintojen osuus mittausdatasta tuulivoimalan käyntijaksojen aikana, kun analyysi on tehty ympäristömelun mittausohjeen (ympäristöministeriö 1995) mukaisesti.

TAULUKKO 15. Kapeakaistaisten ja impulssimaisten sekunnin havaintojen osuus kaikista tuulivoimalan käyntijaksojen havainnoista

Mittaus	Havaintojen osuus tuulivoimalan käyntiaikojen havainnoista, %	
	Kapeakaistaisuus	Impulssimaisuus
Jalusta	1 %	10 %
Mittauslevy	1 %	9 %
Mittauslevy + sekundäärituulisuoja	1 %	1 %

Kapeakaistaisten havaintojen osuus on mittaustavasta riippumatta 1 % kaikista tuulivoimalan käyntijaksojen sekuntihavainnoista. Kaikilla kolmella mittaustavalla näistä havainnoista suurin osa painottuu oktaavikaistalle 4kHz: jalustan kanssa 64%, mittauslevyn kanssa 60% ja mittauslevyn ja sekundäärituulisuojan kanssa 76%. 4 kHz:n oktaavikaistan kapeakaistaisia havaintoja ei voida pitää tuulivoimalan aiheuttamina, sillä mittausdatasta tehtyjen havaintojen perusteella tuulivoimalan aiheuttama melu erottuu mittaustaikalla vain noin 3 kHz:n taajuuteen asti, ja näin ollen voidaan todeta, että mittaustekniikalla ei ole merkitystä kapeakaistaisten havaintojen määrään ja että tuulivoimalan aiheuttamaa melua ei voida pitää kapeakaistaisena.

Impulssimaisiin havaintoihin mittaustavalla on merkitystä. Mittauslevyn ja sekundäärituulisuojan kanssa mittauksen sekuntihavainnoista 1 % todettiin impulssimaiseksi, kun taas mittauslevyn ja jalustan mittausten kanssa vastaavat prosenttiosuudet olivat 9 % ja 10 %. Mittauslevyn ja sekundäärituulisuojan 1 %:n määrää voidaan pitää havainnoista niin pienenä osuutena, että tuulivoimalan aiheuttamaa melua ei voida pitää impulssimai-

sena varsinkin, kun otetaan huomioon, että sekundäärituulisuojakaan ei suojannut mikrofonia kaikilta tuulenpuuskilta ja mikrofonin aiheutui jonkin verran häiriöääniä. Taulukosta 15 voidaan nimenomaan päätellä, että tuulen vaikutukset ovat merkittävä häiriötekijä melun impulssimaisuuden määrittämisessä. Mitattaessa monella eri mittaustavalla samalla kertaa tämä ero voidaan todeta helposti, mutta jos altistuvan kohteen mittaus olisi suoritettu vain mittaustavalla (ilman sekundäärituulisuojaa) ja/tai jalustan kanssa, lopputuloksesta ei voitaisi päätellä, mikä impulssimaiset havainnot on aiheuttanut. Tämä mittaustavan analyysi antaa jokaiselle sekunnin havainnolle tuloksen impulssimaisuudesta (kyllä tai ei), joten teoriassa impulssimaisia havaintoja voidaan äänitallenteen avulla tunnistaa. Sekunnin kokonaisäänitasohavaintojen lukumäärä on noin 19900 ja tästä luvusta taulukon 15 mukaiset prosenttiosuudet ovat impulssimaisia.

6.3.2 VTT:n tutkimusraportin mukainen tulosten käsittely

Tuulivoimamelun altistuvan kohteen mittaushjeen (ympäristöministeriö 2014a) ja VTT:n tutkimusraportin (Nykänen ym. 2014) perusteella tehtyjen analyysien perusteella tuulivoimalan käyntijaksojen aikaisista äänitallenteista ei löytynyt kapeakaistaisia komponentteja, jotka aiheuttaisivat lopulliseen mittaustulokseen sanktioita. Näin ollen eri mittaustapojen mittaustuloksissa ei löydetty eroja kapeakaistaisuuden suhteen, joten voidaan todeta, että sekundäärituulisuojan käyttämisellä ei ole merkitystä kapeakaistaisuuden analyysin kanssa.

Taulukossa 16 on esitetty VTT:n tutkimusraportin (Nykänen ym. 2014) mukaisen analyysin tulokset sekundäärituulisuojan kanssa tehdystä mittauksesta. Analyysi on tehty aikavälillä 23:07–5:14 tutkimusraportin mukaisesti äänitallenteen 30 minuutin pituisille jaksoille. Analyysiohjelman ilmoittamat häiritsevyydeltään sanktiota aiheuttavat impulssit tunnistettiin mittauksen äänitallenteesta ei-tuulivoimalan aiheuttamiksi, minkä seurauksena opinnäytetyön altistuvan kohteen mittausten perusteella kyseisen tuulivoimalan melua ei voida pitää mittaustavalle impulssimaisena.

TAULUKKO 16. Sekundäärituulisuojan kanssa tehdyn mittauksen äänitallenteen impulssimaisuuden analyysin tulokset

<p><u>Klo 23:07 – 23:37</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Sekundäärituulisuojan äänitallenteessa 19 impulssia, joista yksikään ei ollut tuulivoimalan aiheuttama, joten sanktio on 0 dB.
<p><u>Klo 0:44 – 1:00 ja 1:05-1:15</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Sekundäärituulisuojalla tehdyn mittauksen äänitallenteessa 23 suurinta impulssia jonkin muun kuin tuulivoimalan aiheuttamia. Seuraavien 10 suurimman impulssin häiritsevyys < 5, joten sanktio on näin ollen 0 dB.
<p><u>Klo 1:15 – 1:45</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Sekundäärituulisuojalla tehdyn mittauksen äänitallenteessa kaksi suurinta impulssia irtokaislojen ääntä. Seuraavien 10 suurimman impulssin häiritsevyys < 5, joten sanktio on näin ollen 0 dB.
<p><u>Klo 2:29 – 2:59</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Sekundäärituulisuojalla tehdyn mittauksen äänitallenteessa 19 suurinta impulssia jonkin muun kuin tuulivoimalan aiheuttamia. Seuraavien 10 suurimman impulssin häiritsevyys < 5, joten sanktio on näin ollen 0 dB.
<p><u>Klo 2:59 – 3:29</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Sekundäärituulisuojalla tehdyn mittauksen äänitallenteessa 24 suurinta impulssia jonkin muun kuin tuulivoimalan aiheuttamia. Seuraavien 10 suurimman impulssin häiritsevyys < 5, joten sanktio on näin ollen 0 dB.
<p><u>Klo 3:29 – 3:58</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Sekundäärituulisuojalla tehdyn mittauksen äänitallenteessa 31 suurinta impulssia jonkin muun kuin tuulivoimalan aiheuttamia. Seuraavien 10 suurimman impulssin häiritsevyys < 5, joten sanktio on näin ollen 0 dB.
<p><u>Klo 4:44 – 5:14</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Sekundäärituulisuojalla tehdyn mittauksen äänitallenteessa 35 suurinta impulssia jonkin muun kuin tuulivoimalan aiheuttamia. Seuraavien 10 suurimman impulssin häiritsevyys < 5, joten sanktio on näin ollen 0 dB.

Taulukossa 17 on esitetty mittauslevyltä ilman sekundäärituulisuojaa ja jalustalta tehtyjen mittausten impulssimaisuusanalyysin tulokset. Sekundäärituulisuojalla tehdyn mittauksen äänitallenteen analyysin perusteella voitiin jo varmistaa, että tuulivoimalan aiheuttama melu ei mittausjakson aikana ole mittauspaikalla impulssimaista, joten kahden muun mittaustavan analyysiksi riittää todeta, mikä määrä impulsseja pitää äänitallenteista

jättää huomiotta, jotta häiritsevyys tippuu niin pieneksi, että sanktio on myös näissä analyysissä 0 dB. Tämä määrä impulsseja on se, joka äänitallenteista pitäisi tunnistaa, jos mittaustapana olisi käytetty vain levyä ilman sekundäärituulisuojaa tai jalustaa.

TAULUKKO 17. Levyltä ilman sekundäärituulisuojaa ja jalustalta tehtyjen mittausten äänitallenteiden sanktiota aiheuttavien impulssien lukumäärät

Tarkasteluajan- kohta, kellonaika	Impulssit, joiden poistamisen jälkeen jäljelle jääneiden impulssien häiritsevyys on < 5 ja sanktio näin ollen 0 dB [kpl]	
	Levy ilman sekundäärituulisuojaa	Jalusta
23:07-23:37	171	192
0:44-1:00 ja 1:05-1:15	343	317
1:15-1:45	170	159
2:29-2:59	169	183
2:59-3:29	178	180
3:29-3:58	146	162
4:44-5:14	236	219

Karkeasti ilmaistuna mittauslevyn ja jalustan äänitallenteet sisälsivät impulsseja noin kymmenkertaisen määrän mittauslevyltä sekundäärituulisuojan kanssa tehtyyn mittaukseen verrattuna. Samansuuntaisen tuloksen antoi myös ympäristömelun mittausohjeen mukainen analyysi (luku 9.3.1), joka omalta osaltaan parantaa tuloksen luotettavuutta.

7 EPÄVARMUUSTARKASTELU

7.1.1 Sekundäärituulisuojan ominaisuuksien määrittäminen epävarmuus

Sekundäärituulisuojan valmistuksen lähtötietomateriaalina käytetty IEC-61400-11 3.0 standardi (2012) ei ota kantaa sekundäärituulisuojalle määritettävän taajuusvasteen vaikutuksen epävarmuuden määrittämiseen. Yksittäisten taajuuksien vaimentumien keskijajonta on määritetty Microsoft Excelin KESKIHAJONTA.P -työkalulla, joka laskee populaation keskijajonnan koko populaation perusteella. Työkalun ilmoittama keskijajonta mittaa sitä, kuinka paljon arvot poikkeavat populaation keskiarvosta. KESKIHAJONTA.P -työkalu käyttää laskennassa kaavaa

$$\sqrt{\frac{\sum(x - \bar{x})^2}{n}}, \quad (17)$$

jossa x on otoksen KESKIARVO(luku1, luku2,...) ja n on otoksen suuruus.

Lisäksi määritettiin sekundäärituulisuojan 1/3-oktaavikaistoittain määriteltyjen vaimennuksien keskiarvojen keskivirheet. Keskiarvojen keskivirheet on laskettu kaavalla

$$S = \frac{s}{\sqrt{n}}, \quad (18)$$

jossa S on keskivirhe, s on keskijajonta ja n on otoksen koko (Everitt & Skron dal 2010, 409). Otoksen koko oli jokaiselle 1/3-oktaavikaistalle 9 mittausta IEC-61400-11 3.0 standardin (2012) mukaisesti, mistä seuraa se, että käytettyjen keskimääräisten vaimennuksien hajonta on yksittäisten mittausten keskijajonnan kolmannes. Keskiarvojen keskivirheet on esitetty taulukossa 18.

TAULUKKO 18. Sekundäärituulisuojan 1/3-oktaavikaistoittain määritettyjen vaimennusten keskihajonnat ja keskivirheet

1/3-oktaavikaista, Hz	Keskihajonta, dB	Keskivirhe, dB	1/3-oktaavikaista, Hz	Keskihajonta, dB	Keskivirhe, dB
20	0,3	0,10	500	0,2	0,07
25	0,3	0,10	630	0,2	0,07
31,5	0,3	0,10	800	0,2	0,07
40	0,3	0,10	1 000	0,1	0,03
50	1,0	0,33	1 250	0,2	0,07
63	0,6	0,20	1 600	0,2	0,07
80	0,2	0,07	2 000	0,2	0,07
100	0,2	0,07	2 500	0,1	0,03
125	0,1	0,03	3 150	0,5	0,17
160	0,1	0,03	4 000	0,7	0,23
200	0,2	0,07	5 000	1,2	0,40
250	0,1	0,03	6 300	0,5	0,17
315	0,1	0,03	8 000	0,5	0,17
400	0,3	0,10	10 000	0,4	0,13

Sekundäärituulisuojan ominaisuuksien määrittämismittauksissa käytetyn äänitasomittarin kalibroinnissa on määritetty mittarin tarkkuus taajuuskaistoittain taulukon 19 mukaisesti. Kalibrointia ei ole tehty 1/3-oktaavikaistoittain, joten suoraa vertailua sekundäärituulisuojan mittaustuloksiin ei voida tehdä, mutta taulukon 19 tuloksista voidaan kuitenkin nähdä, että kalibroinnissa käytettyjen taajuuskaistojen virhe on systemaattisesti 0–0,1 dB aivan korkeimpia taajuuksia lukuun ottamatta. Näiden äänitasomittarin kalibroinnissa saatujen tulosten poikkeamien voidaan katsoa olevan pieniä verrattuna 1. luokan äänitasomittarin kokonaispävarmuuteen $\pm 1,1$ dB (taajuudella 1kHz) (IEC 61672-1 2.0 2013, 41–42).

TAULUKKO 19. Käytetyn äänitasomittarin kalibrointitodistuksen lukemat taajuuskais-
toittain

Taajuus (Hz)	Kalibrointisignaali (dB)	Mittarin antama lukema (dB)	Poikkeama (dB)
31,5	94	94,1	0,1
63	94	94,1	0,1
125	94	94,1	0,1
250	94	94,1	0,1
500	94	94,1	0,1
1000	94	94,0	0,0
1000	104	104,0	0,0
1000	114	114,0	0,0
2000	94	94,1	0,1
4000	94	93,9	0,1
8000	94	94,4	0,4
12500	94	95,7	1,7
16000	94	96,3	2,3

7.1.2 Altistuvan kohteen mittauksen epävarmuus

Ympäristöministeriön tuulivoimamelun mallintamisohjeen (2014c, 13) mukaan tuulivoimamelumallinnuksien päästöarvoihin sisällytetään mallinnettaessa koko laskennan epävarmuus. VTT:n tuulivoimamelun mallinnuksen laskentalogiikkaa ja parametrien valintaa käsittelevässä tutkimusraportissa (Nykänen, Uosukainen, Siponen & Di Napoli 2013, 14) todetaan, että altistuvassa kohteessa tapahtuvalla melutason mittaamiselle on tuulivoimalan tuulivoima-alueen rakentamisen jälkeen tarkoitus tarpeen vaatiessa varmistaa, että Tuulivoimarakentamisen suunnitteluoppaassa (ympäristöministeriö 2016) esitetyt melutason suunnitteluohjeavot alittuvat myös tuulivoimalan tai tuulivoima-alueen toiminnan aikana. Tutkimusraportissa todetaan lisäksi, että ohjeluonnos melutason mittaamisesta altistuvassa kohteessa perustuu IEA:n suositukseen melutason mittaamisesta tuulivoimamelulle altistuvassa kohteessa ja ohjeluonnos ottaa lisäksi huomioon ympäristöministeriön ohjeen ympäristömelun mittaamisesta. Kyse ei näin ollen ole varsinaisesta altistuvan kohteen melutason määrittämisestä pitkäaikaismittauksessa, vaan melumallinnuksen oikeellisuuden todentamisesta verifiointimittauksella. Melumallinnuksen tulosten perusteella myönnettyssä rakennusluvassa on jo pitänyt ottaa huomioon melumallinnuksen epävarmuus, joten immissiomittauksessa ei ilmoiteta mittauksen epävarmuutta, vaan

asianmukaisesti (mittausohjeen mukaisesti) suoritettujen mittausten tulos on suoraan verrattavissa mallinnuksen tulokseen ja/tai suunnitteluoppaan ohjearvoon.

Opinnäytetyön mittausten tarkoitus oli vertailla mittaustuloksia ensisijaisesti keskenään, mutta tuloksia verrataan myös tuulivoimamelulle asetettuihin ohjearvoihin. Kuten edellä todettiin, ohjearvoihin mittaustuloksia voidaan verrata sellaisinaan, koska mittaukset toteutettiin ympäristöministeriön tuulivoimamelun mittausohjeen (2014a) mukaisesti. Mittaustulosten keskinäisen vertailun epävarmuus liittyy näin ollen äänitasomittareiden omaan epävarmuuteen (1. luokan mittareille $\pm 1,1$ dB taajuudella 1 kHz (IEC 61672-1 2.0 2013)), tuulen mikrofoneihin aiheuttamiin häiriöääniin ja mittareiden sijoitteluun mittaustaikalla. Lisäksi epävarmuuteen vaikuttaa sekundäärituulisuojuille määritetyn vaimennuksen virhe, jota voidaan kuitenkin pitää hyvin vähäisenä, sillä sekundäärituulisuojan aiheuttama kokonaisvaimennus on luokkaa 0,5 dB. Kokonaisvaimennuksen ollessa näin pieni, voidaan todeta, että sekundäärituulisuojan vaimennuksen määrittämismittausten epävarmuuden vaikutus äänitasomittarilla mitattuun kokonaistasoon on häviävän pieni. Tuulivoimalaan nähden mikrofonien etäisyys ei juurikaan eroa toisistaan. Voimalaan nähden leveys suunnassa kaikki mikrofonit sijaitsivat toisistaan vähän päälle kahden metrin etäisyydellä. Lähimmän rakennuksen lähin kiinteä seinä sijaitsi vähän vajaan 10 metrin etäisyydellä jalustalle sijoitetusta mikrofonista itään päin. Tuulen mikrofoneihin aiheuttamien häiriöäänten vaikutus mittauksen epävarmuuteen on mahdoton arvioida. Sekundäärituulisuojuilla tehdyn mittauksen epävarmuutta voidaan kuitenkin pitää selvästi pienempänä kuin kahden muun mittaustavan, koska häiriöäänten määrässä oli niin merkittäviä eroja eri mittaustapojen välillä.

Määritetyt kokonaisäänitasot perustuvat kokonaisjaksoilta (22:00–6:15) mitattuun dataan. Epävarmuuksien määrittämiseksi tasot määritettiin myös yksittäisten pysäytysten ja niitä ympäröivien käyntijaksojen mittaustulosta. Tämä tehtiin niin, että esimerkiksi 45 minuutin pysäytysjakson mittaustulosta käsiteltiin yhdessä 45 minuutin käyntidatan kanssa (22,5 minuuttia käyntidataa ennen pysäytystä ja 22,5 minuuttia pysäytyksen jälkeen). Voimalan pysäytyksiä oli kolme kappaletta, joten jokaisella mittaustavalla saatiin kolme tulosta. Yksittäisten pysäytysten tarkastelun data on luonnollisesti mukana myös tulostenkäsittelyssä, joka tehtiin koko mittaustavalle 22:00–6:15, mutta tällä tavalla voidaan

havainnollistaa sitä, miten datan valikointi mittausjaksolta saattaa vaikuttaa lopputulokseen. Tulostenkäsittely tehtiin ennen tuulen häiriöäänten poistoa ja sen jälkeen. Tulokset on esitetty taulukossa 20.

TAULUKKO 20. Kolmen pysäytysjakson tulosten vaihteluväli tuulen nopeudella 8 m/s, kun tuulen häiriöääniä ei ole poistettu ja, kun ne on poistettu

Mittaustapa	Tuulen häiriöääniä ei poistettu	Tuulen häiriöäännet poistettu
Mittauslevy + sekundäärituulisuoja	36–38 dB	36–38 dB
Mittauslevy ilman sekundäärituulisuojaa	40–46 dB	34–37 dB
Jalusta	37–41 dB	37–40 dB

Kun verrataan näitä tuloksia koko mittausjaksojen tuloksiin, voidaan huomata, että sekundäärituulisuojaalla tehdyssä mittauksessa koko mittausjakson tulostenkäsittelyn tulokset 35 dB (taulukko 12) ovat yksittäisten pysäytysten mittausdatojen tulosten alapuolella 1–3 dB. Sekundäärituulisuojaalla tehdyn mittauksen yksittäisten pysäytystenkin tulokset ovat kuitenkin yöajan ohjearovotason 40 dB alapuolella. Ilman sekundäärituulisuojaa levyiltä tehdyn mittauksen koko mittausjakson tulokset olivat 43 dB ja 35 dB (taulukko 13). Molemmat tulokset osuvat taulukon 20 yksittäisten pysäytysten tulosten vaihteluväleihin 40–46 dB ja 34–37 dB. Jalustalta tehdyn mittauksen koko mittausjakson tulokset olivat 39 dB ennen tuulen häiriöäänten poisto ja sen jälkeen (taulukko 14). Tuulen häiriöäänten poisto ei merkittävästi vaikuttanut yksittäisten pysäytysten tulosten vaihteluväleihin (taulukko 20). Molemmat koko mittausjaksolle määritetyt tulokset osuvat yksittäisten mittaustulosten vaihteluväleihin. Erot koko mittausjaksojen ja yksittäisten pysäytysten välillä johtuvat datasta, jota ei käytetä yksittäisten pysäytysten tarkastelussa, mutta käytetään koko mittausjakson tulostenkäsittelyssä. Koko mittausjakson tulostenkäsittely on lähtökohtaisesti luotettavampi, sen sisältämän suuremman mittausdatan määrän vuoksi. Koko mittausjakson tulostenkäsittelyn riski piilee kesken mittauksen muuttuvissa mittausolosuhteissa. Lähtökohtaisesti olosuhteiden muutoksen ei pitäisi vaikuttaa tuloksiin, mutta altistuvan kohteen mittaus sisältää niin paljon muuttujia, että mittaajan ei ole mahdollista näitä kaikkia havainnoida ja tunnistaa. Yksittäisten pysäytysten ja niitä ympäröivään dataan keskittyvä tulostenkäsittely luotettavuus liittyy siihen, että todennäköisemmin mittausolosuhteet pysyvät hyvin vakiona tarkasteltavan jakson ajan. Lisäksi tällainen yksittäinen lyhyempi tarkastelu on helpompi todeta epäkelvoksi tai korjata, jos mittaustuloksessa on jotain erikoista.

8 YHTEENVETO

Tämän opinnäytetyö koostuu kolmesta laajemmasta kokonaisuudesta. Näistä ensimmäinen on tuulivoimameluun ja sille altistuvan kohteen mittaamiseen liittyvä teoria, jonka avulla aiheeseen perehtymätönkin lukija voi saada riittävän käsityksen tuulivoimamelun mittaamisen eri tekniikoista. Toinen kokonaisuus on sekundäärituulisuojan valmistus IEC 61400-11 3.0 standardin (2012) mukaisesti. Suojan valmistaminen edellytti tarkkaa perehtymistä standardiin ja myös erinäisiä kokeiluja sekä epäonnistumisia tuulisuojan valmistusprosessin aikana, jotta toimiva lopputulos saatiin aikaiseksi. Sekundäärituulisuojan rungon rakentamisessa olennaista oli, että suoja kestäisi sään vaihtelut eikä itsessään aiheuttaisi yhtään ylimääräistä ääntä, joka voisi mahdollisesti pilata koko mittauksen. Vaimentavien ominaisuuksien määrittämiseen IEC:n standardi (2012) antoi kohtuullisin tarkat ohjeet, joiden avulla voitiin määrittää suojan aiheuttama vaimennus eri taajuuskaistoilla.

Tuulivoimamelulle altistuvan kohteen melumittaus ja tulosten käsittely ovat aina monimutkainen prosessi, minkä voi huomata myös tästä työstä. Sopivaa mittaussäätä voi joutua odottamaan jopa kuukausia, mikä huomattiin myös opinnäytetyön altistuvan kohteen mittauksia odotellessa. Itse mittauksessa vaihtelevat sääolosuhteet, korkea taustamelutaso ja ympäristön aiheuttamat häiriöäännet itsessään tekevät mittauksista haastavia. Tämän vuoksi sekundäärituulisuojan tarjoama ”apu” häiriöäännten vähentämisessä on mittausten onnistumisen kannalta tärkeää.

Opinnäytetyössä käytiin lisäksi läpi mittauksiin liittyvää epävarmuustarkastelua, joka ei kuitenkaan työn lopputulosten kannalta ollut niin olennainen kuin yleensä melumittauksiin liittyvä epävarmuustarkastelu. Tämä johtuu siitä, että opinnäytetyö keskittyi eri mitaustapojen vertailuun. Sekundäärituulisuojan aiheuttaman vaimennuksen epävarmuus on tuulivoimamelun kokonaisäänitasojen kannalta häviävän pieni ja altistuvan kohteen mittauksessa olosuhteiden aiheuttama epävarmuus oli eri mittaustavoilla keskenään samaa luokkaa. Eroa epävarmuuksiin aiheuttaa tuulen mikrofoneihin aiheuttamat häiriöäännet, mutta tästäkin vertailusta voidaan vetää johtopäätös sekundäärituulisuojan käytön puoltamiseksi altistuvan kohteen melumittauksissa.

Sekundäärituulisuoja toimi altistuvan kohteen mittauksessa hyvin ja se oli merkittävä tekijä mittausdatan käsittelyn ja mittausten lopputulosten kannalta. Toisenlaisissa mitausolosuhteissa suojan vaikutus on luonnollisesti erilainen, mutta opinnäytetyö osoitti, että tuulisissa olosuhteissa sekundäärituulisuojan kanssa tehty mittaus on vertailuista mittaustavoista toimivin ja luotettavin.

LÄHTEET

Aro, E. 3.9.2014. Turbulenssi turmelee äänityksen – torju se!. [Verkkajulkaisu]. Luettu 18.8.2018. <https://riffi.fi/artikkelit/toimituksen-tietolaari/turbulenssi-turmelee-%C3%A4%C3%A4nityksen-torju-se>

Borenius, J., Jauhiainen, T., Lampio, E., Nuotio, J., Pesonen, K., Pyykkö, I. & Insinööritieto Oy. 1981. Akustiikan perusteet. Helsinki: Insinööritieto Oy.

Everest, F.A. & Pohlmann, K.C. 2009. Master Handbook of Acoustics. Viides painos. Yhdysvallat: McGraw-Hill.

Everit, B.S. & Skrondal, A. 2010. The Cambridge Dictionary of Statistics. Neljäs painos. Yhdysvallat: Cambridge University Press, New York.

Garcia, A. 2001. Environmental Urban Noise. Iso-Britannia: WIT Press.

IEC 61400-11 3.0. 2012. Wind turbines – Part 11: Acoustic noise measurement techniques. Geneve: The International Electrotechnical Commission IEC.

IEC 61672-1 2.0. 2013. Electroacoustics – Sound level meters – Part 1: Specifications. Geneve: The International Electrotechnical Commission IEC.

Ilmakehä-ABC. 2018. Ilmatieteen laitos. Luettu 16.11.2018. <https://ilmatieteenlaitos.fi/ilmakeha-abc/Inversio>

Laki eräistä naapuruussuhteista 13.2.1920/26.

Lanki, T., Turunen, A., Yli-Tuomi, T., Heinonen-Guzejev, M., Maijala, P., Toivonen, T., Toivo, T. & Ylikoski, J. 2017. Työ- ja Elinkeinoministeriön julkaisuja. Energia 28/2017. Tuulivoimaloiden tuottaman äänen vaikutus terveyteen. [Verkkajulkaisu] Luettu 17.7.2018 http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/80067/TEM-rap_28_2017_verkkajulkaisu.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Lyytimäki, J., Hakala, H. & Välimäki, J. 2008. Ympäristön tila ja suojele Suomessa. Toinen painos. Helsinki: Gaudeamus, Helsinki University Press.

Novak, C., Sjöström, A., Ule, H., Bard, D. & Sandberg G. 2014. An investigation of Different Secondary Noise Wind Screen Designs for Wind Turbine Noise Applications. Windsorin ja Lundin yliopistot sekä Akoustik Engineering Ltd Canada. Luettu 27.7.2018. <https://docs.wind-watch.org/Internoise-2014-Novak.pdf>

NTI Audio. 2018. FFT Basics. [Verkkajulkaisu] Luettu 1.12.2018. <https://www.nti-audio.com/en/support/know-how/fast-fourier-transform-fft>

Nykänen, H., Uosukainen, S., Siponen, D., Di Napoli, C., Yli-Kätkä, V-M. & Ristolainen, J. 2013. VTT.

Nykänen, H., Uosukainen, S., Antila, M. & Siponen, D. 2014. Tuulivoimalan meluvai-
kutukset: Häiritsevyyssmittaristo ja sen käyttö. VTT.

- Pesonen, K. 2005. Ympäristömelun haittojen arvioinnin perusteita. Helsinki: Yliopistopaino.
- Peltonen, H., Perkkiö, J. & Vierinen, K. 2012. Insinöörin (AMK) fysiikka. Osa II. Lahti: Lahden Teho-Opetus Oy.
- Rochman, D. 25.5.2012. Blogi. Shure Tech Tip: Methods to Minimize Wind Noise. Luettu 15.10.2018. <http://blog.shure.com/shure-tech-tip-methods-to-minimize-wind-noise/>
- Saarinen, S. (toim). 2013. Totuus Tuulivoimaloista. Porvoo: Bookwell Oy.
- Sosiaali- ja terveysministeriön asetus asunnon ja muun oleskelutilan terveydellisistä olosuhteista sekä ulkopuolisten asiantuntijoiden pätevyysvaatimuksista 23.4.2015/545.
- Starck, J., Teräsvirta, L. & Työterveyslaitos 2009. Melu. Tampere: Esa Print Oy.
- Talbot-Smith, M. 2000. Sound engineer's pocket book. Oxford: Focal Press.
- Terveyden ja hyvinvoinnin laitos. 2017. Melu. Päivitetty 10.11.2017. Luettu 26.7.2018. <https://thl.fi/fi/web/ymparistoterveys/melu#Mit%C3%A4%20melu>
- The Danish Ministry of Environment. 2011. Statutory Order on Noise from Wind Turbines. Translation of Statutory Order no. 1284 of 15.12.2011. Kööpenhamina, Tanska. Luettu 30.7.2018. <https://docs.wind-watch.org/DK-statute-wind-turbine-noise.pdf>
- Uosukainen, S. 2010. Tuulivoimaloiden melun synty, eteneminen ja häiritsevyys. Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy. Tiedote. Helsinki: Edita Prima Oy.
- Valtioneuvoston päätös melutason ohjearvoista 29.10.1992/993.
- Valtioneuvoston asetus tuulivoimaloiden ulkomelutason ohjearvoista 27.8.2015/1107.
- Ympäristöhallinnon verkkopalvelu. 2018. Usein kysytyt kysymykset tuulivoimasta. Julkaistu 29.4.2016. Päivitetty 25.5.2018. Luettu 2.8.2018. [http://www.ymparisto.fi/fi-FI/Elinymparisto_ja_kaavoitus/Elinymparisto/Tuulivoimarakentaminen/Tuulivoimaneuvonta/Usein_kysytyt_kysymykset_tuulivoimasta\(39060\)](http://www.ymparisto.fi/fi-FI/Elinymparisto_ja_kaavoitus/Elinymparisto/Tuulivoimarakentaminen/Tuulivoimaneuvonta/Usein_kysytyt_kysymykset_tuulivoimasta(39060))
- Ympäristöministeriö. 1995. Ympäristömelun mittaaminen. Ohje. Helsinki: Painatuskeskus Oy.
- Ympäristöministeriö. 2014a. Tuulivoimaloiden melutason mittaaminen altistuvassa kohteessa. Ympäristöhallinnon ohjeita 4|2014.
- Ympäristöministeriö. 2014b. Tuulivoimaloiden melupäästön todentaminen mittaamalla. Ympäristöhallinnon ohjeita 3|2014.
- Ympäristöministeriö. 2014c. Tuulivoimaloiden melun mallintaminen. Ympäristöhallinnon ohjeita 2|2014.
- Ympäristöministeriö. 2016. Tuulivoimarakentamisen suunnittelu. Ympäristöhallinnon ohjeita 5|2016.

Ympäristönsuojelulaki 27.6.2014/527.

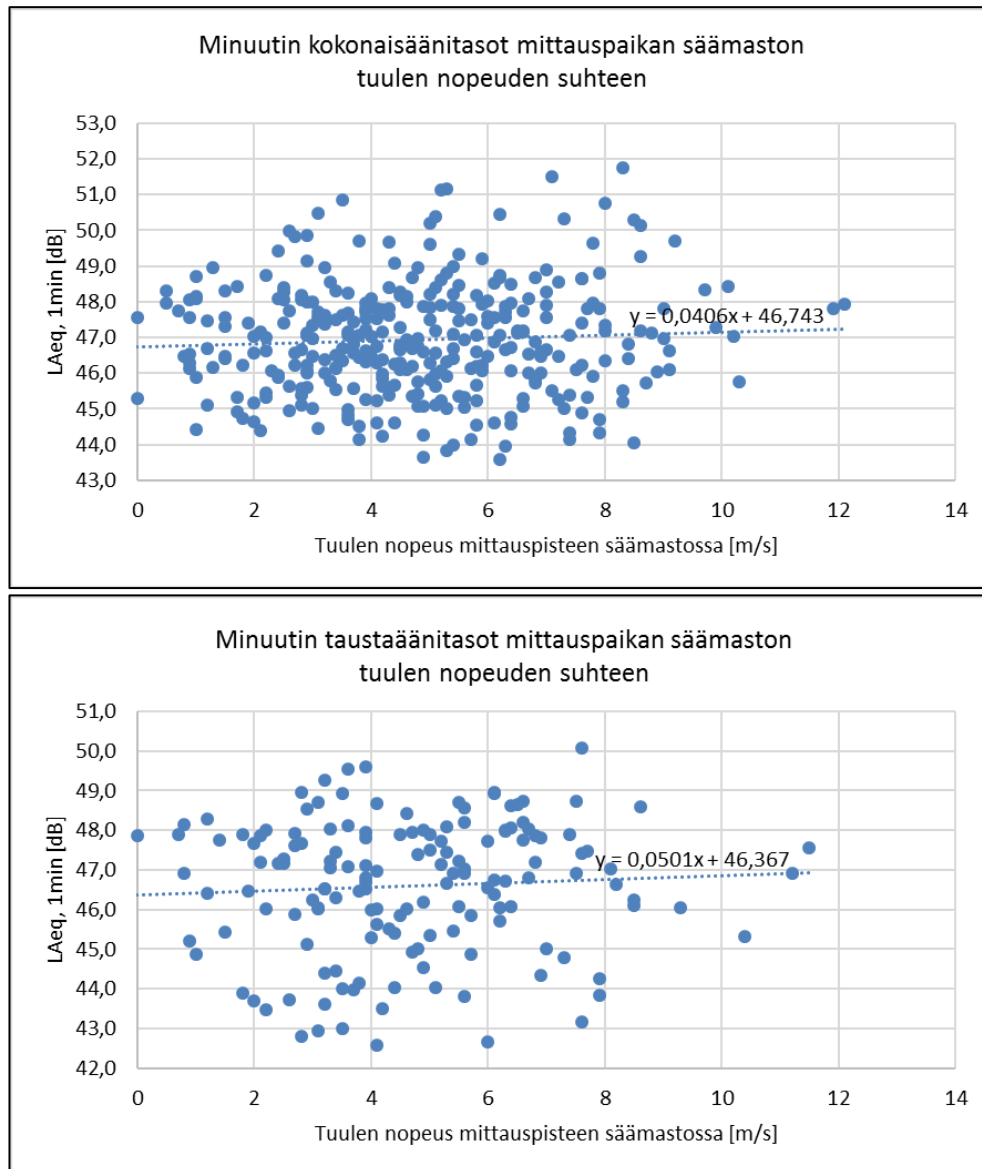
Ympäristönsuojelulaki 4.2.2000/86.

Äänipää. 2005. Äänen taajuus. [Verkojulkaisu]. Luettu 17.8.2018 http://www.aanipaa.tamk.fi/taajuus_1.htm

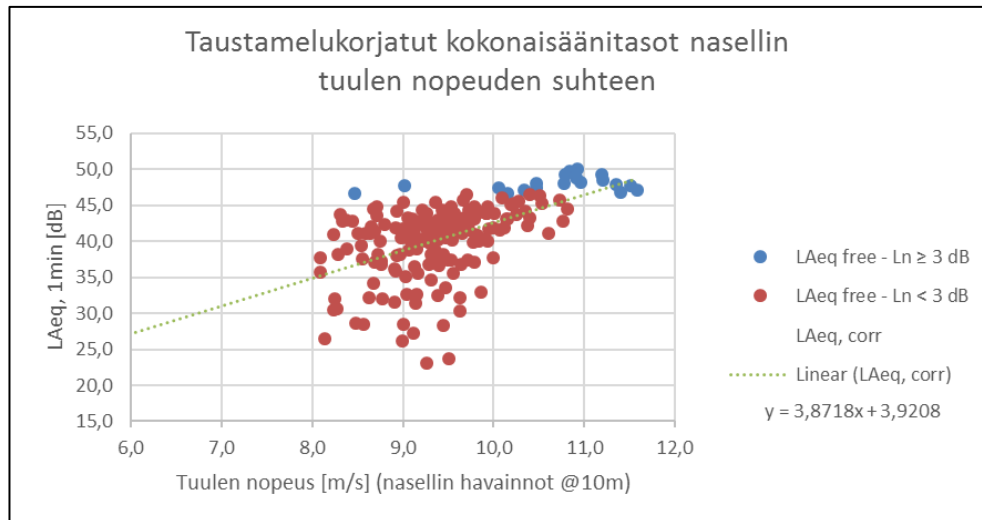
LIITTEET

Liite 1. Mittauslevyltä sekundäärituulisuojan kanssa tehdyn mittauksen erillisten pysäytysten kuvaajat, kun tuulen aiheuttamat häiriöäänit on poistettu.

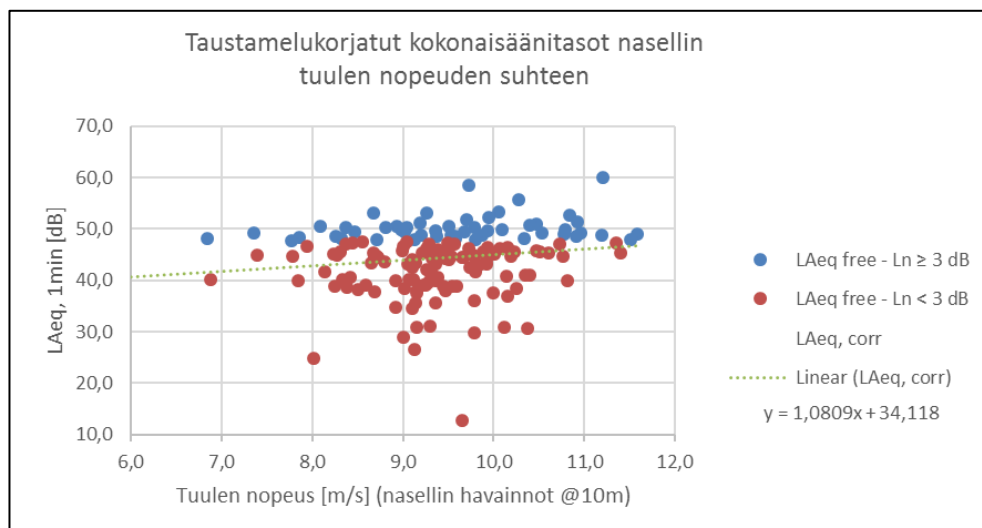
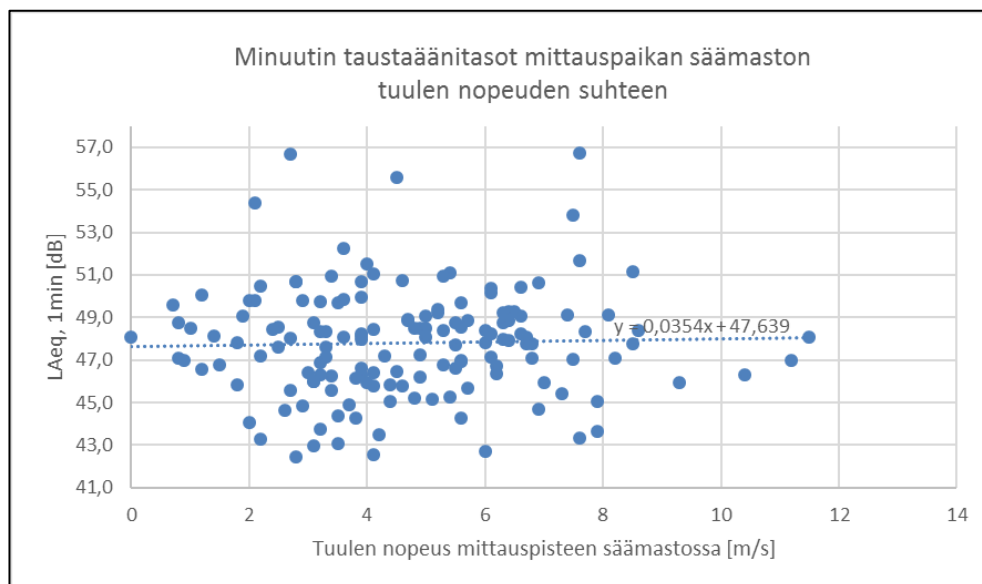
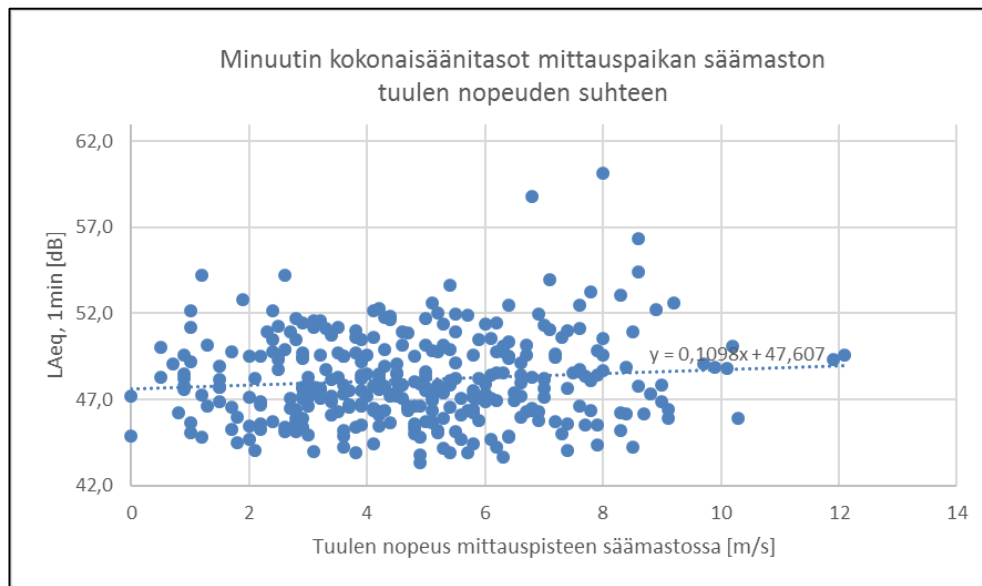
1(2)



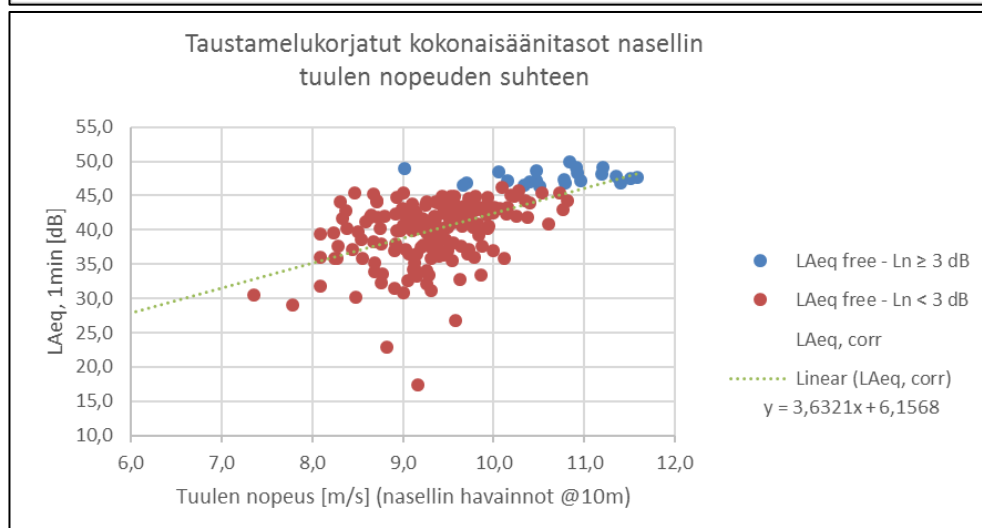
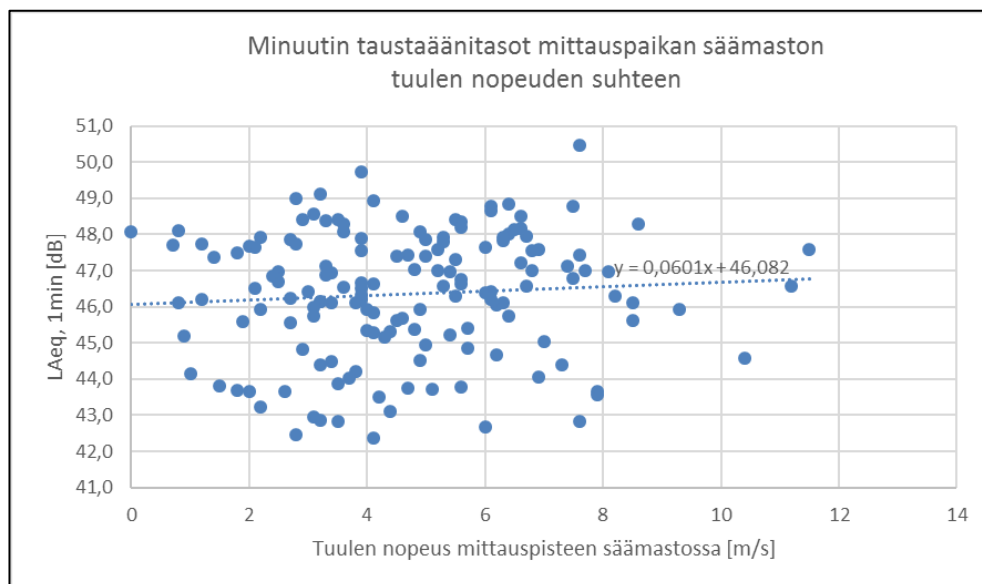
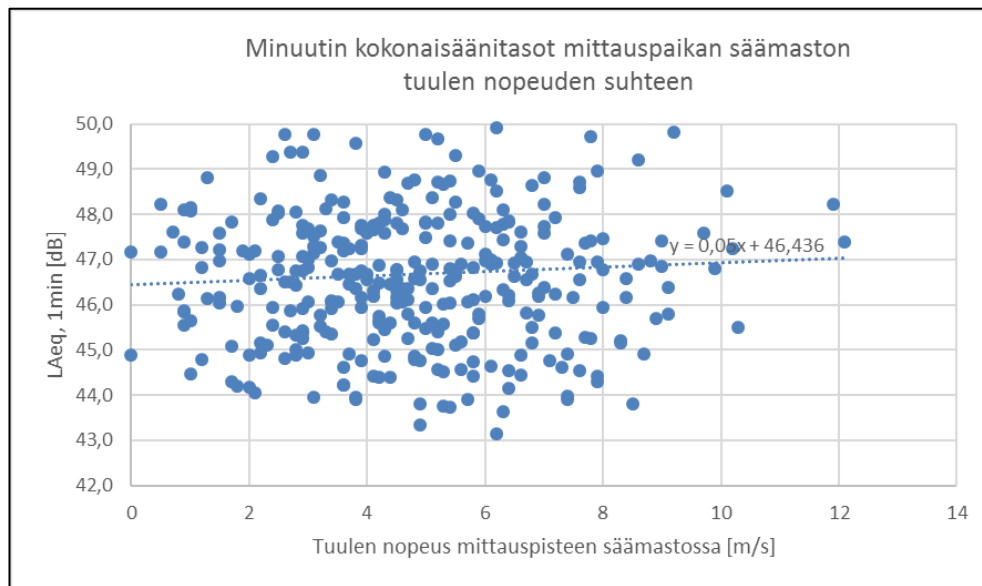
(jatkuu)



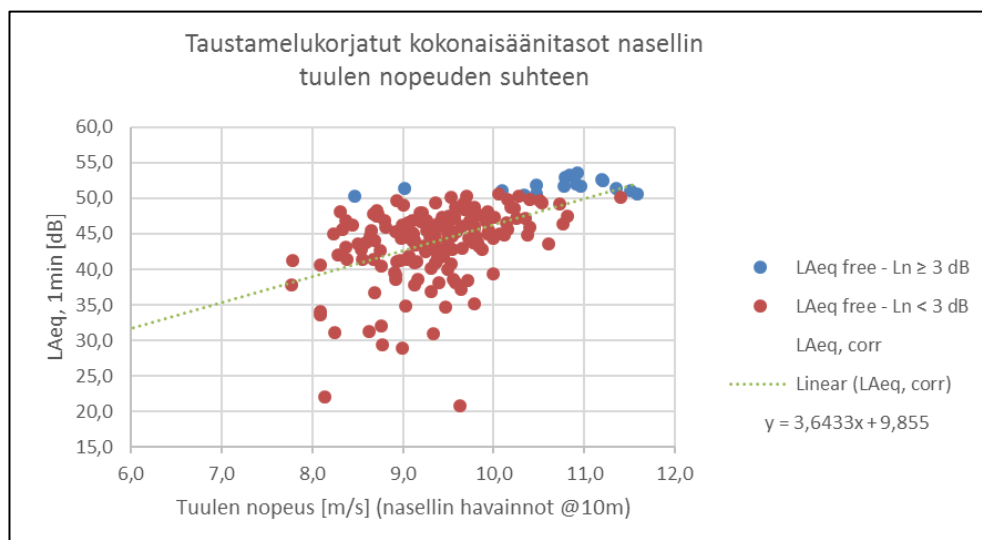
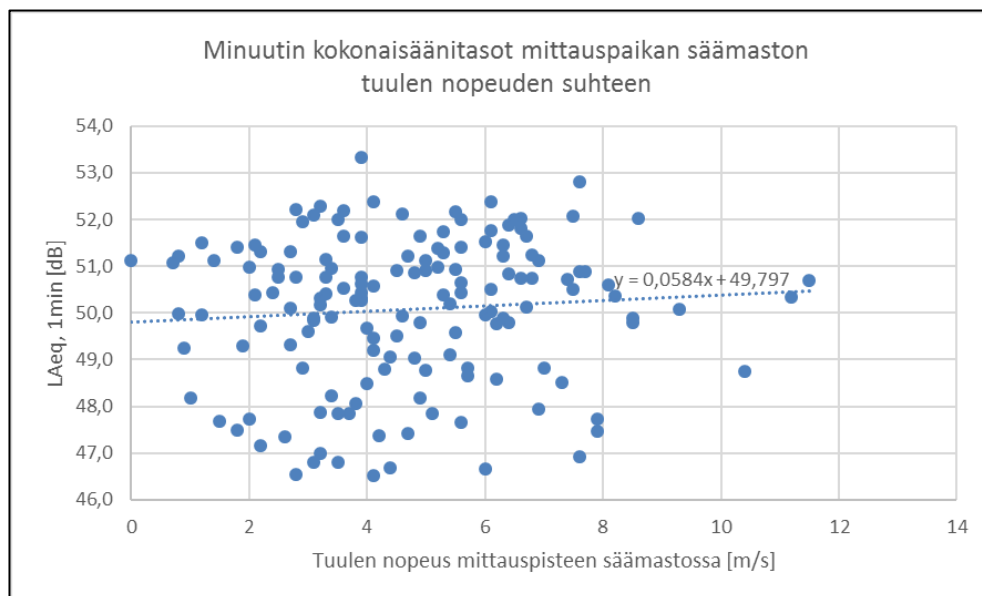
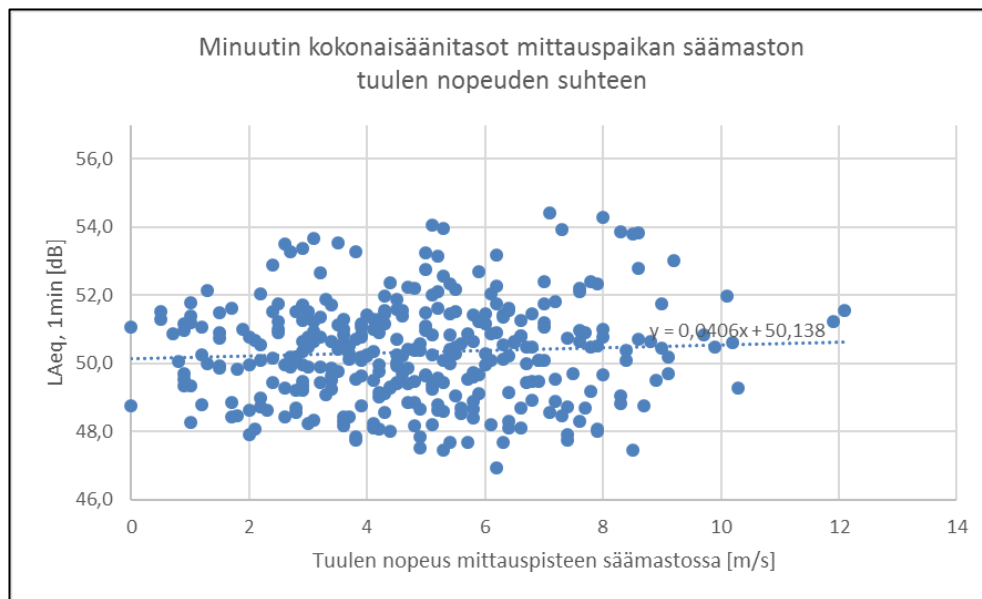
Liite 2. Mittauslevyltä ilman sekundäärituulisuojaa tehdyn mittauksen kuvaajat, kun tuulen aiheuttamia häiriöääniä ei ole poistettu



Liite 3. Mittauslevyltä ilman sekundäärituulisuojaa tehdyn mittauksen kuvaajat, kun tuulen aiheuttamat häiriöäänet on poistettu



Liite 4. Jalustalta tehdyn mittauksen kuvaajat, kun tuulen häiriöääniä ei ole poistettu



Liite 5. Jalustalta tehdyn mittauksen kuvaajat, kun tuulen häiriöäänet on poistettu

