



TAMPEREEN
AMMATTIKORKEAKOULU

TAMMEROVOIMA OY:N TARASTENJÄRVEN HYÖTYVOIMALAITOKSEN MELUSELVITYS

Oskari Mäkelä

Opinnäytetyö

Joulukuu 2016

Degree Programme in Environmental Engineering



TIIVISTELMÄ

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

MÄKELÄ, OSKARI:

Tammervoima Oy:n Tarastenjärven hyötyvoimalaitoksen meluselvitys

Opinnäytetyö 105 sivua, joista liitteitä 9 sivua
Joulukuu 2016

Opinnäytetyön toimeksiantajana toimi konsultointiyritys Ramboll Finland Oy ja työn tilaajana oli Tammervoima Oy. Opinnäytetyön ohjaajina toimivat Ramboll Finland Oy ja Tampereen ammattikorkeakoulu. Ramboll Finland Oy:n puolelta ohjaajina toimivat ryhmäpäällikkö Jari Hosiokangas ja projektipäällikkö Timo Korkee. Tampereen ammattikorkeakoulun puolelta ohjaajana toimi fysiikan lehtori Erkki Mäkinen.

Opinnäytetyön tavoitteena oli tuottaa Tammervoima Oy:n Tarastenjärven hyötyvoimalaitokselle osa sen ympäristölupapäätöksen vaatimasta meluselvityksestä. Tämän työn tavoitteena oli tuottaa ainoastaan Tammervoima Oy:n hyötyvoimalaitoksen toiminnan aiheuttamaan meluun keskittyvä meluselvitys, jota hyödynnetään Ramboll Finland Oy:n Tammervoima Oy:lle laatimassa lopullisessa meluselvityksessä, jossa otetaan huomioon myös Tarastenjärven alueen muut toimijat. Opinnäytetyön tavoitteena oli myös tunnistaa meluselvityksen epävarmuustekijät ja arvioida niiden merkitystä, sekä ottaa ne huomioon johtopäätöksiä tehdessä.

Meluselvityksen tutkimusmenetelminä käytettiin päivä- ja yöajan ympäristömelumittauksia lähimmissä melusta häiriintyvissä kohteissa, melunleviämismallinnusta ja ympäristöakustiikan teoriatiedon selvittämistä. Melunleviämismallinnusta varten tehtiin myös Nordtestin NT ACOU 080-standardin mukaisia äänilähteiden äänitehotasomäärittäyksiä Tammervoima Oy:n hyötyvoimalaitosalueella. Melumallinnus tehtiin SoundPLAN 7.4 ohjelmistolla, jossa laskentamalleina käytettiin pohjoismaisia teollisuus- ja liikennemelun laskentamalleja. Ympäristömelumittauksissa sovellettiin ympäristöministeriön ohjetta ympäristömelun mittaamisesta.

Tässä opinnäytetyössä tehtyjen melumallinnuksen ja ympäristömelumittausten tulosten perusteella, sekä epävarmuudet huomioiden voidaan todeta Tammervoima Oy:n ympäristöluvassa määriteltyjen raja-arvojen alitus lähimmillä asuinalueilla päivä- ja yöaikaana. Ympäristöluvassa määriteltyjä melutason raja-arvoja sovelletaan vain laitosta lähimpänä sijaitsevilla asuinalueilla. Lisäksi voidaan tehtyjen mittausten, mallinnuksen ja epävarmuuslaskelmien perusteella todeta, että hyötyvoimalaitoksen lähellä sijaitsevalla Näätäsuon luonnonsuojelualueella alittuisivat päiväajan melutason raja-arvot. Luonnonsuojelun alueen yöajan melutason mahdollisesta alittumisesta tai ylittymisestä ei voida tehtyjen tutkimusten, sekä epävarmuudet huomioiden varmistua. Luonnonsuojelualueella ei kuitenkaan sovelleta Tammervoima Oy:n ympäristöluvassa määriteltyjä melutason raja-arvoja, joten niiden alittumisesta tai ylittymisestä ei tarvitse varmistua.

Asiasanat: meluselvitys, ympäristömelumittaus, melumallinnus, epävarmuustekijät, äänitehotason määrittäminen

ABSTRACT

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

MÄKELÄ, OSKARI:

A Noise Survey for Tammervoima Ltd Tarastenjärvi Incineration Plant

Bachelor's thesis 105 pages, appendices 9 pages
December 2016

This thesis was commissioned by consultancy company Ramboll Finland Ltd. The customer company was Tammervoima Ltd. The instructors for this thesis were Ramboll Finland Ltd and Tampere University of Applied Sciences. The thesis instructor from Tampere University of Applied Sciences was Senior Lecturer in Physics Mr. Erkki Mäkinen, whereas, on behalf of Ramboll Finland Ltd the instructors were Team manager Mr. Jari Hosiokangas and Project Manager Mr. Timo Korkee.

The aim of this thesis was to produce part of Tammervoima Ltd noise survey according to conditions specified in environmental permit for Tammervoima Ltd. The noise survey was carried out for the new incineration plant owned by Tammervoima Ltd and located in Tarastenjärvi. This thesis will focus only on the noise generated by Tammervoima Ltd and will not take into account other noise generating companies and players located in the Tarastenjärvi area. This thesis will be used as a part of the final noise survey, which will be conducted by Ramboll Finland Ltd and will take into account also other noise generating companies in the area. Another aim of this thesis was to identify and evaluate any uncertainty factors concerning this noise survey and take them into account while drawing conclusions based on the results.

The noise survey was implemented by researching sound related theory, by constructing a sound model, and by carrying out noise level measurements during both day- and night time at the closest areas where the limit values stated in the environmental permit are applied. Sound power level measurements for the sound sources were also executed in the incineration plant premises by applying the Nordtest NT ACOU 080-standard for the purpose of gaining needed information for the sound model. The sound model was constructed by using SoundPLAN 7.4 software, which used General Nordic Prediction Methods for Industrial- and Road Traffic Noise. The environmental noise measurements were implemented according to the guidelines of the Finnish Ministry of Environment.

The results from the environmental noise measurements, sound model, and uncertainty factor calculations show that the noise levels, during day- and night time at the nearest residential areas are, below the limits set in the environmental permit. The limit values set in the environmental permit are applied only at the nearest residential areas. Moreover, the day time noise levels at the nearest nature reservation area called Näätäsuu, according to the results attained from the environmental noise measurements, sound model and uncertainty factors, would set below the limit values. However, the undercut or exceeding of the night time limit values can not be confirmed based on the noise level and uncertainty factor results for Näätäsuu nature reservation area.

Key words: noise survey, environmental noise measurement, noise modeling, uncertainty factors, sound power level measurement

SISÄLLYS

1	EXTENDED ABSTRACT	8
1.1	Introduction.....	8
1.1.1	Environmental noise and how it is regulated in Finland.....	8
1.1.2	Purpose and aim of this thesis	9
1.2	Materials and methods	9
1.3	Results and conclusions	12
2	JOHDANTO.....	15
3	YMPÄRISTÖAKUSTIIKAN PERUSTEET	17
3.1	Ääni.....	17
3.2	Melu.....	18
3.3	Äänen tasot.....	18
3.3.1	Äänipainetaso	19
3.3.2	Äänitehotaso	20
3.3.3	Äänen intensiteettitaso	21
3.4	Taajuus ja spektri	22
3.4.1	Aallonpituus	25
3.4.2	Taajuuspainotus.....	25
3.4.3	Kapeakaistainen melu	27
3.4.4	Impulssimainen melu	28
3.5	Monen äänitason yhteenlasku	28
3.6	Keskiaänitaso eli ekvivalenttitaso	30
3.7	Ympäristössä esiintyvät äänilähdetyypit.....	31
3.8	Ilmaäänien eteneminen ja vaimeneminen	31
3.8.1	Äänen eteneminen vapaassa kentässä ja etäisyysvaimentuminen.....	32
3.8.2	Ilman absorptio.....	35
3.8.3	Maanpinnan vaikutus	36
3.8.4	Kasvillisuuden vaikutus	38
3.8.5	Ilman lämpötilan ja tuulen vaikutus	39
3.8.6	Melusteiden vaikutus	40
4	MELUA KOSKEVA LAINSÄÄDÄNTÖ	43
4.1.1	Melutason ohjearvot.....	45
5	MENETELMÄT.....	48
5.1	Melumallinnuksessa käytetyt menetelmät	48
5.1.1	SoundPLAN 7.4	48
5.1.2	Pohjoismainen teollisuusmelun laskentamalli	49
5.1.3	Pohjoismainen tieliikennemelun laskentamalli	51

5.2	Ympäristömelumittauksissa käytetyt menetelmät	54
5.2.1	Ympäristöministeriön ohje ympäristömelun mittaamisesta	54
5.3	Äänitehotasojen määrittämisessä käytetyt menetelmät.....	55
6	TAMMERVOIMAN HYÖTYVOIMALAITOKSEN MELUSELVITYS	59
6.1	Kohteen perustiedot	59
6.2	Työn taustat ja tavoitteet	61
6.3	Melumallinnus	62
6.3.1	Maastomallin luominen.....	62
6.3.2	Hyötyvoimalaitoksen mallintaminen	64
6.3.3	Hyötyvoimalaitoksen äänilähteiden äänitehotasojen määrittäminen	64
6.3.4	Hyötyvoimalaitoksen äänilähteiden mallintaminen.....	68
6.3.5	Lähialueen rakennusten mallintaminen.....	69
6.3.6	Lähialueen tiestön mallintaminen	71
6.3.7	Laskenta	72
6.4	Ympäristömelumittaukset	74
7	EPÄVARMUUSTARKASTELU	78
7.1	Ympäristömelumittauksen epävarmuus	78
7.2	Melumallinnuksen epävarmuus	81
7.2.1	Tiet ja liikennemäärät	82
7.2.2	Maastomalli ja rakennustiedot	82
7.2.3	Pohjoismaisten teollisuus- ja tieliikennemelun laskentamallien tarkkuus.....	83
7.2.4	Mallinnuksessa käytettyjen äänilähteiden äänitehotasojen tarkkuus	84
8	TULOKSET JA JOHTOPÄÄTÖKSET	85
8.1	Tuloksien vertailu raja-arvoihin epävarmuudet huomioiden.....	85
8.2	Mallinnus- ja mittaustulosten vertailu epävarmuudet huomioiden.....	89
9	YHTEENVETO	91
	LÄHTEET.....	93
	LIITTEET.....	97
	Liite 1. Tammervoima Oy:n äänilähteiden äänitehotasot.....	97
	Liite 2. P.1 päiväajan ympäristömelumittauspöytäkirja	98
	Liite 3. P.1 yöajan ympäristömelumittauspöytäkirja.....	99
	Liite 4. P.2 päiväajan ympäristömelumittauspöytäkirja	100
	Liite 5. P.2 yöajan ympäristömelumittauspöytäkirja.....	101
	Liite 6. P.3 päiväajan ympäristömelumittauspöytäkirja.....	102
	Liite 7. P.3 yöajan ympäristömelumittauspöytäkirja.....	103
	Liite 8. Tammervoima Oy:n päiväajan melunleviämismalli	104
	Liite 9. Tammervoima Oy:n yöajan melunleviämismalli.....	105

LYHENTEET JA TERMIT

Aikapainotus	S-, F- tai I-aikapainotus. Yleisimmin käytetään kuuloaistimusta lähimpänä olevaa F-aikapainotusta. Aikapainotus kuvaa ajanjakson pituutta, jolta äänitasomittari laskee äänitason tehollisen keskiarvon
Aikavakio	Ajanjakson pituus, joka kuvastaa äänitasomittarin reagointi-aikaa äänitason äkillisiin muutoksiin. (Slow: 1000 ms, Fast: 125 ms, Impulse: 35 ms + huippuilmaisain aikavakiolla 1500 ms, Peak: 50 – 100 μ s). Aikavakio on kestoaltaan puolet aikapainotuksen kestoalta
Autocad Map 3D	AutoCAD-suunnitteluohjelma, jossa on tavalliseen AutoCAD-suunnitteluohjelmaan verrattuna lisäyksenä paikkatietojen muokkaamiseen ja analysointiin liittyviä toimintoja
ETRS-GK _n	Suomessa käytettävä tasokoordinaatisto, jossa Suomi on jaettu kaistoihin 19° – 31°. ETRS-GK24 kuvaa kaistaa 24°, jonka tasokoordinaatiston keskimeridiaani on vastaavasti 24°. Tarastenjärven alue sijoittuu ETRS-GK24 kaistalle.
ETRS-TM _n -FIN	Maailmanlaajuisesti käytetty tasokoordinaatisto, jossa koko Suomi on määritelty sijaitsemaan kaistalla numero 35, josta käytetään lyhennysmuotoa: ETRS-TM35-FIN
GWh	Energian yksikkö, gigawattitunti
Hz	Taajuuden yksikkö, hertsi
L _{Aeq}	A-taajuuspainottu ekvivalenttitaso
L _{Aeq7-22}	A-taajuuspainotettu päiväajan ekvivalenttitaso
L _{Aeq22-7}	A-taajuuspainotettu yöajan ekvivalenttitaso
L _{AI} max	Aikavakiolla ”Impulse” mitattu A-taajuuspainotettu enimmäisäänitaso
L _{AS} max	Aikavakiolla ”Slow” mitattu A-taajuuspainotettu enimmäisäänitaso
L _{kok}	Kokonaisäänitaso eli mitattu äänipaine- tai äänen intensiteettitaso
m/s	Nopeuden yksikkö, metriä per sekunti

N2000	Eurooppalaisen paikkatiedon yhtenäisyyden edistämiseksi luodun korkeusjärjestelmän suomalainen realisaatio
Pa	Paineen yksikkö, pascal
<i>Q</i>	Äänen suuntakerroin, joka riippuu äänilähteen sijainnista
TAMK	Tampereen ammattikorkeakoulu/Tampere University of Applied Sciences
μ	Mikro eli 10^{-6}

1 EXTENDED ABSTRACT

1.1 Introduction

1.1.1 Environmental noise and how it is regulated in Finland

Environmental noise can be categorized as a type of air pollution, since it can have a drastic negative impact on comfortability and quality of the environment. Noise can be defined as unwanted sound, which can cause annoyance or discomfort. Moreover, noise is one of the most common factors to cause deterioration of comfortability in an environment. Prolonged exposure to high noise levels can, in addition, cause a permanent or temporary hearing damage. It is important to note that also pleasant sound is categorized as noise if it is expected to cause effects on human health. Nowadays, the focus on noise related issues has grown and the focus has shifted towards taking noise into account in early phases of planning at society-, industrial- and governmental levels. (Starck & Teräsvirta 2009, 8; Foreman 2012, 1, 191.)

The Finnish Council of State has given guideline values for environmental noise. The guideline values are given as A-weighted equivalent sound pressure levels and vary based on area type. The guideline values are 55 dBA for day time and 50 dBA for night time at old residential areas and at areas located close to hospitals or schools. In addition to these, there are specific area types, which have been given their own guideline values. (Valtioneuvosto 1992.)

In Finland there are two main laws concerning environmental noise. The first one is Environmental Protection Act (527/14), which defines operators that are required to monitor their noise emissions by conducting a noise survey. The Finnish Environmental Protection Act also defines how often operators are required to update their noise survey. The second main law concerning environmental noise is Environmental Protection Decree (713/14), which defines operations that need an environmental permit. The Environmental Protection Decree is especially important since environmental permits often include limit values for noise. Environmental permits also usually include requirements concerning noise survey execution. The most common method used in noise sur-

veys, nowadays, is computer aided modeling. In addition to the before mentioned two main laws, there are separate noise related decrees for specified operators such as rock crushing sites or wind power parks.

1.1.2 Purpose and aim of this thesis

The aim of this thesis is to produce part of the noise survey of Tammervoima Ltd according to the conditions specified in their environmental permit. The noise survey is done for the new incineration plant owned by Tammervoima Ltd and situated in Tarastenjärvi, Finland. The environmental permit of Tammervoima Ltd sets limit values for noise as A-weighted equivalent sound pressure levels. The limit values are 55 dBA for day time and 50 dBA for night time and are applied at the closest residential areas. Additionally, the environmental permit states that the noise survey is conducted in cooperation with other operators in Tarastenjärvi area. However, this thesis focuses only on the noise generated by Tammervoima Ltd and will not take into account other noise generating companies and players located in Tarastenjärvi area. This thesis will be used as a part of the final noise survey, which will be carried out by Ramboll Finland Ltd and will take into account also other noise generating companies in Tarastenjärvi area.

This thesis aims to cover all the necessary environmental noise related theory, legislation and standards that are required to comprehend in order to execute an environmental permit based noise survey. Another aim of this thesis is to identify and evaluate any uncertainty factors concerning this noise survey and take them into account while drawing conclusions based on the results.

1.2 Materials and methods

This thesis topic was commissioned by a consultancy company Ramboll Finland Ltd. The customer company was Tammervoima Ltd. The instructors for this thesis were Ramboll Finland Ltd and Tampere University of Applied Sciences. The thesis instructor from Tampere University of Applied Sciences was Senior Lecturer in Physics Mr. Erkki Mäkinen, whereas, on behalf of Ramboll Finland Ltd the instructors were Team manager

Mr. Jari Hosiokangas and Project Manager Mr. Timo Korkee. The thesis project started in March 2016.

The noise survey was conducted by researching noise related theory and legislation, by creating a computer aided sound model, and by performing day- and night time environmental noise measurements.

The theory research was executed by utilizing common library services, TAMK's e-library resources, Google Scholar, online articles, standards, and course handouts. Materials for theory research were widely available both in Finnish and English. The theoretical research was conducted in order to construct a basic understanding of factors affecting noise propagation outdoors and to familiarize the reader with the noise related terminology and legislation. The theory research acted as a foundation of the noise survey in a sense that it ensured that both the reader and the writer had necessary knowledge to comprehend the noise survey methods and the results attained.

The sound model was done by utilizing SoundPLAN 7.4 software. Calculation models used in SoundPLAN were General Nordic Prediction Methods for Industrial- and Road Traffic Noise, which are in accordance with an established practise in Finland. SoundPLAN 7.4 allows the user to model sound propagation in an illustrative 3D view, which takes into account the height-, type-, and shape of the terrain. Moreover, SoundPLAN 7.4 utilizes building-, road-, and weather data in sound propagation calculations. Terrain-, building-, and road data are freely available in Finland and they can be downloaded from National Land Survey of Finland (Maanmittauslaitos) website. For weather data SoundPLAN 7.4 uses weather assumptions of used calculation model. General Nordic Prediction Method for Industrial noise has been designed so that its assumed weather conditions are propitious for sound propagation. This means slight downwind conditions between sound source and the receiver.

The environmental noise measurements were executed in three different measurement points. Noise levels were measured in each measurement point at day- and night time. The measurement point locations were selected according to the noise measurement plan, which was done by Ramboll Finland Oy. Two of the measurement points were located at the border of nearest residential areas where the limit values set in the environmental permit are applied. One of the measurement points was located at the border

of Näätäso nature reservation area, which is situated approximately 100 meters north from Tammervoima Ltd incineration plant. The limit values set in the environmental permit are not applied at the nature reservation area.

The environmental noise measurements were implemented according to the guidelines of the Finnish Ministry of Environment (1/1995). Noise measurements were carried out by measuring A-weighted equivalent sound pressure levels with a time constant F (Fast 125 ms) and a recording interval of one second. The measurement period in each noise measurement was at least 15 minutes, which is adequate when measuring broadband and steady industrial noise. All of the noise measurements were made in weather conditions, which were within guidelines of the Finnish Ministry of Environment. The noise measurement dates and times were picked based on freely available weather data from Finnish Weather Institute (Ilmatieteen laitos). The weather condition, during each measurement period, was also observed and documented by the measurer. In addition, the weather conditions of day time measurements were recorded by using a field weather station, which was brought to the field.

Sound power level measurements were carried out in the premises of Tammervoima Ltd in order to gain information for the sound model. Sound power level measurements were executed for eight sound sources. The measurements were carried out according to Nordtest's NT ACOU 080-standard which describes the procedure of sound power level measurements in detail. The standard has two different methods for measuring sound power levels: "sphere" and "box". Both of the methods were used for Tammervoima Ltd sound sources. Box method was used for one sound source because of sound source's challenging location on the roof and next to the railing. Sphere method was used for the other seven sound sources. The standard recommends using sphere method if possible since it gives also information about sound directivity. One of the Tammervoima Ltd sound sources was found to radiate sound directionally.

The uncertainty factors were determined separately for environmental noise measurements, sound model, and sound power level measurements. The uncertainty factors for the sound model were determined from calculation models used in the sound model and from uncertainty factors of any used data including data from sound power level measurements. The uncertainty factors are given for calculation models and the modeling software itself should not have any uncertainty. The uncertainty factors for environmen-

tal noise measurements were calculated according to the guidelines of the Finnish Ministry of Environment. Noise measurement uncertainty factors took into account the distance between sound source and the receiver, the number of independent measurements, measurement device uncertainty, and weather conditions. The noise measurement uncertainty was calculated for each measurement point separately.

1.3 Results and conclusions

Comparison of the results and the limit values set in the environmental permit was done according to the guidelines of the Finnish Ministry of Environment. This means that the exceeding of the limit values can be confirmed if noise measurement results and sound model results are greater than the sum of limit value (L_0) and uncertainty factor (ΔL). Respectively, the undercut of the limit values can be confirmed if noise measurement results and sound model results are lower than the difference of the limit value and uncertainty factor.

The results from environmental noise measurements, sound model, and uncertainty factor calculations show that the noise levels, during day- and night time at the nearest residential areas are, below the limits set in Tammervoima Ltd environmental permit. (table i.) (table ii.) The limit values set in the environmental permit are applied only at the nearest residential areas. Moreover, the day time noise levels at the nearest nature reservation area called Näätäso, according to the results attained from the environmental noise measurements, sound model and uncertainty factors, would set below the limit values. However, the undercut or exceeding of the night time limit values can not be confirmed based on the noise level and uncertainty factor results for Näätäso nature reservation area. (table i.) (table ii.)

TABLE i. Environmental noise measurement results and comparison to the limit values including uncertainty factors

Measurement point	$L_0 + \Delta L$	$L_0 - \Delta L$	Measurement result	Comparison to the limit value set in the environmental permit (Undercut/Exceeding/Cannot be confirmed)
P.1 day	62 dBA	48 dBA	47 dBA	Undercut
P.1 night	57 dBA	43 dBA	42 dBA	Undercut
P.2 day	63 dBA	47 dBA	43 dBA	Undercut
P.2 night	58 dBA	42 dBA	37 dBA	Undercut
P.3 day	58 dBA	52 dBA	50 dBA	Undercut
P.3 night	53 dBA	47 dBA	51 dBA	Cannot be confirmed

TABLE ii. Sound model results and the comparison to the limit values including uncertainty factors

Measurement point	$L_0 + \Delta L_{(\text{Sound Model})}$	$L_0 - \Delta L_{(\text{Sound Model})}$	Sound model result	Comparison to the limit value set in the environmental permit (Undercut/Exceeding/Cannot be confirmed)
P.1 day	60 dBA	50 dBA	32 dBA	Undercut
P.1 night	55 dBA	45 dBA	32 dBA	Undercut
P.2 day	60 dBA	50 dBA	27 dBA	Undercut
P.2 night	55 dBA	45 dBA	22 dBA	Undercut
P.3 day	58 dBA	52 dBA	47 dBA	Undercut
P.3 night	53 dBA	47 dBA	46 dBA	Undercut

The environmental noise measurements and sound model results are, with respect to the uncertainty factors, in line at measurement point number three for both day- and night time and at measurement point number one for night time. The differences in results are due to long distance between sound source and measurement points number one and two. Long distance between sound source and measurement points increases the signifi-

cance of background noise. The background noise affected the noise level measurements at measurement points number one and two, whereas, sound model result were calculated solely for the noise generated by the incineration plant. The background noise consisted of road noise, singing birds, mosquitoes, and occasional wind.

2 JOHDANTO

Ympäristömelu voi toimia ympäristöä pilaavana tekijänä vaikuttamalla ympäristön viihtyvyyden heikentävästi. Ympäristömelu on maailmalla yksi yleisimmistä ympäristön viihtyvyyden negatiivisesti vaikuttavista tekijöistä ja siihen keskitytäänkin nykyään entistä enemmän yhteiskunta-, teollisuus- ja hallintosektoreilla. (Starck & Teräsvirta 2009, 8; Foreman 2012, 1.) Suomessa on ympäristön viihtyvyyden takaamiseksi ja meluhaittojen ehkäisemiseksi annettu valtioneuvoston päätös melutason ohjearvoista (993/1992), jossa on määritelty ohjearvot päivä- ja yöajalle erilaisille alueille. Vanhoilla asuin-, hoito- ja oppilaitosaluilla sovelletaan ohjearvoina 55 dBA päivälle ja 50 dBA yölle. (Valtioneuvosto 1992; Terveystieteiden tutkimuskeskus ja Hyvinvoinnin tutkimuskeskus 2014.) Tämän lisäksi ympäristöluvanvaraisille toimijoille on yleensä määritelty ympäristöluvassa melutason raja-arvot, jotka voivat poiketa melutason ohjearvoista. Ympäristöluvassa on myös usein määritelty meluselvityksen toteutustapa, joista yleisimmin käytetään tietokonepohjaista melumallinnusta. Tammervoima Oy:lle on ympäristöluvassa määritelty melutason raja-arvot ja meluselvityksen toteutustapa.

Tämän opinnäytetyön tarkoitus on tuottaa osa Tammervoima Oy:n ympäristölupapäätöksen (dnro: LSSAVI/236/04.08/2011) vaatimasta meluselvityksestä. Aluehallintovirasto on 28.2.2013 antamassaan ympäristölupapäätöksessä määritellyt, että meluselvitys tulee tehdä vuoden sisällä Tammervoima Oy:n Tarastenjärven hyötyvoimalaitoksen toiminnan vakiintumisesta. Tammervoima Oy:n ympäristölupapäätöksen mukainen meluselvitys on määritelty tehtäväksi yhdessä Tarastenjärven alueen muiden toimijoiden kanssa hyödyntäen melumallinnusta sekä ympäristömelumittauksia. Tässä opinnäytetyössä keskitytään kuitenkin ainoastaan Tammervoima Oy:n hyötyvoimalaitoksen aiheuttamaan meluun. Tätä opinnäytetyötä hyödynnetään Ramboll Finland Oy:n Tammervoima Oy:lle tuottamassa lopullisessa ympäristöluvan vaatimassa meluselvityksessä, jossa otetaan huomioon myös Tarastenjärven alueen muut toimijat.

Meluselvityksen tavoitteena on varmistua Tammervoima Oy:n ympäristölupapäätöksessä määriteltyjen melutason raja-arvojen alittumisesta hyötyvoimalaitosta lähimpänä sijaitsevilla asuinalueilla. Tammervoima Oy:n ympäristölupapäätöksessä on melutason raja-arvoiksi määritelty 55 dBA päiväajalle ja 50 dBA yöajalle. Raja-arvot on annettu A-taajuuspainotettuina ekvivalenttitasoina ja ne perustuvat valtioneuvoston päätökseen

(VNp 993/92) melutason ohjearvoista. Opinnäytetyssä otetaan johtopäätöksiä tehdessä huomioon meluselvitykseen liittyvät epävarmuustekijät.

Meluselvitys tehdään laatimalla hyötyvoimalaitoksen lähialueelle melunleviämismallinnus, suorittamalla ympäristömelumittauksia päivä- ja yöaikana lähimmissä melusta häiriintyvissä kohteissa, sekä selvittämällä melun teorian tietoa. Melun teorian tiedon selvittäminen tehdään käyttäen kirjoja, verkkojulkaisuja, artikkeleita ja kurssimuistiinpanoja. Teorian tiedon selvittämisellä varmistetaan opinnäytetyön tekijän valmiuksista meluselvityksen toteuttamiseen, sillä mallinnus- ja mittaustyöt vaativat niiden tekijältä ymmärryksen melun teorian tiedosta. Laadukkaan melumallinnuksen laatimiseksi on suunnittelijan ymmärrettävä käytettävien laskentamallien toimintaperiaatteet, jotka pohjautuvat ympäristöakustiikan perusteoriaan.

Ympäristömelumittausten mittauspisteet valikoidaan Ramboll Finland Oy:n aluehallintovirastolle 2.5.2016 toimittaman melumittaussuunnitelman mukaisesti. Melunleviämismalli tehdään SoundPLAN 7.4 ohjelmistolla, jossa laskentamalleina käytetään pohjoismaisia teollisuus- ja tieliikennemelun laskentamalleja. Melumallinnuksessa otetaan huomioon muun muassa hyötyvoimalaitoksen äänilähteet ja niiden äänitehotasot, maastonmuodot, rakennus- ja tiestötiedot ja hyötyvoimalaitoksen läheisillä teillä toteutettavat jätekuljetukset.

3 YMPÄRISTÖAKUSTIIKAN PERUSTEET

3.1 Ääni

Ääni on väliaineessa etenevää aaltoliikettä. Äänen edetessä väliaineena toimii usein ilma, mutta ääni voi edetä myös muissa kaasuissa, nesteissä ja kiinteissä aineissa. Nesteissä tai kaasuissa, kuten ilmassa, etenevä ääniaalto luokitellaan pitkittäiseksi ääniaalloksi, kun taas kiinteässä aineessa etenevä ääni voi olla joko pitkittäistä tai poikittaista. (R.Knight 2008, 616.)

Äänen syntymisen, etenemisen ja aistimuksen vaatimuksina ovat äänilähde, väliaine ja vastaanotin. Äänilähde on esine tai laite, joka muuntaa osan siihen kohdistuvasta ulkoisesta energiasta ääneksi. Väliaine mahdollistaa äänilähteen tuottaman äänen välittymisen vastaanottimelle. Vastaanotin, kuten ihmiskorva tai äänitasomittari tulkitsee äänipaineen vaihteluita ja muuntaa ne sitten äänitasoiksi. (J.Foreman 2012, 1.)

Äänen nopeus ilmassa 20 °C lämpötilassa ja normaalissa ilmanpaineessa on 343 m/s. Äänen nopeus kuitenkin vaihtelee eri väliaineissa. Äänen nopeuteen vaikuttavia tekijöitä ovat siis lämpötila, paine ja väliaineen molekyyli rakenne. Nesteet ja kiinteät aineet ovat molekyyli rakenteeltaan tiheämpiä kuin kaasut, joten ääni etenee niissä nopeammin kuin kaasuissa. Ilmassa ääni etenee suuremmalla nopeudella lämpötilan tai paineen kasvaessa. (R.Knight 2008, 617.)

Äänen taajuudella tarkoitetaan äänen värähtelysyklien määrää per sekunti ja sen yksikönä käytetään hertsiä (Hz) (Rossing, Moore & Wheeler 2002, 23). Ihmiskorva pystyy aistimaan taajuudeltaan 20 Hz ja 20 000 Hz väliin sijoittuvia ääniä. Ihmisen kuuloalue saattaa kuitenkin supistua ihmisen ikääntyessä. (Blomberg & Lepoluoto 2005, 27.) Alle 20 Hz taajuudeltaan olevia ääniä kutsutaan infraääniksi, kun taas yli 20 000 Hz taajuudeltaan olevia ääniä kutsutaan ultraääniksi. Infraäänit ovat melko yleisiä ja voivat aiheuttaa kuulovaurioita liiallisesta altistuksesta. Ultraääniä käytetään laajalti esimerkiksi lääketieteellisissä tutkimuksissa, sillä niiden avulla voidaan kartoittaa eri kudosten rajapintoja. Ultraäänit eivät yleensä ole terveydelle haitallisia, sillä ne etenevät vain lyhyitä välimatkoja niiden erittäin lyhyestä aallonpituudesta johtuen. (Korpinen 2005.)

3.2 Melu

Melu on epämiellyttävää tai ei-toivottua ääntä. Myös ihmiselle mieluinen ääni voi olla joskus melua. Mieluinen musiikki luokitellaan meluksi jos sitä kuunnellaan liian kovalta, sillä se voi aiheuttaa pysyvän kuulovaurion liiallisessa altistuksessa. Melu on siis ääntä, joka on haitallista terveydelle tai joka koetaan muuten epämiellyttäväksi. (Björk 1997, 39.)

Liiallinen melualtistus voi aiheuttaa kuulon heikentymistä. Se on kuitenkin vain yksi monista melun terveyshaitoista. Liiallisella melualtistuksella voi olla monia fyysisiä sekä psyykkisiä terveysvaikutuksia, jotka voivat olla myös seurauksia toisistaan. Alla on listattu eräitä melun suoria ja epäsuoria terveysvaikutuksia:

- Kuulon heikentyminen
- Unihäiriöt
- Stressi
- Lihasjännitys
- Ärtynisyys
- Pulssin kiihtyminen

(Starck & Teräsvirta 2009, 53.)

Melun kokemiseen vaikuttavat ihmisen henkilökohtaiset ominaisuudet kuten aikaisemmat kokemukset, asenteet ja yleinen psykofyysinen tila. Melu on siis osaksi subjektiivinen käsite eli tietyn äänen epämiellyttävyys on aina ihmisen henkilökohtainen mielipide, vaikkakin terveydelle haitallinen ääni luokitellaan aina meluksi. (Björk 1997, 39.)

3.3 Äänen tasot

Puhuttaessa äänen tasoista eli ääniteho-, äänipaine- tai äänen intensiteettitasosta käytetään yksikkönä desibeliä (dB). Ihmiskorva pystyy aistimaan ääntä erittäin laajalla toiminta-alueella, jonka vuoksi on järkevää käyttää äänen tasojen yksikkönä 10-kantaiseen logaritmiin ja kahden suureen väliseen suhteeseen perustuvaa yksikköä. Äänen tasot kuvaavat mitatun ääniteho-, äänipaine- tai äänen intensiteettiarvon suhdetta niiden mää-

riteltyyn referenssiarvoon. Ihmiskorva myös aistii äänen tasojen vaihtelut logaritmisesti, joka tukee desibelin käyttöä niiden yksikkönä. (Garcia 2001, 16–17.)

Äänilähteen aiheuttama ilmanpaineen hetkellinen muutos on helpompaa mitata, kuin äänilähteen säteilemä ääniteho tai sen intensiteetti. Tästä syystä äänipainetaso on yleisimmin käytetty suure puhuttaessa äänen voimakkuudesta. (Everest & Pohlmann 2009, 22.)

3.3.1 Äänipainetaso

Äänipaineella (p) tarkoitetaan ääniaaltojen aiheuttamaa hetkellistä muutosta staattiseen ilmanpaineeseen, joka on tavallisesti noin 100 kPa. Äänipaineen yksikkönä käytetään pascalia (Pa). (Björk 1997, 43.) Ihmiskorvan aistimat äänipaineen vaihtelut ovat suuruudeltaan väliltä 20 μ Pa ja 200 Pa. Äänipaine suuruudeltaan 20 μ Pa on ihmisen kuulokynnys ja saa aikaan äänen, jonka ihminen pystyy juuri ja juuri kuulemaan 1000 Hz taajuudella. 200 Pa suuruinen äänipaine tunnetaan kipurajana ja se vastaa 120 - 130 dB äänipainetasoa taajuudesta riippuen. (Garcia 2001, 15; Korpinen 2005.)

Äänipainetaso (L_p) kuvaa mitatun äänipaineen suhdetta määriteltyyn referenssiarvoon kaavassa (1) osoitetulla tavalla. Äänipaineen referenssiarvo (p_{ref}) on 20 μ Pa. (Garcia 2001, 16–17.)

$$L_p = 10\text{Log}\left(\frac{p^2}{p_{ref}^2}\right) = 20\text{Log}\left(\frac{p}{p_{ref}}\right) \text{ dB} \quad (1)$$

jossa: p = äänipaine ja p_{ref} = äänipaineen referenssiarvo (Garcia 2001, 17).

Äänipaineen kymmenkertaistuessa nousee äänipainetaso 20dB. Tämä käy ilmi taulukossa (1), jossa on esitelty eräiden äänilähteiden aikaansaama äänipaine ja sitä vastaava äänipainetaso. Taulukon (1) kaltainen suhde äänipaineen ja äänipainetason välillä pätee pistelähteelle vapaassa kentässä, eikä se huomioi olosuhteiden aiheuttamaa mahdollista äänen vaimentumista tai vahventumista. (taulukko 1) (Everest & Pohlmann 2009, 26, 33.)

TAULUKKO 1. Eräiden äänilähteiden aiheuttama äänipaine ja vastaava äänipainetaso (Peltonen, Perkkiö & Vierinen 2000, 141, muokattu)

Äänilähde	Äänipaine (Pa)	Äänipainetaso (dB)
Rockkonsertti	200	140
Kipuraja 1000 Hz taajuudella	36	125
Suihkukone 100m etäisyydellä	20	120
Disko/Erittäin voimakas ukkonen	6,3	110
Paineilmapora	2	100
Katumelu/Korvalappustereot	0,2	80
Tavallinen puhe	0,02	60
Hiljainen toimisto	0,002	40
Puiden lehtien havina	0,0002	20
Kuulokynnys 2000 Hz taajuudella	0,00002	0

3.3.2 Äänitehotaso

Ääniteholla tarkoitetaan äänilähteen akustista säteilytehoa ja sen yksikkönä käytetään tehon yksikköä wattia (W). Äänilähteen akustinen säteilyteho, jonka ihmiskorva pystyy aistimaan, on välillä $10^{-12} - 10^6$ W. Esimerkiksi suihkukoneen ääniteho on noin 10^6 W, joka vastaa äänitehotasoksi (L_w) muutettuna 180 dB. (Björk 1997, 44.) Äänitehon referenssiarvoksi W_{ref} on asetettu 1 pW eli 10^{-12} W (Peters 2000, 20).

Äänitehotason laskukaavassa äänilähteen äänitehoa (W) verrataan äänitehon referenssiarvoon (W_{ref}) kaavassa (2) osoitetulla tavalla (Garcia 2001, 17). On tärkeää muistaa, että laitteiden tehoa ei voi suoraan verrata äänitehon referenssiarvoon, sillä äänilähteiden akustinen hyötysuhde on yleensä alle 1 %. Akustisella hyötysuhteella tarkoitetaan äänilähteen vaatiman tehon ja äänitehoksi muuntuneen tehon suhdetta. Esimerkiksi 10 W tehoinen kaiutin säteilee vain noin 0,1 W suuruisia äänitehoa. (Björk 1997, 50.) Autojen ja esimerkiksi yleisten kodin elektroniikkalaitteiden akustinen hyötysuhde on tavallisesti noin 0,001 %. (Rossing ym. 2002, 703.)

$$L_w = 10 \text{Log} \left(\frac{W}{W_{ref}} \right) \text{ dB} \quad (2)$$

jossa: W = ääniteho ja W_{ref} = äänitehon referenssiarvo, 1 pW (Garcia 2001, 17).

3.3.3 Äänen intensiteettitaso

Äänen intensiteetti kuvaa keskimääräistä äänitehon voimakkuutta, jonka äänilähde säteilee todelliseen tai kuviteltuun pintaan. Äänen intensiteetin yksikkö on täten W/m^2 . (Björk 1997, 44.) Äänen intensiteetti lasketaan jakamalla äänilähteen säteilemä ääniteho pinta-alalla kaavan (3) mukaisesti. Vapaassa kentässä pistelähde säteilee äänitehoa tasaisesti joka suuntaan (kuva 1). Tällöin käytetään pallon pinta-alan kaavaa $4\pi r^2$. Äänen intensiteetti on siis tehon ja pinta-alan suhde, joten pienentämällä pinta-alaa voidaan äänen intensiteettiä kasvattaa. Käytännössä tämä tarkoittaa, että äänilähteen säteilemät ääniaallot suunnataan tarkoituksella pienemmälle pinta-alalle (R.Knight 2008, 620–621.)

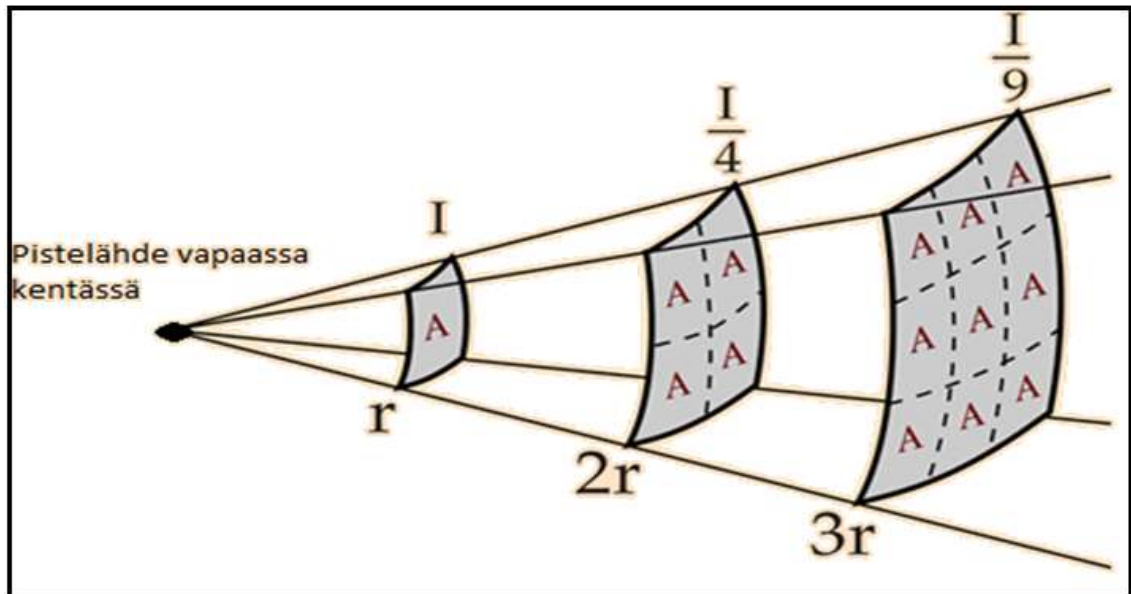
$$I = \frac{P}{A} \quad (3)$$

jossa vapaassa kentässä olevalle pistelähteelle: $A =$ pallon pinta-ala $4\pi r^2$ ja $P =$ pistelähteen ääniteho (Rossing ym. 2002, 100–102).

Äänen intensiteetin (I) avulla voidaan määrittää äänen intensiteettitaso (L_I) kaavassa (4) osoitetulla tavalla. Tätä varten tarvitaan tieto, että äänen intensiteetin referenssiarvoksi (I_{ref}) on määritelty 10^{-12} W/m^2 . Äänen intensiteettitason yksikkönä, kuten äänipaine- ja äänitehotason yksikkönä, käytetään desibeliä. (Peters 2000, 20.)

$$L_I = 10 \text{Log} \left(\frac{I}{I_{ref}} \right) \text{ dB} \quad (4)$$

jossa: $I =$ äänen intensiteetti ja $I_{ref} =$ äänen intensiteetin referenssiarvo (Peters 2000, 20).



KUVA 1. Pistelähteen tuottaman äänitehon eteneminen vapaassa kentässä (Nave 2016, muokattu)

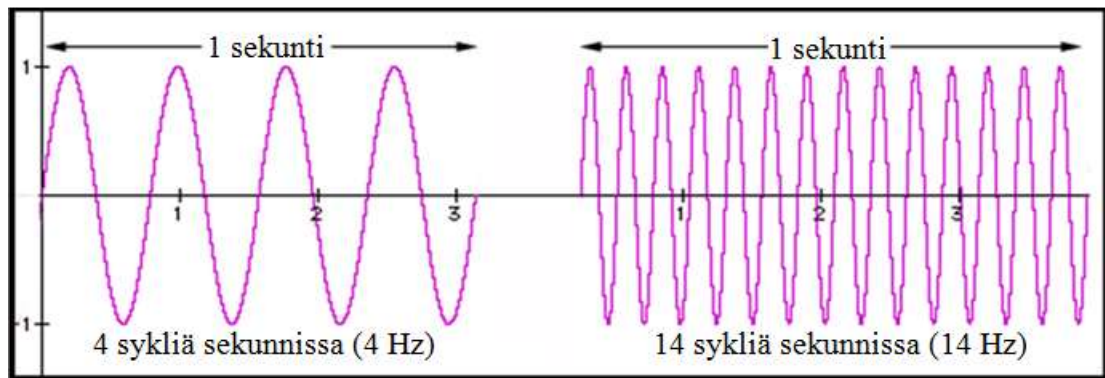
Äänen intensiteettitaso pienenee kääntäen verrannollisesti etäisyyteen nähden, kuten kuvassa (1) ja kaavassa (5) on havainnollistettu. Tämä tarkoittaa, että etäisyyden kaksinkertaistuksessa äänen intensiteettitaso laskee 6 dB. Sama pätee myös äänipainetasoon. On kuitenkin muistettava, että kaavan (5) kaltainen suhde intensiteettitason ja etäisyyden välillä toteutuu vain vapaassa kentässä riittävän kaukana äänilähteestä, eikä se huomio esimerkiksi äänen absorptiota tai heijastumista. (Munjal 2013, 9; Nave 2016.)

$$L_I(2r) - L_I(r) = 10 \text{Log} \left(\frac{r^2}{(2r)^2} \right) = -6 \text{ dB} \quad (5)$$

jossa: r = etäisyys äänilähteestä (Munjal 2013, 9).

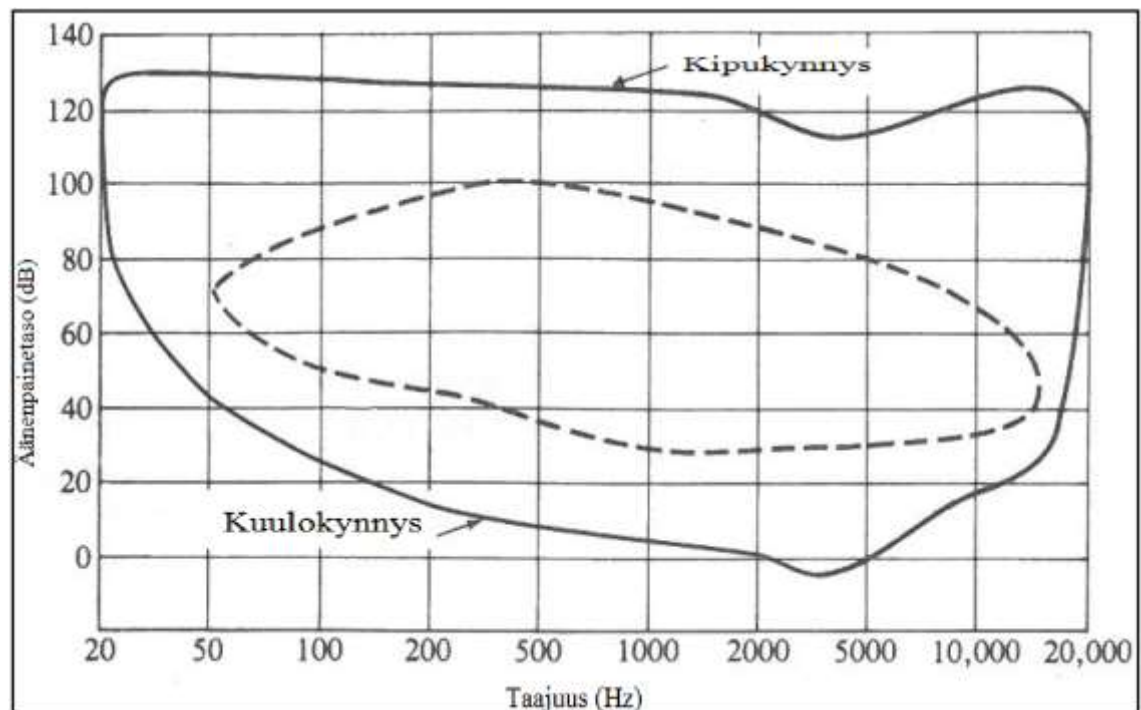
3.4 Taajuus ja spektri

Ääni syntyy kun äänilähde saa väliaineen värähtelemään. Ilmassa tämä tarkoittaa, että ilman molekyylit alkavat tihentyä ja harventua kuljettaen ääntä eteenpäin. Äänen taajuus kuvaa näiden tihentymien ja harventumien määrä tietyssä ajanjaksossa. Ajanjaksona käytetään yleensä yhtä sekuntia. Taajuuden yksikkönä käytetään hertsiä (Hz). Kuvassa (2) on havainnollistettu 4 Hz ja 14 Hz taajuukseltaan olevien ääniaaltojen ero.



KUVA 2. 4 Hz ja 14 Hz taajuudeltaan olevat ääniaallot kuvaajassa (Indiana University 2003, muokattu)

Hyväkuuloinen ihminen voi pystyä kuulemaan ääniä 20 Hz – 20 kHz välisillä taajuuksilla. Kuuloaistimuksen herkkyys ei ole kuitenkaan vakio kaikilla taajuuksilla, vaan se vaihtelee merkittävästi varsinkin ihmisen kuuloalueen taajuuksien ääripäissä. Ihmisen kuulokynnys, eli ääni jonka ihminen pystyy juuri kuulemaan, on 0 dB noin 2000 Hz taajuudella. 50 Hz taajuudella ihmisen kuulokynnys on taas noin 40 dB. (Tiinen & Hänninen 1997, 10.) Kuvasta (3) voidaan nähdä ihmisen kuulokynnystä ja kipukynnystä vastaava äänipainetaso eri taajuuksilla.



KUVA 3. Kuulokynnys ja kipukynnys eri taajuuksilla (Rossing ym. 2002, 112, muokattu)

Ääni on yleensä jakautunut monelle eri taajuudelle. Tätä jakaumaa kutsutaan äänen taajuusjakautumaksi tai äänen spektriksi. Laajalle spektrille jakautunutta ääntä kutsutaan laajakaistaiseksi ääneksi ja kapealle spektrille jakautunutta ääntä kutsutaan kapeakaistaiseksi ääneksi. Vain yhdelle taajuudelle sijoittuvaa ääntä kutsutaan äänekseksi. Ympäristömelu on yleisimmin laajakaistaista ääntä. Äänekset ovat ympäristömelussa harvinaisia. Äänen spektri voidaan selvittää tekemällä taajuusanalyysi. (Tiihinen & Hänninen 1997, 10–11.)

Ihmisen kuuloalue eli taajuudet 20 Hz – 20 kHz on jaettu oktaavikaistoihin siten, että jokaisen oktaavikaistan korkeampi taajuus on kaksi kertaa suurempi kuin sen alempi taajuus. Ihmisen kuuloalue voidaan jakaa kymmeneen oktaavikaistaan, joista jokainen voidaan jakaa kolmeen terssikaistaan. Terssikaistoja on siis yhteensä 30. Oktaavi- ja terssikaistoista puhuttaessa käytetään niiden erottamiseen kunkin keskitaajuutta. (Euroopan komissio 2009, 29.) Taulukossa (2) on esitetty kaikki käytetyt oktaavikaistat ja niihin sisältyvät terssikaistat. Taulukosta (2) näkyy, että jokaiseen oktaavikaistaan sisältyy kolme terssikaistaa ja ne on nimetty niihin kuuluvan keskimmäisen terssikaistan mukaan.

TAULUKKO 2. Oktaavikaistat ja niitä vastaavat terssikaistat (Garcia 2001, 19, muokattu)

Yleisesti käytetyt taajuuskaistat (Hz)			
Oktaavikaistat	Terssikaistat	Oktaavikaistat	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

3.4.1 Aallonpituus

Äänennopeus on ilmassa 20 °C lämpötilassa ja normaalissa ilmanpaineessa on noin 343 m/s (R.Knight 2008, 617). Tiedettäessä äänennopeus ja sen taajuus voidaan äänen aallonpituus laskea kaavan (6) osoittamalla tavalla. Ihmisen kuuloalueelle sijoittuvia taajuuksia vastaavat aallonpituudet ilmassa sijoittuvat välille 0,017 m – 17 m. (Fahy & Waker 1998, 4.)

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (6)$$

jossa: λ = aallonpituus, c = äänennopeus, f = äänen taajuus (Foreman 2012, 2).

Pienitaajuisten äänen aallonpituudet ovat pitkiä ja suuritaajuisten äänen aallonpituudet ovat lyhyitä (taulukko 3). Aallonpituudella on meluntorjunnassa tärkeä rooli, sillä melusteiden tulee olla vähintään samansuuruisia äänen aallonpituuden kanssa, jotta niillä olisi tehokasta vaikutusta äänen etenemiseen. (Björk 1997, 42.)

TAULUKKO 3. Äänen taajuuden ja aallonpituuden suhde ilmassa 20°C lämpötilassa (Talbot-Smith 2000, 13, muokattu).

Taajuus (Hz)	Aallonpituus (m)
16	21,43
20	17,15
30	11,43
50	6,86
100	3,43
200	1,72
500	0,69
1000	0,34
5000	0,069
10000	0,034
16000	0,021

3.4.2 Taajuuspainotus

Ihmisen kuulokynnyksen ja äänen kokeminen ei ole samanlaista kaikilla taajuuksilla. Varsinkin kuuloalueen ääripäissä eli pienillä ja suurilla taajuuksilla äänet kuullaan merkittävästi huonommin kuin 2000 Hz – 5000Hz välisillä taajuuksilla, jotka sijaitsevat ihmi-

sen herkimällä kuuloalueella. (Tiihinen & Hänninen 1997, 10; Everest & Pohlmann 2009, 30.)

Taajuuspainotuksella tarkoitetaan äänen taajuusjakautuman tiettyjen taajuuksien äänitasojen painottamista. A-taajuuspainotus (dBA) tai (dB(A)) on suunniteltu siten, että se vaimentaa varsinkin pienitaajuisia ääniä. Tämä johtuu siitä, että ihmisen kuulokynnys on erityisen korkea, jopa 20 dB – 80 dB, pienillä taajuuksilla. A-taajuuspainotusta käytetään ympäristömelun ohjearvoissa, sillä se on painotettu ihmisen kuuloaistimukseen perustuen. Kuvassa (4) on esitetty A-taajuuspainotuksen vaikutus eri taajuuksien äänitasoihin. (Tiihinen & Hänninen 1997, 12; Rossing ym. 2002, 112; Munjal 2013, 12–13.)

Muita taajuuspainotuksia ovat esimerkiksi B- ja C-taajuuspainotukset. B-taajuuspainotus on nykyään harvinainen ja se kehitettiin alun perin A- ja C-painotusten välimalliksi. B-painotus suodattaa pienten taajuuksien äänitasoja vähemmän suhteessa A-painotukseen (kuva 4). C-taajuuspainotus on suunniteltu voimakkaiden, yli 85 dB äänipainetasojen kanssa käytettäväksi. (Munjal 2013, 12; Acoustic Glossary 2016.) Äänitasomittareissa on nykyään useimmiten taajuuspainotusohjelmisto, joka pystyy muuntamaan mitatun äänipainetason suoraan A-taajuuspainotetuksi. (Rossing ym. 2002, 704.)

Taajuus (Hz)	Oktaavikaistan numero	A-taajuuspainotus (dB)	B-taajuuspainotus (dB)	C-taajuuspainotus (dB)
20		-50.5	-24.2	-6.2
25		-44.7	-20.4	-4.4
31.5		-39.4	-17.1	-3.0
40		-34.6	-14.2	-2.0
50		-30.2	-11.6	-1.3
63	1	-26.2	-9.3	-0.8
80		-22.5	-7.4	-0.5
100		-19.1	-5.6	-0.3
125	2	-16.1	-4.2	-0.2
160		-13.4	-3.0	-0.1
200		-10.9	-2.0	0
250	3	-8.6	-1.3	0
315		-6.6	-0.8	0
400		-4.8	-0.5	0
500	4	-3.2	-0.3	0
630		-1.9	-0.1	0
800		-0.8	0	0
1000	5	0	0	0
1250		+0.6	0	0
1600		+1.0	0	-0.1
2000	6	+1.2	-0.1	-0.2
2500		+1.3	-0.2	-0.3
3150		+1.2	-0.4	-0.5
4000	7	+1.0	-0.7	-0.8
5000		+0.5	-1.2	-1.3
6300		-0.1	-1.9	-2.0
8000	8	-1.1	-2.9	-3.0
10000		-2.5	-4.3	-4.4
12500		-4.3	-6.1	-6.2
16000		-6.6	-8.4	-8.5
20000		-9.3	-11.1	-11.2

KUVA 4. A-, B- ja C-taajuuspainotukset eri taajuuksilla (Munjal 2013, 14, muokattu)

3.4.3 Kapeakaistainen melu

Melu voidaan todeta kapeakaistaiseksi, mikäli siinä erottuu aistinvaraisesti ja taajuus-analyysiin perustuen ääneksiä tai kapeakaistaisia osia. Kapeakaistaisen melun suurempi häiritsevyys laajakaistaiseen meluun verrattuna huomioidaan käyttämällä mittaustulokseen lisättävää kapeakaistakorjausta. Sisätiloissa mitattujen melutasojen kapeakaistakorjauksen suuruus on 3 dB tai 6 dB riippuen siitä, kuinka selkeästi kapeakaistaista melu on. Ympäristömelulle sovelletaan valtioneuvoston päätöstä melutason ohjearvoista, jossa kapeakaistakorjaukseksi on määritelty 5 dB. Kapeakaistaisen melun mitattuun äänitasoon lisätään kapeakaistakorjaus ennen vertaamista ohjearvoihin. (Valtioneuvosto 1992; Sosiaali- ja terveysministeriö 2015, 1, 4.)

Melun kapeakaistaisuuden toteaminen taajuusanalyysistä tapahtuu terssikaistoja vertailemalla, jolloin taajuusanalyysistä tarkastetaan onko jonkin terssikaistan A-

taajuuspainotettu äänipainetaso yli 5 dB suurempi, kuin sitä edeltävän ja sitä seuraavan terssikaistan äänipainetason keskiarvo. (Ympäristöministeriö 1995, 27.)

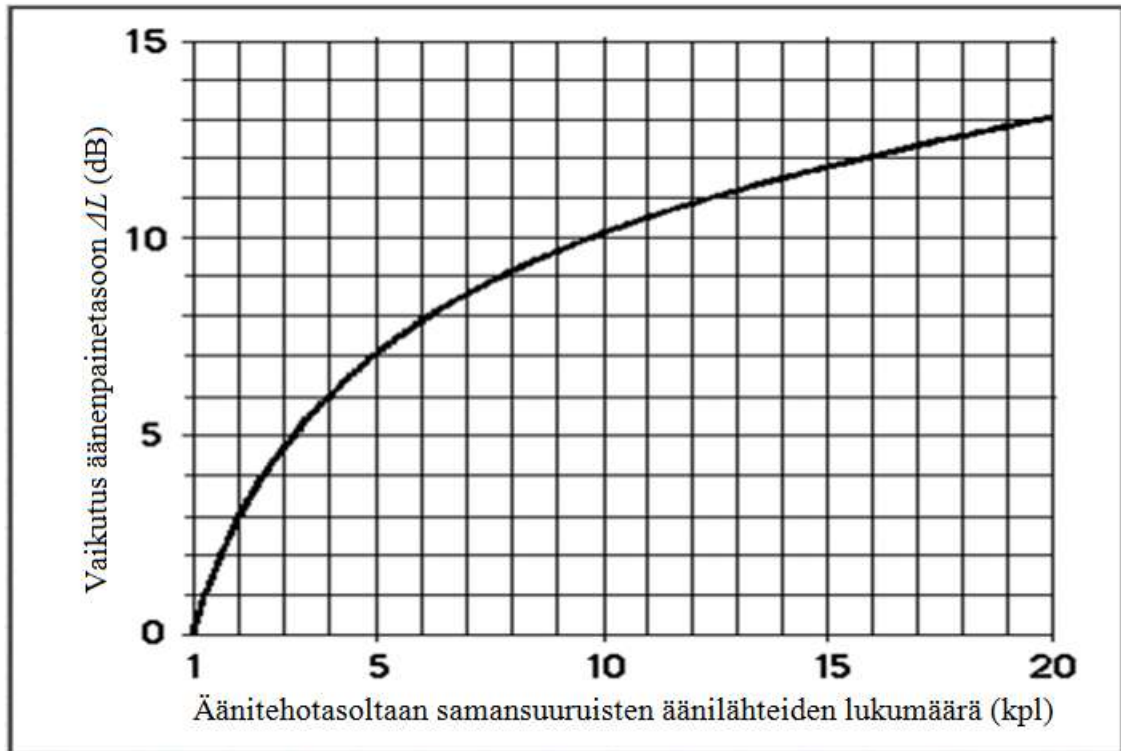
3.4.4 Impulssimainen melu

Melu voidaan todeta impulssimaiseksi, mikäli siinä erottuu kuulohavainnoin ja taajuusanalyysiin perustuen erotettavissa olevia toistuvia lyhyitä ääniä. Impulssimaisen melun suurempi häiritsevyys laajakaistaiseen meluun verrattuna huomioidaan käyttämällä impulssikorjausta. Sisätilojen impulssikorjaus on 5 dB tai 10 dB melun impulssimaisuuden vahvuudesta riippuen. Ympäristömelulle sovelletaan valtioneuvoston päätöstä melutason ohjearvoista, jossa impulssikorjaukseksi on määritelty 5 dB. Impulssimaisen melun impulssikorjaus lisätään mitattuun äänitasoon ennen ohjearvoihin vertaamista. (Valtioneuvosto 1992; Sosiaali- ja terveysministeriö 2015, 1, 4.)

Melun impulssimaisuus voidaan todeta mittausdatasta tarkastelemalla I- ja S-aikapainotettuja melun enimmäistasoja. Tällöin tarkastetaan onko I-aikapainotetulla enimmäistasolla (L_{AImax}) ja S-aikapainotetulla enimmäistasolla (L_{ASmax}) vähintään 5 dB suuruinen ero. (Ympäristöministeriö 1995, 27.)

3.5 Monen äänitason yhteenlasku

Ihmiskorvaan kulkeutuva kokonaisäänitaso on vain harvoin peräisin yhdestä äänilähteestä. Monen eri äänilähteen aikaansaamia äänitasoja ei voida kuitenkaan summata suoraan yhteen, sillä korva aistii ääntä logaritmisesti. Esimerkiksi kaksi samansuuruisen äänitason aiheuttavaa kaiutinta saavat yhdessä aikaan vain 3 dB suuremman äänitason. Käytännössä tämä tarkoittaa, että esimerkiksi kaksi 60 dB äänitason omaavaa kaiutinta saavat yhdessä aikaan 63 dB äänitason (kuva 5). Äänitasoltaan samansuuruisen äänilähteiden määrän ja sitä vastaavan äänipainetason muutoksen suhde on esitetty kuvassa (5). Kahdesta tai useammasta äänilähteestä peräisin olevat samantaajuiset äänet saattavat vaikuttaa toisiinsa vahvistavasti tai heikentävästi, jolloin äsken mainittu muistisääntö ei päde. Tällainen tilanne on kuitenkin harvinaisen, sillä yleensä ääni jakaantuu laajalti eri taajuuksille. (Peltonen ym. 2000, 146; Rossing ym. 2002, 105.)



KUVA 5. Äänitason kasvu suhteessa samanlaisten äänilähteiden määrään (Adding of Equal... 2016, muokattu)

Monen äänilähteen kokonaisäänitaso (L_{kok}) voidaan laskea N suuruiselle joukolle äänilähteitä kaavan (7) mukaisella tavalla. Tällöin kokonaisäänitason laskemiseen voidaan käyttää äänilähteiden äänipaine- tai intensiteettitasoja pisteessä, jonka kokonaisäänitaso halutaan tietää. (Peltonen ym. 2000, 146, 148.)

$$L_{kok} = 10 \text{Log} \left(\sum_{i=1}^N 10^{\frac{L_i}{10} \text{dB}} \right) \text{ dB} \quad (7)$$

jossa: L_i on yksittäisen äänilähteen äänipaine- tai intensiteettitaso. (Peltonen ym. 2000, 146, 148).

Äänipainetaso ja äänen intensiteettitaso ovat yhtä suuret, kun ilman tiheyden (ρ) ja äänen nopeuden (c) tuloksi saadaan $400 \text{ kgm/m}^3\text{s}$. Tällainen tilanne vallitsee esimerkiksi 30°C lämpötilassa ja 748 mm Hg ilmanpaineessa, joka on lähellä normaalia ilmanpainetta. Äänipainetaso ja äänen intensiteettitaso ovat normaalissa lämpötilassa ja paineessa niin lähellä toisiaan, että ne määritellään usein yhtä suureksi. Vaadittaessa erityistä tarkkuutta on kuitenkin hyvä käyttää äänilähteiden intensiteettejä tai intensiteettitasoja, koska käytettäessä äänipainetasoja on tulos aina arvio. (Rossing ym. 2002, 103–104.)

Kokonaisäänitaso voidaan siis laskea myös käyttämällä äänilähteiden äänipainearvoja kaavan (8) mukaisesti.

$$L_{kok} = 10 \text{Log} \left(\frac{p_1^2 + \dots + p_N^2}{p_0^2} \right) \text{ dB} \quad (8)$$

jossa: p = äänipaine ja p_0 = äänipaineen referenssiarvo. (Rossing ym. 2002, 106).

3.6 Keskiäänitaso eli ekvivalenttitaso

Kun mitataan pitkäaikaista ja usein vaihtelevaa melua käytetään yleensä keskiäänitasa eli ekvivalenttitasoa (L_{eq}). Tällaista vaihtelevaa melua voi olla esimerkiksi rakennustyömaan läheisyydessä, jolloin klo 7 – 16 välisellä ajanjaksolla on usein korkeampi äänitaso kuin työpäivän jälkeisellä ajanjaksolla klo 16 – 22. (Tiihinen & Hänninen 1997, 12; Mäkinen 2015.) Keskiäänitaso ei kuvaa tietyn ajanjakson äänitasojen aritmeettista keskiarvoa vaan tämän ajanjakson äänitehollista keskiarvoa (Liikonen 2013). Keskiäänitaso voidaan laskea joko taajuuspainotetuilla äänitasoilla tai ei-taajuuspainotetuilla äänitasoilla. Käytettäessä esimerkiksi A-taajuuspainotettuja äänitasoja ajalta 7 – 22 merkitään taajuuspainotettua keskiäänitasa $L_{Aeq, klo 7-22}$. Erityisen tärkeää on mainita alaindeksissä miltä ajanjaksolta keskiäänitaso on laskettu. Keskiäänitaso tietylle ajanjaksolle voidaan laskea käyttämällä kaavaa (9). Tällöin kokonaisaikana T käytetään yleensä kokonaisten tuntien määrää ja ajanjakson kestona T_i yhtä tuntia. Laskettaessa keskiäänitaso ajanjaksolle klo 7 – 22 käytetään kokonaisaikana siis viittätoista tuntia. (Tiihinen & Hänninen 1997, 12; Mäkinen 2015.)

$$L_{eq,T} = 10 \text{Log} \left(\frac{1}{T} \sum_{i=1}^N T_i 10^{\frac{L_{eq,T_i}}{10}} \right) \text{ dB} \quad (9)$$

jossa: N = ajanjaksojen lukumäärä, T_i = ajanjakson i kesto, T = kokonaisaika, jolle keskiäänitasa määritetään, L_{eq,T_i} = ajanjakson i keskiäänitaso. (Tiihinen & Hänninen 1997, 13).

3.7 Ympäristössä esiintyvät äänilähdetyypit

Äänilähteeksi kutsutaan objektia, joka saa väliaineen värähtelemään ja tuottaa näin ääntä (Björk 1997, 50). Äänilähteitä esiintyy kolmea eri tyyppiä: piste-, viiva- ja tasolähteitä. Äänilähde voidaan yleensä luokitella pistelähteeksi, mikäli sitä tarkastellaan tarpeeksi suurelta etäisyydeltä. (Eargle 2012, 8–9.) Vapaassa kentässä oleva pistelähde säteilee ääntä tasaisesti joka suuntaan, jolloin se muodostaa palloaallon. Vastaavasti vapaassa kentässä oleva viivalähde muodostaa sylinteriaallon ja tasolähde muodostaa tasoallon. (Björk 1997, 60.) Äänilähteen tyyppi on tärkeässä roolissa arvioitaessa äänen etäisyysvaimenemista, sillä ääni vaimenee tietyillä etäisyyksillä erilailla äänilähdetyypistä riippuen (Eargle 2012, 8–9).

Äänilähde voidaan luokitella pistelähteeksi silloin, kun sitä tarkastellaan etäisyydeltä, joka on yli viisinkertainen äänilähteen pisimpään sivuun nähden. Esimerkiksi tehtaan pinta-alaltaan suorakulmion muotoinen tuotantolinjasto, joka on 20 metriä pitkä ja 1,5 metriä leveä ja korkea on läheltä tarkasteltuna viivalähde, mutta tarkasteltaessa yli 100 metrin etäisyydeltä voidaan se luokitella pistelähteeksi, mikäli se säteilee ääntä tasaisesti koko pituudellaan. Kaikkia viivalähteitä ei kuitenkaan voida luokitella pistelähteeksi edes aiemmin mainitun etäisyysvaatimuksen täytyessä. Esimerkiksi ruuhkainen tie on suureltakin etäisyydeltä parempi kuvata sarjana pistelähteitä, jotka yhdessä muodostava viivalähteelle tyypillisen sylinteriaallon. (Everest & Pohlmann 2009, 33, 36.)

3.8 Ilmäänen eteneminen ja vaimeneminen

Äänen etenemiseen ympäristössä vaikuttavat monet eri ympäristön ominaisuudet ja olosuhteet. Alla olevassa kaavassa (10) on esitetty äänen etenemiseen ja vaimenemiseen mahdollisesti vaikuttavat tekijät ympäristössä. Äänen kokonaisvaimeneminen muodostuukin siis vallitsevista olosuhteista, kuten ilman turbulenssin vaikutuksesta, lämpötilasta, tuulesta ja ilman absorptiosta, sekä ympäristön ominaisuuksien vaikutuksista, kuten kasvillisuudesta, esteistä ja maatyypistä. Etäisyys on yksi tärkeimmistä tekijöistä äänen etenemisessä ja sen vaimenemisessa. (Björk 1997, 67; Rossing ym. 2002, 705.) Kaavassa (10) esitetyt äänen etenemiseen vaikuttavat tekijät voivat olla joko vaimentavasti tai vahventavasti äänen etenemiseen vaikuttavia. Kuitenkin esimerkiksi ilman absorption ja etäisyysvaimenemisen vaikutukset ovat aina negatiivisia eli vaimentavia. Ääntä vaimen-

tavalle tekijälle käytetään etumerkinä miinusmerkkiä. Vastaavasti äänen etenemiseen vahventavasti vaikuttavalle tekijälle käytetään etumerkinä plusmerkkiä. (Mäkinen 2016.)

$$L_p = L_w + \Delta L_G + \Delta L_{Air} + \Delta L_{GF} + \Delta L_{GR} + \Delta L_V + \Delta L_O + \Delta L_{WE} + \Delta L_{OT} \quad (10)$$

jossa:

- L_w = änilähteen äänitehotaso
- ΔL_G = etäisyysvaimeneminen
- ΔL_{Air} = ilman absorptio
- ΔL_{GF} = maanmuotojen vaikutus
- ΔL_{GR} = maatyypin vaikutus (absorptio tai heijastuminen)
- ΔL_V = kasvillisuuden vaikutus
- ΔL_O = esteiden vaikutus
- ΔL_{WE} = sääolojen vaikutus
- ΔL_{OT} = mahdolliset muut vaikuttavat tekijät

(Mäkinen 2015.)

3.8.1 Äänen eteneminen vapaassa kentässä ja etäisyysvaimentuminen

Vapaalla kentällä tarkoitetaan teoreettista tilannetta, jolloin ääni ei heijastu, absorboidu, taitu tai poikkea suunnastaan ympäristöstä tai olosuhteista johtuen. Tällainen tilanne on yleensä harvinainen, mutta esimerkiksi kaiuttomassa huoneessa olevat akustiset ominaisuudet saattavat lähes vastata vapaan kentän ominaisuuksia. Vapaassa kentässä pätevät monet yleisesti käytetyt muistisäännöt äänen etenemiselle. Äänilähteen aiheuttama äänipainetaso vaihtelee etäisyyden funktiona ja esimerkiksi etäisyyden kaksinkertaistuessa laskee pistelähteen äänipainetaso 6 dB. Vapaassa kentässä äänilähteen aiheuttama äänipainetaso on yhden metrin päässä 11 dB alhaisempi, kuin äänilähteen äänitehotaso. (Rossing ym. 2002, 101; Everest & Pohlmann 2009, 33.)

Äänilähteen aiheuttama äänipainetaso tietyllä etäisyydellä, ottaen huomioon ainoastaan etäisyysvaimeneminen, voidaan laskea äänilähteen äänitehotasosta kaavan (11) osoittamalla tavalla. Pistelähteen äänipainetasoa laskettaessa käytetään pallon pinta-alaa $4\pi r^2$, koska pistelähde säteilee ääntä tasaisesti joka suuntaan vapaassa kentässä. Viivalähteel-

le, jonka pituus on l , käytetään pallon pinta-alan sijasta sylinterin pinta-alaa $2\pi rl$, koska viivalähde säteilee ääntä vapaassa kentässä muodostaen sylinteriaallon. (Björk 1997, 60; Mäkinen 2015.)

$$L_p(r) = L_w + 10\text{Log}\left(\frac{Q}{4\pi r^2}\right) \text{ dB} \quad (11)$$

jossa: Q = äänen suuntakerroin (1–8), r = etäisyys äänilähteestä, $4\pi r^2$ = Pallon pinta-ala, L_w = äänilähteen äänitehotaso (Munjäl 2013, 9).

Kaavassa (11) osoitettua laskukaavaa varten tarvitaan tieto äänen suuntakertoimesta. Äänen suuntakerroin riippuu äänilähteen sijainnista kaavan (12) mukaisesti. (Munjäl 2013, 9)

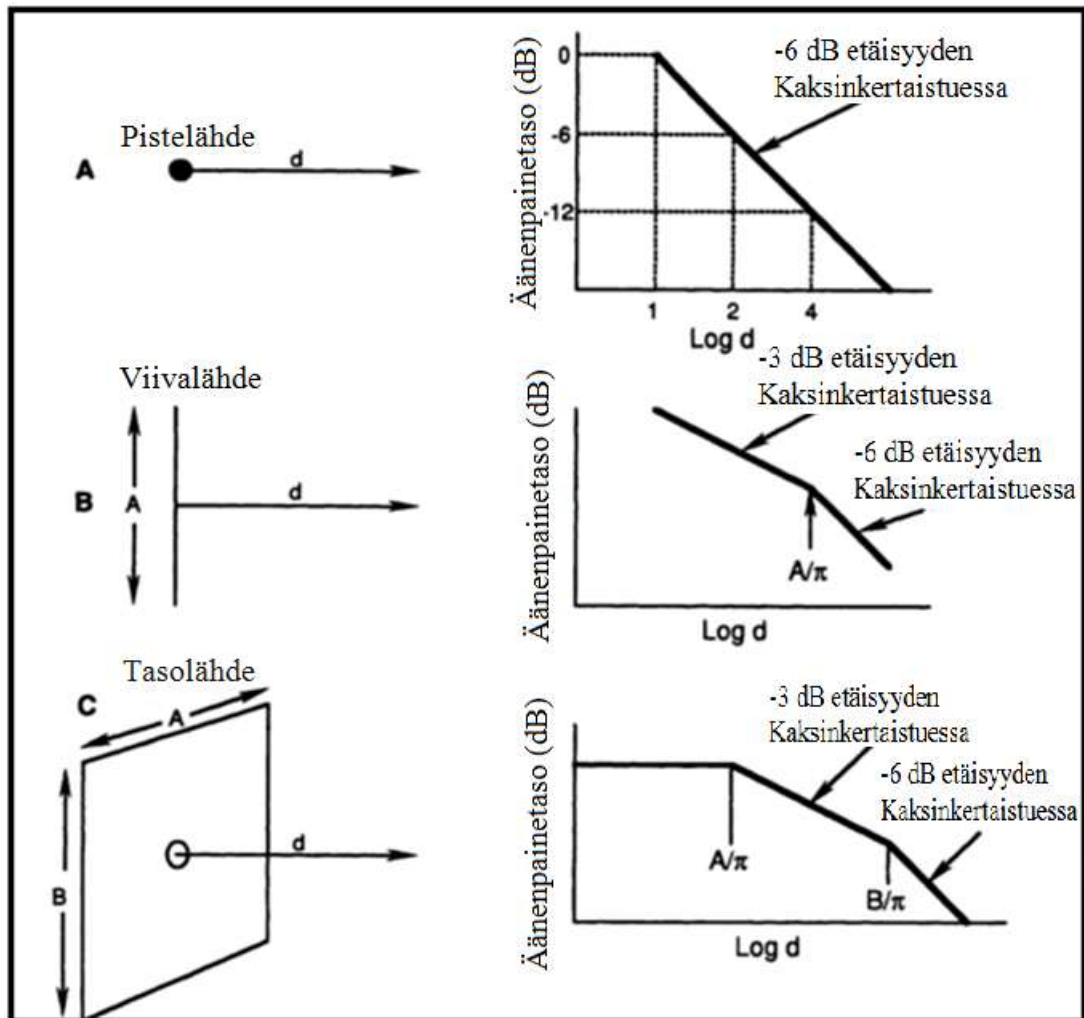
$$Q = 2^{n_s} \quad (12)$$

jossa:

- n_s = äänilähteeseen kosketuksissa olevat pinnat
- $n_s = 0$ äänilähteen ollessa vapaassa kentässä
- $n_s = 1$ äänilähteen ollessa esimerkiksi tasaisella alustalla
- $n_s = 2$ äänilähteen ollessa kahden pinnan risteämäkohdassa
- $n_s = 3$ äänilähteen ollessa kolmen pinnan risteämäkohdassa (nurkassa)

(Munjäl 2013, 9.)

Alla olevassa kuvassa (6) on havainnollistettu eri äänilähdetyyppien likimääräinen etäisyysvaimeneminen etäisyyden kaksinkertaistuksessa vapaassa kentässä. Pistelähde vaimenee aina 6 dB äänipainetasona mitattuna etäisyyden kaksinkertaistuksessa, kun taas viiva- ja tasolähde eivät noudata samaa lineaarista kaavaa. Viivalähde, jonka pisimmän sivun pituus on (A) vaimenee 3dB etäisyyden kaksinkertaistuksessa, kunnes etäisyys A/π on saavutettu. Tämän jälkeen viivalähteen etäisyysvaimeneminen on 6 dB etäisyyden kaksinkertaistuksessa. Tasolähteen, jonka lyhyempi sivu on pituudeltaan (A) ja pidempi sivu (B) , äänipainetaso ei vaimene ollenkaan ennen kuin etäisyys A/π on saavutettu. Etäisyyksien A/π ja B/π välissä tasolähteen äänipainetaso vaimenee 3 dB etäisyyden kaksinkertaistuksessa. Etäisyyden B/π jälkeen tasolähteen etäisyysvaimeneminen on sama kuin pistelähteellä eli 6 dB jokaista etäisyyden kaksinkertaistumista kohti. (kuva 6.) (Eargle 2012, 8–9.)



KUVA 6. Piste-, viiva- ja tasolähteiden etäisyysvaimentuminen vapaassa kentässä (Eargle 2012, 9, muokattu)

Tarkasteltaessa tarpeeksi suurelta etäisyydeltä voidaan äänilähde yleensä luokitella pistelähteeksi (Eargle 2012, 9). Tällöin voidaan käyttää etäisyysvaimenemisen laskemiseen kaavaa (13), johon tarvitaan tieto äänilähteen aiheuttamasta äänipainetasosta tietyllä etäisyydellä (Mäkinen 2015). Myös aiemmin esitettyä kaavaa (11) voidaan käyttää etäisyysvaimenemisen laskemiseen, jolloin tarvitaan tieto äänilähteen äänitehotasosta ja äänen suuntakertoimesta (Munjäl 2013, 9).

$$\Delta L_p = -10 \text{Log} \left(\frac{r}{r_0} \right)^2 \quad (13)$$

jossa: r_0 = etäisyys jossa pistelähteen äänipainetaso tiedetään (Mäkinen 2015.)

Viivalähteen, jonka pisimmän sivun pituus on x , etäisyysvaimeneminen voidaan laskea etäisyydelle x/π asti kaavassa (14) osoitetulla tavalla. Tämän jälkeen viivalähteen etäi-

syysvaimeneminen voidaan laskea pistelähteen etäisyysvaimenemisen kaavalla (13). Vastaavasti tasolähteen, jonka lyhyemmän sivun pituus on x ja pidemmän sivun y , etäisyysvaimeneminen voidaan laskea etäisyyden x/π jälkeen kaavalla (13) etäisyydelle y/π asti. Etäisyyden y/π jälkeen voidaan tasolähteen etäisyysvaimeneminen laskea kaavan (14) mukaisesti. (Eargle 2012, 9.)

$$\Delta L_p = -10 \text{Log} \left(\frac{r}{r_0} \right) \quad (14)$$

jossa: r_0 = etäisyys jossa viivalähteen äänipainetaso tiedetään (Mäkinen 2015.)

3.8.2 Ilman absorptio

Ääniaallon edetessä ilmassa, menettää se jatkuvasti pienen osan energiastaan lämmönjohtumis-, viskoosi- ja molekyylien relaksaatiohäviöstä johtuen. Nämä yhdessä aiheuttavat äänen absorptio ilmassa, jonka suuruus riippuu vallitsevista olosuhteista, etäisyydestä ja äänen taajuudesta. (Björk 1997, 61.)

Äänen absorptio ilmaan riippuu pääosin äänen taajuudesta, mutta siihen vaikuttavat myös ilman lämpötila, suhteellinen kosteus ja paine. Suuritaajuisten äänten absorptio ilmaan on selvästi suurempaa, kuin pieni- ja keskitaajuisten äänten (taulukko 4). Tämä johtuu siitä, että suuritaajuisten äänten aallonpituus on lyhyempi, kuin pieni- ja keskitaajuisilla äänillä. Lyhyt aallonpituus taas tarkoittaa, että samalla äänen etenemismatkalla tapahtuu enemmän ilman molekyylien tihentymiä ja harventumia, josta johtuen ääniaalto menettää edetessään enemmän energiaa. Taulukossa (4) on esitetty äänen taajuuden sekä ilman lämpötilan ja suhteellisen kosteuden vaikutus ilman absorptio suuruuteen. Ilman absorptiosta puhuttaessa käytetään yksikkönä usein dB/km tai dB/100m. (Peltonen ym. 2000, 149; Garcia 2001, 155.)

TAULUKKO 4. Ilman absorption vaikutus äänen vaimenemiseen (dB/km) (Garcia 2001, 155, muokattu)

Lämpötila (°C)	Suhteellinen kosteus (%)	Taajuus (Hz)							
		62,5	125	250	500	1000	2000	4000	8000
0	10	0,42	1,3	4	9,25	14	16,6	19	26,4
	50	0,18	0,41	0,82	2,08	6,83	23,8	71	147
	90	0,13	0,37	0,76	1,45	3,66	12,1	43,2	138
10	10	0,34	0,79	2,29	7,52	21,6	42,3	57,3	69,4
	50	0,16	0,49	1,05	1,9	4,26	13,2	46,7	155
	90	0,1	0,35	1	2	3,54	8,14	25,7	92,4
20	10	0,37	0,78	1,58	4,25	14,1	45,3	109	175
	50	0,12	0,45	1,32	2,73	4,66	9,86	29,4	104
	90	0,07	0,27	0,97	2,71	5,3	9,06	20,2	62,6
30	10	0,36	0,96	1,82	3,4	8,67	28,5	96	260
	50	0,09	0,35	1,25	3,57	7,03	11,7	24,5	73,1
	90	0,05	0,2	0,78	2,71	7,32	13,8	23,5	53,3

3.8.3 Maanpinnan vaikutus

Maanpinnan vaikutus äänen etenemiseen riippuu suurimmalta osin äänen heijastuksista, jotka voivat vaikuttaa ilmassa etenevään ääniaaltoon vaimentavasti tai vahventavasti. Näiden heijastusten määrään vastaavasti vaikuttavat maanmuodot, maatyypit ja äänen taajuus. Maatyypit voi vaikuttaa äänen etenemiseen myös absorboimalla siihen kohdistuvaa ääntä. Maanpinnan vaikutus äänen etenemiseen riippuu siis maanmuodoista ja maatyypistä, sekä äänen taajuudesta. Maanpinnan vaikutuksen suuruuteen vaikuttavat myös äänilähteen ja vastaanottimen välinen etäisyys ja niiden korkeus. (ISO 9613–2 1996, 5–6.)

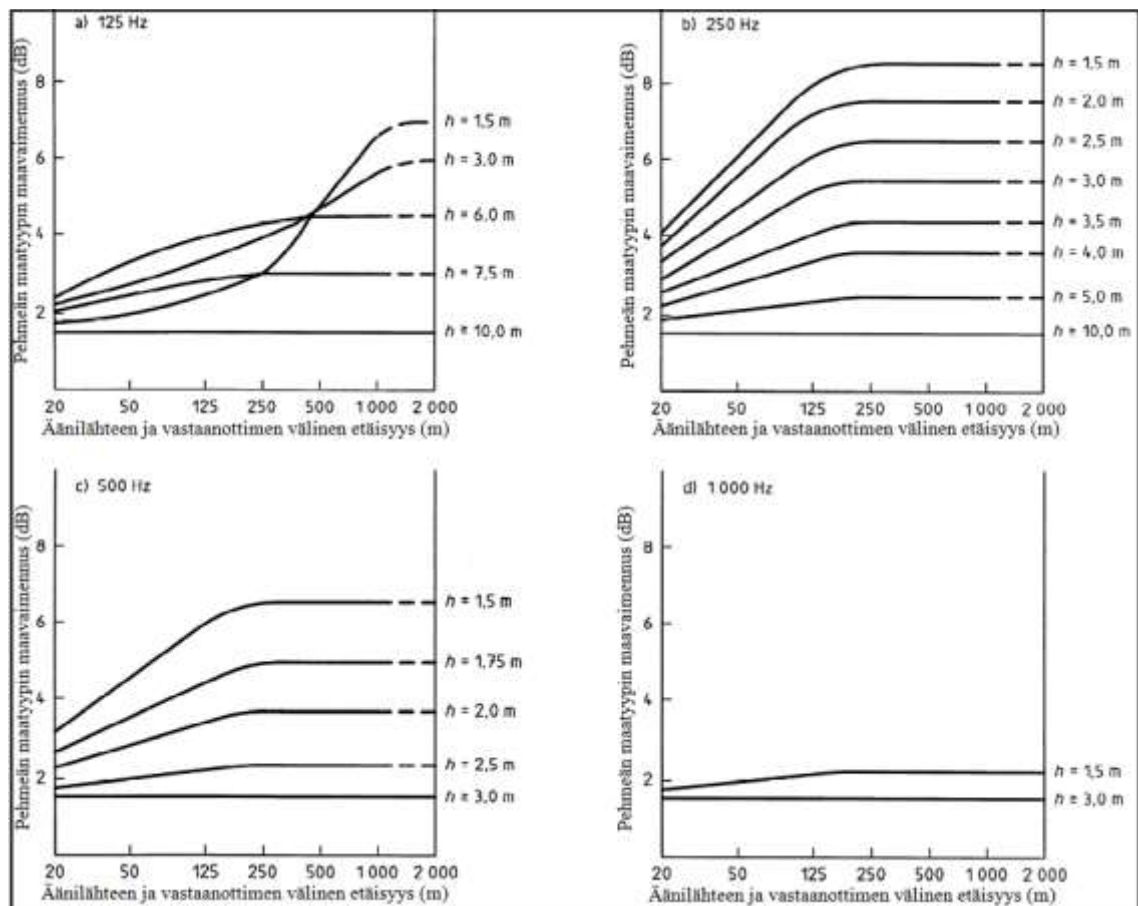
Maatyypit luokitellaan yleensä joko kovaksi tai pehmeäksi. Kovaksi maatyypiksi voidaan luokitella asfaltti, kallio tai vesi. Pehmeäksi maatyypiksi taas voidaan luokitella esimerkiksi ruoho, pehmeä maa tai lumi. (Tiihinen & Hänninen 1997, 24–25; Garcia 2001, 153–154.)

Maatyyppien laatu voi vaikuttaa tietyssä pisteessä mitattuun äänitasoon vaimentavasti tai vahventavasti. Pehmeä maa absorboi osan siihen kohdistuvasta äänestä yli 125Hz taajuudella, kun taas alle 125Hz taajuudella myös pehmeä maa voidaan luokitella kovaksi eli ääntä heijastavaksi maaksi. Kovaksi luokiteltu maa heijastaa ääntä ja voi vaikuttaa näin vahventavasti tietyn pisteen äänitasoon. Kovan maan aiheuttama äänen heijastumi-

nen voi saada aikaan jopa 6 dB nousun äänipainetasoon, jos maasta heijastuva ääniaalto on samanvaiheinen ilmassa etenevän ääniaallon kanssa. (Björk 1997, 63–64; Tiihinen & Hänninen 1997, 24, Garcia 2001, 153–154.)

Maatyypin aiheuttama äänen vaimentuminen riippuu maatyypin absorptiokertoimesta (α) ja äänen taajuudesta. Maatyypin absorptiokerroin on väliltä 0 – 1, jossa maatyypin absorptioarvo nolla tarkoittaa ääntä täysin heijastavaa pintaa. Maatyypin absorptioarvo pehmeälle maalle on suuruudeltaan yksi. Edellä mainittu arvo voi olla myös väliltä 0 – 1 tilanteissa, jossa maatyypin koostuu osaksi ääntä heijastavasta materiaalista ja osaksi ääntä absorboivasta materiaalista. Tällöin maatyypin absorptioarvo lasketaan kovan- ja pehmeän maan suhteesta tarkasteltavalla alueella. (ISO 9613–2 1996, 6–7.)

Kuviossa (1) on esitetty pehmeän maanpinnan aiheuttama maavaimennus tasaisella maanpinnalla äänilähteen ja vastaanottimen välisen etäisyyden, taajuuden, sekä äänilähteen ja vastaanottimen korkeuden (h) funktiona. Maavaimennus on esitetty kuviossa (1) taajuuksille 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz ja 1000 Hz. (ISO 9613–2 1996, 6.) Alle 125 Hz taajuuksilla ei esiinny pehmeästä maatyypistä johtuvaa maavaimennusta, sillä myös pehmeä maatyypin luetaan ääntä heijastavaksi alle 125 Hz taajuuksilla. Yli 1000 Hz taajuuksilla maavaimennus on hyvin vähäistä. (Tiihinen & Hänninen 1997, 25.) Kuviossa (1) voidaan nähdä, että pehmeästä maatyypistä johtuva maavaimennus on suurimmillaan 250 Hz taajuudella, jolloin maavaimennus voi olla 200 metrin matkalla jopa - 8 dB kun äänilähde ja vastaanotin sijaitsevat lähellä maata. Kuviossa (1) voidaan nähdä myös, että äänilähteen ja vastaanottimen korkeudella maanpinnasta on erittäin suuri vaikutus maavaimennuksen suuruuteen.



KUVIO 1. Maavaimennus tasaisella maanpinnalla ja pehmeälle maatyypille 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz ja 1000 Hz taajuuksilla eri etäisyyksillä ja eri äänilähde- ja vastaanotin-korkeuksilla (ISO 9613-2 1996, 6, muokattu)

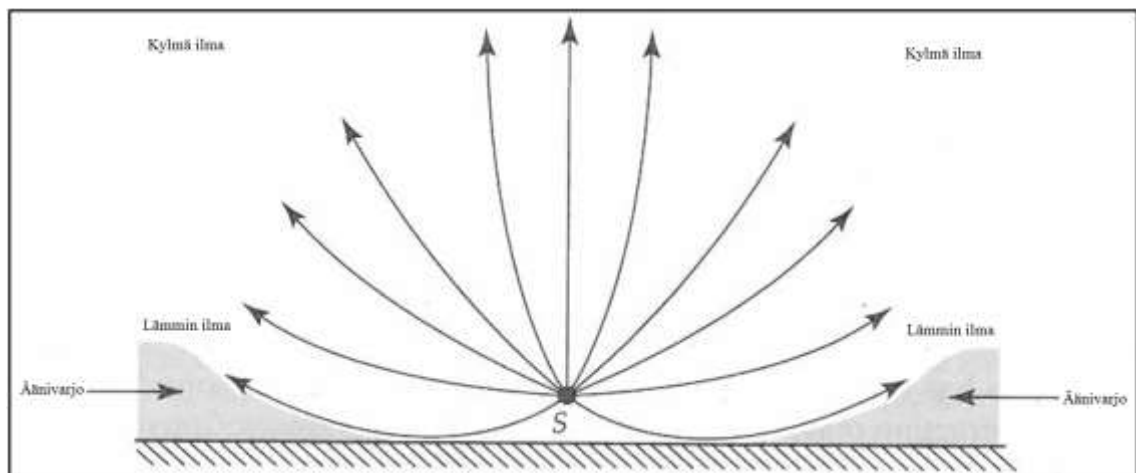
3.8.4 Kasvillisuuden vaikutus

Kasvillisuuden vaikutus äänen etenemiseen on yleisesti yliarvioitu, joka saattaa johtua näköesteen psykologisesta vaikutuksesta melun kokemiseen. Puusto ja pensaat vaikuttavat äänen etenemiseen kuitenkin jossain määrin. Puiden juuret tekevät maasta huokoisemman, joka edesauttaa äänen absorptiota maahan. Puiden rungot saavat aikaan keski-taajuuksien äänen sirontaa ja puiden lehdet edesauttavat suuritaajuuksien äänen sirontaa. Tiheän kasvillisuuden vaikutus äänen ekvivalenttitasoon on yleensä suuruudeltaan noin 0,1 dBA yhtä metriä kohden. (Garcia 2001, 157.) Kasvillisuus saattaa myös vaikuttaa lämpötilaan ja tuulennopeuteen paikallisesti, joista aiheutuva vaikutus äänen etenemiseen saattaa olla jopa suurempi kuin kasvillisuuden aiheuttama äänen sironta (Tihiinen & Hänninen 1997, 25).

3.8.5 Ilman lämpötilan ja tuulen vaikutus

Äännopeuden muuttuessa tapahtuu äänen taittumista, joka vaikuttaa äänen etenemiseen oleellisesti varsinkin etäisyyden kasvaessa. Äännopeus kasvaa lämpötilan kasvaessa, josta johtuen ääni taittuu aina kylmän ilmassa suuntaan. Äänen taittumista kylmän ilmassa suuntaan on havainnollistettu kuvassa (7). (Björk 1997, 64–65; Rossing ym. 2002, 53.)

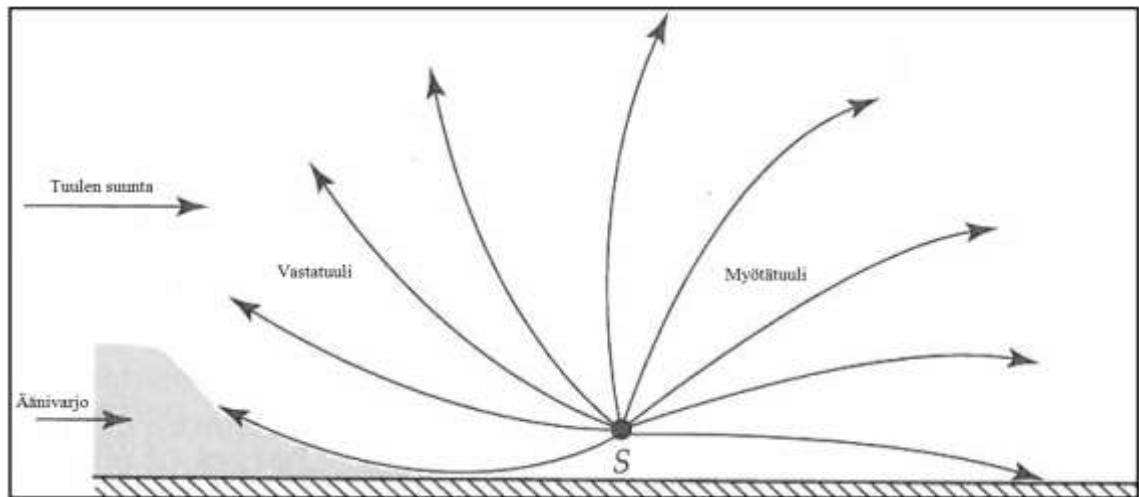
Troposfäärissä, eli alimmassa ilmakerroksessa, lämpötila laskee yleensä korkeuden kasvaessa (Karttunen 2016). Tästä johtuu, että normaalisti ääni taittuu ylöspäin lämpötilan vaikutuksesta. Kuitenkin esimerkiksi pilvettöminä öinä tai aikaisin aamulla saattaa lämpötila nousta korkeuden kasvaessa, joka saa äänen taittumaan alaspäin. Olosuhteissa, joissa ääni taittuu alaspäin voi ääni kuulua tavallista pidemmän matkan päähän. Ilman lämpötilan vaikutus äänen etenemiseen korostuu tyynellä säällä. (Björk 1997, 64–65; Rossing ym. 2002, 53.)



KUVA 7. Äänen taittuminen ylempänä olevaa kylmempää ilmassa kohti (Everest & Pohlmann 2009, 121, muokattu)

Äänen nopeuteen vaikuttaa myös tuuli. Tuulennopeus kasvaa normaalisti mitä korkeammalta maanpinnasta sitä tarkastellaan. Äänen todellinen nopeus muodostuu äännopeuden ja tuulennopeuden summasta, josta johtuen myötätuulussa ääni etenee ylempänä ilmassa nopeammin kuin lähempänä maanpintaa. Tämä saa aikaan äänen taittumisen alaspäin (kuva 8). Vastatuulussa ilmiö on päinvastainen eli ylempänä ilmassa äänen nopeus on pienempi kuin lähempänä maanpintaa, jolloin ääni taittuu ylöspäin

(kuva 8). Äänen taittuessa ylöspäin voi muodostua äänivarjoja, joissa äänipainetaso on alhaisempi. Tuulen vaikutus äänen etenemiseen on yleensä suurempi kuin ilman lämpötilan. Tämä johtuu siitä, että tuuli sekoittaa lämpötilaltaan erisuuruisia ilmassoja ja vähentää näin ilman lämpötilan vaikutusta. (Björk 1997, 64–65; Everest & Pohlmann 2009, 121; Wang, Pereira & Hung 2005, 471–472.)



KUVA 8. Tuulen suunnan vaikutus äänen etenemiseen (Everest & Pohlmann 2009, 121, muokattu)

3.8.6 Melusteiden vaikutus

Melusteet voivat olla tehokas keino torjua melua ja esimerkiksi moottoritien viereen sijoitetun meluvallin melua vaimentava vaikutus on yleensä noin 7 – 10 dBA (Rossing s.705). Meluntorjunnassa tehokkaimpia ovat äänen aallonpituuteen nähden mahdollisimman suuret melusteet. Melusteen läpäisevällä äänellä ei ole yleensä suurta merkitystä kokonaisäänitasoon, vaan suurempi merkitys on esteen koolla ja sillä ettei esteessä ole esimerkiksi aukkoja, joista melu pääsee esteen kiertämään. (Björk 1997, 66; Rossing ym. 2002, 737.)

Melusteen tarkoitus on luoda sen taakse äänivarjo, jonka suuruus riippuu melusteen koosta ja melun voimakkuudesta sekä taajuusjakaumasta. Melua, joka taittuu melusteen yli, kutsutaan diffraktoituneeksi meluksi. Pienitaajuinen melu taittuu melusteen yli herkemmin kuin suuritaajuinen melu johtuen pienitaajuisen melun pitkästä aallonpituudesta. Tästä johtuen melusteet toimivat parhaiten sijoitettuna äänilähteen välittömään

läheisyyteen, jolloin ääniaalto on jyrkemmässä kulmassa esteeseen nähden. Meluesteet vaimentavat ääntä sitä tehokkaammin mitä suurempitaajuista se on. (Björk 1997, 66–67.)

Meluesteen aikaansaamaa melun diffraktoitumista ja siitä johtuvaa melun vaimenemista voidaan arvioida Fresnelin numerolla, jolle ei ole määriteltyä yksikköä. Fresnelin numeron laskemiseen tarvitaan tieto meluesteen vaikutuksesta äänen kulkeman matkan pituuteen, äänen taajuudesta ja äänen etenemisnopeudesta. Fresnelin numeron laskemiseen voidaan käyttää myös äänen aallonpituutta, jonka laskeminen on havainnollistettu aiemmin yhtälössä (6). Fresnelin numero voidaan laskea alla esitetyn yhtälön (15) mukaisella tavalla. (Wang, Pereira & Hung 2005, 472–473; U.S Department of Transportation 2011.) Alla olevalla kaavalla (15) voidaan laskea Fresnelin numero ainoastaan esteen ylittävälle melulle ja se olettaakin esteen olevan loputtoman pitkä (Wang ym. 2005 472). Fresnelin numero voidaan laskea myös ottaen huomioon esteen sivuilta kiertävä melu tapauksissa, joissa melu pääsee esteen kiertämään. Esteen sivuilta kiertävälle melulle sovelletaan kuitenkin eri laskukaavaa. (Kragh ym. 1982, 36–39.)

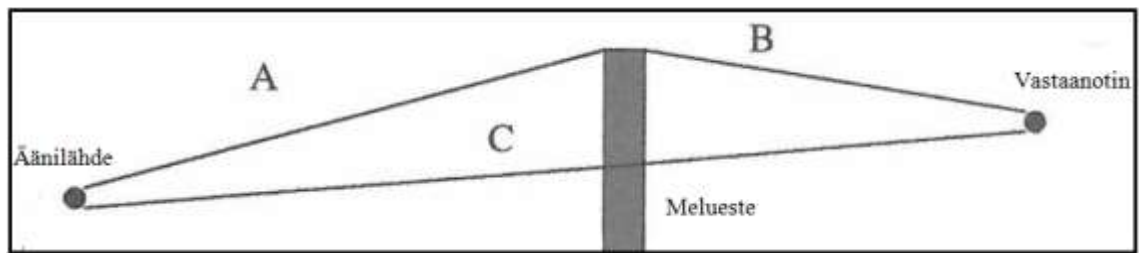
$$N_0 = \pm 2 \left(\frac{\delta_0}{\lambda} \right) = \pm 2 \left(\frac{f \delta_0}{c} \right) \quad (15)$$

jossa: δ_0 = meluesteen aikaansaama lisäys äänen kulkemaan matkaan, λ = äänen aallonpituus, f = äänen taajuus, c = äänen nopeus (U.S Department of Transportation 2011).

Lisäys äänen kulkemaan matkaan (δ) kuvan (9) kaltaisessa tilanteessa voidaan laskea yhtälön (16) osoittamalla tavalla.

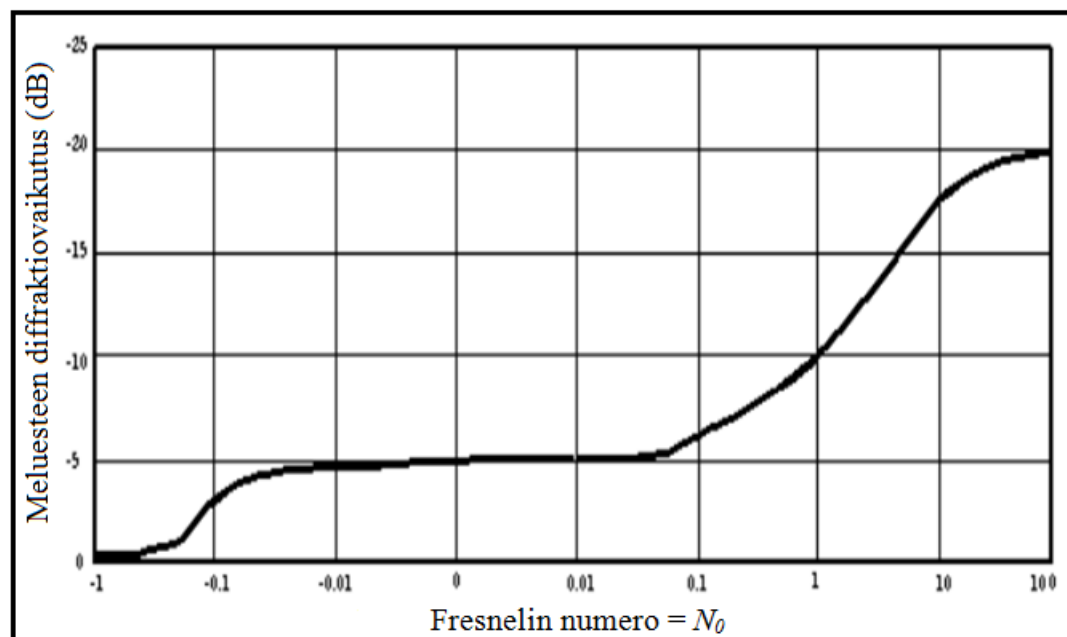
$$\delta = (A + B) - C \quad (16)$$

jossa: A = äänilähteen etäisyys meluesteen ylälaitaan, B = vastaanottimen etäisyys meluesteen ylälaitaan, C = äänilähteen ja vastaanottimen etäisyys (Wang ym. 2005, 473).



KUVA 9. Äänilähteen ja vastaanottimen välissä olevan meluesteen vaikutus äänen kulkeutumiseen matkaan (Wang ym. 2005, 474, muokattu)

Fresnelin numeron ja meluesteen diffraktiovaimennuksen likimääräinen suhde on esitetty kuviossa (2). Fresnelin numeroa käytettäessä on tärkeää muistaa, että se olettaa meluesteiden olevan täysin ääntä lävitse päästämättömiä (Wang ym. 2005 472). Todellisuudessa melu voi kulkeutua myös meluesteen ohi tai esimerkiksi heijastua rakennuksista tai puustosta esteen yli tai ohi (Paige 2016, 14–17). Fresnelin numero ei ota huomioon myöskään meluesteen materiaalista riippuvaa äänen absorptiota (U.S Department of Transportation 2011).



KUVIO 2. Fresnelin numeroarvoa vastaava meluesteen arvioitu vaimentava vaikutus melun diffraktoitumisesta johtuen (U.S Department of Transportation 2011, muokattu)

4 MELUA KOSKEVA LAINSÄÄDÄNTÖ

Keskeisimpiä meluun ja meluntorjuntaan liittyviä lakeja ovat ympäristönsuojelulaki (527/14) ja ympäristönsuojeluasetus (713/14), joissa on esitelty meluntorjuntaan liittyvät periaatteet ja säännökset (Hietanen 2011, 5; Ympäristöministeriö 2013, 8). Ympäristönsuojelulaissa on määritelty esimerkiksi toiminnot, jotka vaativat meluselvityksen ja se kuinka usein meluselvitys tulee uusiksi. Ympäristönsuojelulaissa on myös määritelty, että toimija on ilmoitusvelvollinen kunnan ympäristönsuojeluviranomaiselle, mikäli melua aiheuttava toiminta koetaan erityisen häiritseväksi. Ympäristöluvanalaisesta toiminnasta sovelletaan erillistä lupamenettelyä. valtioneuvoston asetuksessa ympäristönsuojelusta (713/14) taas on määritelty toiminnot, jotka vaativat ympäristöluvan ja se mitä meluun ja muihin mahdollisiin ympäristöpäästöihin liittyviä tietoja lupahakemukseen tulee sisällyttää.

Valtioneuvosto julkaisi vuonna 2007 valtioneuvoston periaatepäätöksen meluntorjunnasta, jonka tavoitteena oli saada huomiota meluntorjunnan päämäärille ja tavoitteille. Päätöksessä on listattu keinoja melupäästöjen ja niistä aiheutuvien haittojen vähentämiseksi sekä annettu meluntorjuntaan liittyviä konkreettisia tavoitteita. Päätöksessä on kirjattu tavoitteeksi esimerkiksi, että vuoteen 2020 mennessä ihmisiä asuu 20 % vähemmän alueilla, joissa ylittyy päiväajan melutason ohjearvon 55 dB äänitaso kuin vertailuvuonna 2003. Tavoitteeksi on myös kirjattu, että vuoteen 2020 mennessä asuinalueilla ei ylitä sisämelun ohjearvot päivä- tai yöaikaan. (Valtioneuvosto 2007, 1.) Periaatepäätöksen julkaisun jälkeen meluun on keskitytty entistä enemmän periaatepäätöksessä mainittujen tavoitteiden saavuttamiseksi (Selvitys valtioneuvoston periaatepäätöksen... 2012, 7). Periaatepäätöksen jälkeen valtioneuvosto on antanut uusia valtioneuvoston asetuksia ja monia meluun ja meluntorjuntaan liittyviä lakeja on päivitetty.

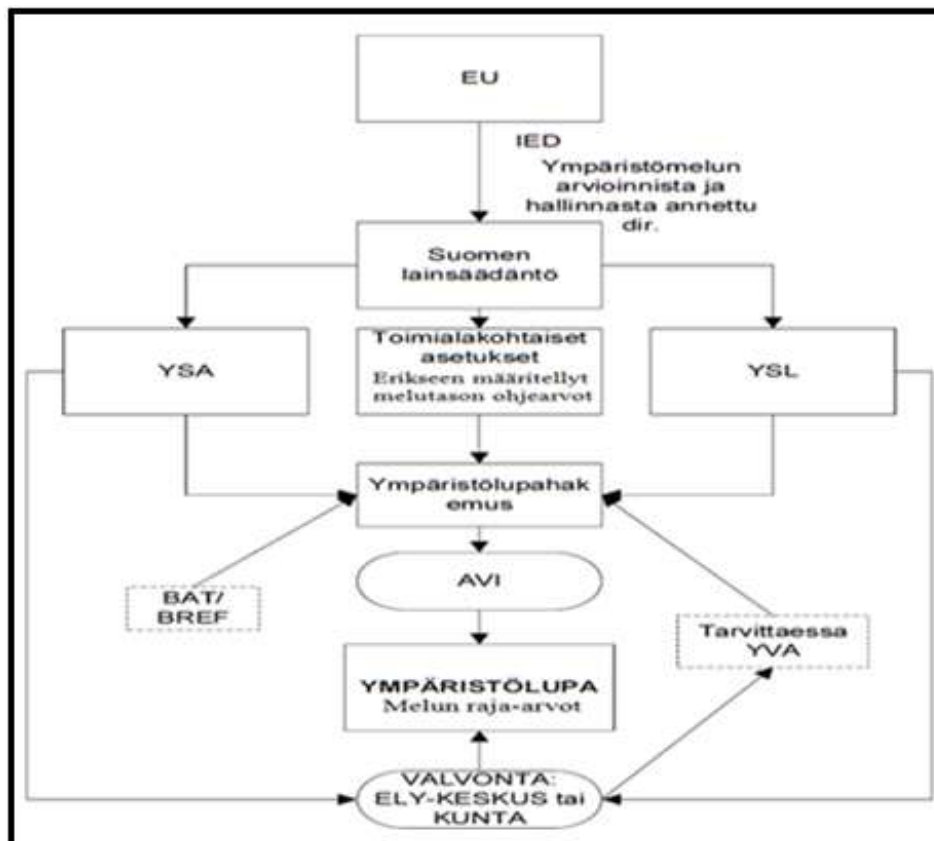
Kuviossa (3) on havainnollistettu meluun liittyvän lainsäädännön keskeisimmät sidokset. Suomen lainsäädäntöön vaikuttavat nykyään monet Euroopan unionin tasolla säädetyt direktiivit, kuten IED eli Industrial Emissions Directive (2010/75/EU), joka keskittyy teollisuuden päästöjen lupamenettelyyn ja tarkkailuun. IED:n julkaisu on vaikuttanut myös melua koskevaan lainsäädäntöön vaikuttamalla Suomen ympäristölakiin (527/14) ja ympäristöasetukseen (713/14). (Hietanen 2011, 5–6; Ympäristöministeriö

2016.) Suomessa meluun liittyvistä asioista on säädetty myös monissa toimialakohtaisissa laeissa ja asetuksissa. Tällaisia toimialakohtaisia lakeja ovat muun muassa:

- Maankäyttö- ja rakennuslaki (132/99)
- Vesiliikennelaki (463/96)
- Ilmailulaki (864/14)
- Tieliikennelaki (267/81)
- Sosiaali- ja terveysministeriön asetus asunnon ja muun oleskelutilan terveydellisistä olosuhteista sekä ulkopuolisten asiantuntijoiden pätevyysvaatimuksista (545/15)

Meluasioista puhuttaessa ehkäpä tärkein toimialakohtainen asetus on valtioneuvoston päätös melutason ohjearvoista, joka toimii yleisenä ohjeena melutason ohjearvoista (VNp 993/92). Tämän päätöksen lisäksi valtioneuvosto on antanut erillisen toimialakohtaisen ohjeen melutason ohjearvoista monille toimijoille. Melutason ohjearvoista kerrotaan lisää myöhemmin.

Kuviossa (3) on havainnollistettu myös ympäristölupapäätökseen ja hyväksytyyn päätöksen toteutumisen valvontaan osallistuvat tahot. Ympäristölupahakemukset käsittelee aluehallintovirasto, joka hakemuksen perusteella myöntää ympäristöluvan tai pyytää lisäselvennyksiä. Melun kannalta ympäristöluvassa määritellään toiminnan raja-arvot, jotka pohjautuvat yleensä toimialakohtaisiin valtioneuvoston asettamiin melutason ohjearvoihin. Ympäristöluvassa määriteltyjen raja-arvojen alittumisen toteamisesta ja valvonnasta vastaa ELY-keskus tai kunta. (Hietanen 2011, 6.)



KUVIO 3. Meluun ja meluntorjuntaan keskittyvän lainsäädännön keskeisimmät sidosryhmät, sekä lait ja asetukset (Hietanen 2011, 6, muokattu)

4.1.1 Melutason ohjearvot

Valtioneuvoston päätös (VNp 993/92) melutasojen ohjearvoista on annettu 29.10.1992 Helsingissä ja sitä sovelletaan hankkeiden suunnitteluvaiheessa sekä lupamenettelyissä. Taulukossa (5) on esitetty eri aluetyyppien melutasojen ohjearvot päivällä ja yöllä ulkona. Taulukossa (6) taas on esitetty melutasojen ohjearvot eri alueilla sisätiloissa. Melutasojen ohjearvot on annettu A-taajuusainotettuina ekvivalenttitasoina. (Valtioneuvosto 1992.)

TAULUKKO 5. Melutasojen ohjearvot ulkona (Valtioneuvosto 1992)

	Päivällä (LAEq7-22)	Yöllä (LAEq22-7)
Asuinalueet, hoito- ja oppilaitosalueet, virkistysalueet taajamissa ja taajamien välitön läheisyys	55	50
Uudet asuinalueet, hoitolaitosalueet ja virkistysalueet taajamissa (ei sovelleta alueilla, joissa toimii myös oppilaitos)	55	45
Loma-asumiseen käytettävät alueet, leirintäalueet ja taajamien ulkopuolella sijaitsevat virkistysalueet	45	40
Luonnonsuojelualueet	45	40

TAULUKKO 6. Melutasojen ohjearvot sisällä (Valtioneuvosto 1992)

	Päivällä (LAEq7-22)	Yöllä (LAEq22-7)
Asuin- potilas ja majoitushuoneet	35	30
Opetus- ja kokoontumistilat	35	-
Liike- ja toimistohuoneet	45	-

Edellä mainittujen ohjearvojen lisäksi valtioneuvosto on antanut erillisen asetuksen määritellyille toimijoille. Erikseen annetuissa asetuksissa on määritelty valtioneuvoston päätöksestä melutason ohjearvoista poikkeavat melutason ohjearvot. Tällaisia erikseen määriteltäviä asetuksia ovat muun muassa:

- Valtioneuvoston asetus tuulivoimaloiden ulkomelutason ohjearvoista (VNp 1107/15)
- Valtioneuvoston päätös ampumaratojen aiheuttaman melutason ohjearvoista (VNp 53/97)
- Valtioneuvoston asetus kivenlouhimojen, muun kivenlouhinnan ja kivenmurskaamojen ympäristönsuojelusta (VNp 800/10)
- Valtioneuvoston asetus polttoaineteholtaan alle 50 megawatin energiantuotantoyksiköiden ympäristönsuojeluvaatimuksista (VNp 750/13)

Valtioneuvoston asetus polttoaineteholtaan alle 50 megawatin energiantuotantoyksiköiden ympäristönsuojeluvaatimuksista (VNp 750/13) ja valtioneuvoston asetus kivenlouhimojen, muun kivenlouhinnan ja kivenmurskaamojen ympäristönsuojelusta (VNp 800/10) soveltavat valtioneuvoston päätöstä melutason ohjearvoista. Edellä mainituissa asetuksissa on kuitenkin määritelty, että ohjearvoja sovelletaan näillä aloilla raja-arvoina, joka tarkoittaa että ne ovat sitovia.

Valtioneuvoston päätös ampumaratojen aiheuttaman melutason ohjearvoista (VNp 53/97) eroaa valtioneuvoston päätöksestä melutason ohjearvoista (VNp 993/92) siten, että ampumaratojen aiheuttaman melun ohjearvot on annettu A-taajuuspainotettuina enimmäistasoina impulssiaikavakiolla.

Valtioneuvoston asetus tuulivoimaloiden ulkomelutason ohjearvoista (VNp 1107/15) taas eroaa valtioneuvoston päätöksestä melutason ohjearvoista (VNp 993/92) siten, että tuulivoimaloiden ulkomelutason ohjearvot on määritelty siinä alkuperäistä asetusta alhaisemmiksi. Tuulivoimaloiden ulkomelutasojen ohjearvoja koskeva valtioneuvoston asetus on valtioneuvoston erillisistä melun ohjearvoihin liittyvistä päätöksistä tuorein ja se on tullut voimaan 1.9.2015.

5 MENETELMÄT

5.1 Melumallinnuksessa käytetyt menetelmät

Melumallinnus tehtiin käyttämällä SoundPLAN 7.4 ohjelmistoa, johon tuotiin Maanmittauslaitokselta, Tammervoima Oy:ltä ja aluehallintoviraston ympäristölupapäätöksestä (dnro: LSSAVI/236/04.08/2011) saatuja lähtötietoja. SoundPLAN 7.4 ohjelmistossa mallinnettiin edellä mainituista lähteistä saatujen lähtötietojen avulla alueen nykytilaa mahdollisimman hyvin vastaava tilanne, jota oli mahdollista hyödyntää alueen melunleviämismallinnuksessa.

Lähtötietojen muokkaamiseen käytettiin AutoCAD Map 3D ohjelmistoa, jossa suoritettiin koordinaatisto- ja tiedostomuunnokset. AutoCAD Map 3D mahdollisti myös laitosten alueen päivittämättömien korkeustietojen muokkaamisen sekä rakennustietojen jakamisen eri tasoihin rakennustyypeittäin.

Excel tiedonhallintaohjelmistoa käytettiin mitatun datan muokkaamiseen ja hallinnoimiseen, joka oli hyödyllistä erittäin suuren datamäärän vuoksi. Exceliä käytettiin hyötyvoimalaitoksen äänilähteiden äänitehotasojen laskemiseen mitatusta datasta. Melupäästön määrityksessä äänitasojen tallennusvälinä käytettiin yhtä sekuntia.

5.1.1 SoundPLAN 7.4

SoundPLAN ohjelmiston ensimmäinen versio ilmestyi vuonna 1986 ja se on yksi ensimmäisistä melun ja ilmansaasteiden leviämisen ennustamiseen ja arviointiin kehitetyistä ohjelmistoista maailmalla. SoundPLAN ohjelmiston ominaisuuksiin kuuluu, että suunnittelija voi itse päättää mitä laskentamallia ohjelmisto käyttää laskelmissaan. Tämä mahdollistaa ohjelmiston käytön maailmanlaajuisesti, sillä yleisimmin käytetyt laskentastandardit vaihtelevat maittain. (SoundPLAN 2016.) SoundPLAN ohjelmisto mahdollistaa halutun tilanteen mallintamisen 3D ympäristössä. Suomessa on vakiintuneen käytännön mukaisesti käytetty pohjoismaisia melun laskentamalleja. Tässä työssä hyötyvoimalaitoksen aiheuttaman melun leviämisen laskemiseen käytettiin pohjois-

maista teollisuusmelun laskentamallia. Hyötyvoimalaitoksen jätetoimituksista aiheutuva melu laskettiin käyttäen pohjoismaista tieliikennemelun laskentamallia.

Olellista tehokkaan suunnittelutyön kannalta on, että suunnittelija tietää käytetyn laskentamallin toimintaperiaatteet. Nämä toimintaperiaatteet vaihtelevat laskentamallista riippuen. (SoundPLAN 2016.) Alla on esitetty osa SoundPLAN ohjelmistossa käytettyjen pohjoismaisten teollisuus- ja tieliikennemelun laskentamallien äänen etenemisen laskemisessa huomioon ottamista seikoista.

5.1.2 Pohjoismainen teollisuusmelun laskentamalli

SoundPLAN 7.4 ohjelmistossa käytettiin hyötyvoimalaitoksen melun leviämisen laskentamallina pohjoismaista teollisuusmelun laskentamallia. Pohjoismainen teollisuusmelun laskentamalli ottaa melutasojen laskemisessa huomioon etäisyysvaimenemisen, ilman absorption, äänen heijastumisen, esteet, kasvillisuuden, maanpinnan vaikutuksen ja sääolot. Laskentamallissa on mahdollista määrittellä äänilähde joko piste- viiva- tai aluelähteeksi. (Kragh, Andersen & Jakobsen 1982, 22–23.)

Etäisyysvaimenemisen laskemiseen laskentamallissa käytetään aiemmin kaavassa (13) esitettyä pistelähteen etäisyysvaimenemista, jossa äänipainetaso laskee 6 dB etäisyyden kaksinkertaistuessa (Kragh ym. 1982, 24).

Ilman absorption aiheuttaman vaikutuksen arvioimiseen laskentamalli olettaa ilman suhteellisen kosteuden olevan 70 % ja ilman lämpötilan olevan 15 °C. Laskentamalli olettaa tuulen olevan aina melun etenemissuuntaan nähden hieman myötäinen. Laskentamalli laskee ilman absorption vaikutuksen oktaavikaistoittain. Jokaiselle oktaavikaistalle on laskentamallissa määritelty vaimentumiskerroin. Ilman absorptiosta johtuvan vaimenemisen suuruuteen vaikuttaa siis äänen taajuus ja sen kulkema matka. (Kragh ym. 1982, 25.) Käytännössä laskentamalli olettaa sääolojen olevan aina melun leviämisen kannalta suotuisat ja esimerkiksi tuulen lasketaan olevan aina myötäinen äänilähteen ja vastaanottimen välillä. Sääolot voivat vaikuttaa melun leviämiseen olennaisesti varsinkin etäisyyden kasvaessa, jolloin laskentamallin tarkkuus pienenee etäisyyden kasvaessa.

Laskentamalli ottaa huomioon äänen heijastumisen rakennuksista ja esteistä. Laskentamallissa on määritelty äänienergian heijastuskertoimet erilaisille esteille ja rakennuksille. Akustisesti suoraksi ja kovaksi määritetyn esteen heijastuskerroin on määritelty olevan 1. Ikkunallisen talon heijastuskerroin on 0,8. Heijastusten vaikutus äänitasoon on aina suurempi tai yhtäsuuri kuin 0 dB. (Kragh ym. 1982, 26–28.)

Esteet kuvataan laskentamallissa tasasivuisina paksuina ruutuina, joiden mittasuhteet vastaavat esteen mittasuhteita. Esteiden aiheuttama äänen vaimeneminen perustuu laskentamallissa Fresnelin numeroon, johon vaikuttavat äänen taajuus ja meluesteen aikaansaama vaikutus äänen kulkemaan matkaan (δ). Fresnelin numeron laskukaava esteen ylittävälle äänelle on havainnollistettu aiemmin yhtälössä (15). Laskentamallissa lasketaan Fresnelin numero oktaavikaistoittain erikseen esteen yli kulkevalle äänelle, esteen vasemmalta puolelta kiertävälle äänelle ja esteen oikealta puolelta kiertävälle äänelle. Näiden avulla laskentamalli määrittää esteen vaimentavan vaikutuksen suuruuden. (Kragh ym. 1982, 31–39.)

Kasvillisuus voidaan ottaa laskentamallissa huomioon, mikäli tiheän kasvillisuuden korkeus on yli metrin äänen kulkureitin yläpuolella. Äänen kulkureitin oletetaan kaartuvan maanpinnan suuntaan, sillä laskentamalli olettaa tuulen olevan aina hieman myötäinen. Kasvillisuus määritellään tiheäksi, mikäli sen läpi ei ole mahdollista nähdä. Laskentamalli ottaa huomioon enintään neljä kasvillisuusvyöhykettä. Kasvillisuusvyöhykkeeksi luokitellaan edellä mainitut ehdot täyttävä vyöhyke tai leveydeltään ja pituudeltaan 50 metrin metsäpalsta. 200 metriä pitkä ja leveä metsäpalsta vastaa neljää kasvillisuusvyöhykettä. Kasvillisuuden vaimentava vaikutus voidaan laskea jokaiselle oktaavikaistalle erikseen kasvillisuusvyöhykkeiden lukumäärän ja oktaavikaistoittain määritetyn vaimentumiskertoimen tulosta. (Kragh ym. 1982, 40–41.) Käytännössä kasvillisuutta tai edes metsiä ei yleensä oteta mallinnuksessa huomioon, koska niiden pysyvyydestä ei ole varmuutta. Kasvillisuusvyöhykkeen tai metsän laadusta ei ole myöskään yleensä saatavilla tietoa. Esimerkiksi tiheä kuusimetsä saattaa vaimentaa melua suhteessa enemmän verrattuna harvakasvuiseen mäntymetsään.

Maanpinta määritetään laskentamallissa joko pehmeäksi tai kovaksi. Maanpinnan vaikutus riippuu maanpinnan laadusta, äänilähteen ja vastaanottimen etäisyydestä sekä niiden korkeudesta. Maanpinnan vaikutukselle on määritelty laskukaava oktaavikaistoittain, joka ottaa huomioon maanpinnan laadun. (Kragh ym. 1982, 42–48.) Käytännössä

laskentamalli laskee maanpinnan pehmeäksi, mikäli sitä ei erikseen määritetä kovaksi eli ääntä heijastavaksi. Ääntä heijastaviksi maanpinnoiksi voidaan luokitella esimerkiksi asfaltoidut alueet, vesistöt ja laajat kallioalueet.

5.1.3 Pohjoismainen tieliikennemelun laskentamalli

Hyötyvoimalaitokselle tehtävistä jätetoimituksista syntyvä melu ja sen leviäminen mallinnettiin SoundPLAN ohjelmistossa käyttäen pohjoismaista tieliikennemelun laskentamallia. Pohjoismainen tieliikennemelun laskentamalli ottaa laskelmissa huomioon:

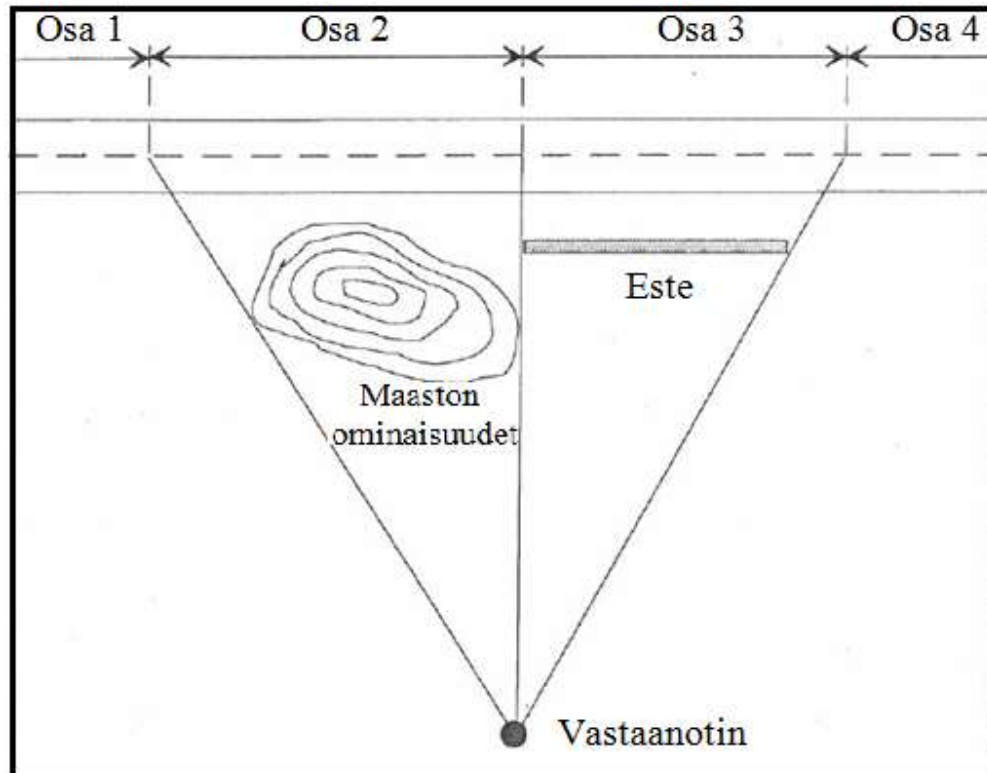
- Teiden nopeusrajoitukset tai liikenteen keskimääräisen ajonopeuden
- Ajoneuvomäärät päivä- ja yöaikaan sekä ajoneuvomäärät tunneittain
- Maanpinnan tyyppin ja tiepäällysmateriaalin tyyppin
- Melun etenemiseen vaikuttavien rakennuksien ja muiden esteiden sijainnin ja korkeuden sekä niiden mittasuhteet
- Raskaiden ajoneuvojen prosentuaalisen osuuden kokonaisliikennemäärästä
- Tien korkeuden suhteessa ympäröivään maastoon
- Äänen vastaanottimen korkeuden suhteessa ajorataan ja ääntä heijastaviin esteisiin

(Nordic Council of Ministers 1996, 4.)

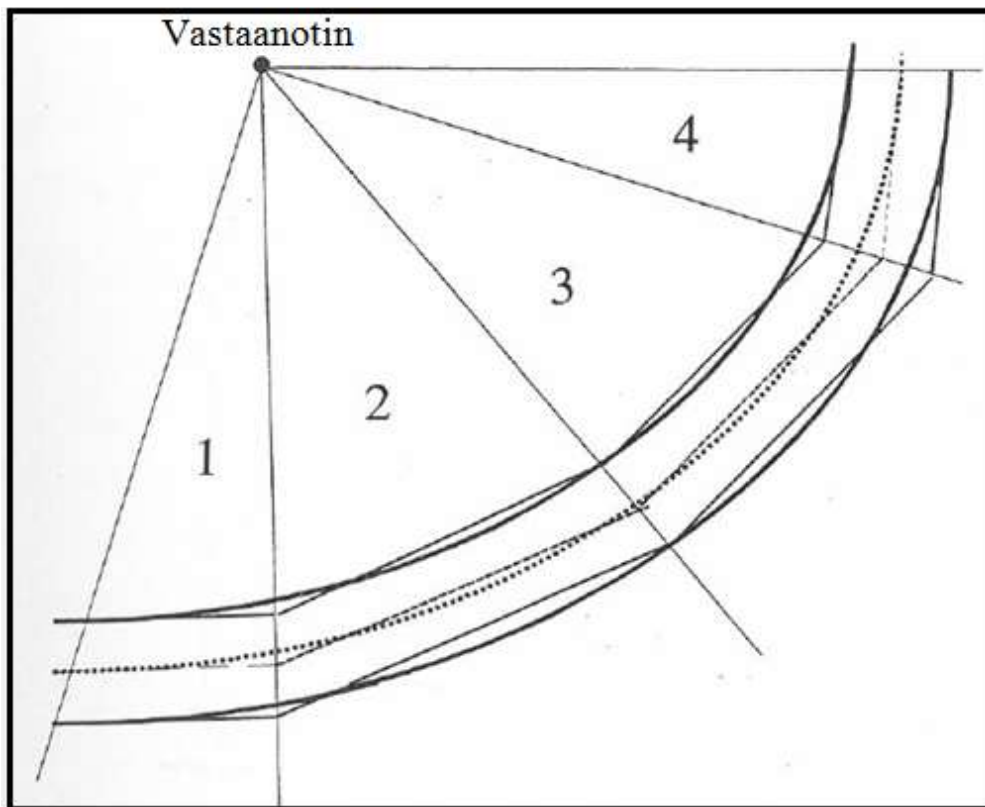
Pohjoismainen tieliikenteen laskentamalli laskee äänitason tietyssä pisteessä jakamalla tien ensin osiin kuvissa (10 & 11) havainnollistetulla tavalla, jolloin jokaiselle tien osalle lasketaan ensin sen tuottama äänitaso kymmenen metrin päässä tien keskiviivasta ottamatta huomioon äänen vaimenemiseen vaikuttavia tekijöitä (Nordic Council of Ministers 1996, 4, 7–8).

Laskentamalli laskee tien eri osista peräisin olevan äänen etäisyysvaimenemisen tien ja äänen vastaanottimen välillä. Etäisyysvaimenemisen laskemiseen laskentamalli soveltaa viivalähteen etäisyysvaimenemista, eli äänitaso vaimenee kolme desibeliä etäisyyden kaksinkertaistuessa. Laskentamalli ottaa etäisyysvaimenemisen laskemisessa huomioon horisontaalisen- ja vertikaalisen etäisyyden tien ja vastaanottimen välillä. (Nordic Council of Ministers 1996, 5, 10.)

Tämän jälkeen laskentamalli laskee maanpinnan ja esteiden vaikutuksen äänen etenemiseen, jossa huomioi myös äänen heijastukset. Laskentamalli ottaa huomioon maatyypin, joka tarkoittaa että se määrittelee maan joko kovaksi eli ääntä heijastavaksi tai pehmeäksi eli ääntä absorboivaksi. Maanmuodot laskentamalli ottaa huomioon äänen etenisen laskemisessa määrittämällä äänen suoran kulkureitin tien ja vastaanottimen välillä sekä laskemalla maanmuodoista riippuvan äänen heijastumissuunnan. (Nordic Council of Ministers 1996, 5, 11–12.)



KUVA 10. Pohjoismaisen tieliikennemelun laskentamallin osiin jakama suora tie (Nordic Council of Ministers 1996, 7)



KUVA 11. Pohjoismaisen tieliikennemelun laskentamallin osiin jakama kaartuva tie (Nordic Council of Ministers 1996, 8)

Laskentamalli ottaa huomioon myös muita äänen etenemiseen vaikuttavia tekijöitä, kuten tienpinnan laadun, kasvillisuuden, tien topografian ja esteiden paksuuden (Nordic Council of Ministers 1996, 23–24, 27). Tienpinnan laatu otetaan huomioon siten, että laskentamalli mieltää teiden pinnat akustiseksi koviksi eli ääntä heijastaviksi pinnoiksi. Kasvillisuutta ei käytännössä yleensä oteta huomioon, sillä sen laadusta ei ole yleensä saatavilla tietoa, eikä niiden pysyvyydestä voida myöskään varmistua. Tien topografia voi vaikuttaa melutasoihin oleellisesti, sillä ylämäkeen ajavien ajoneuvojen moottoriäänet ovat voimakkaampia kuin tasaisella tiellä ajavien. (Nordic Council of Ministers 1996, 27.) Tämä otetaan mallinnuksessa huomioon. Tien topografia perustuu mallinnohjelmissa luotavaan maastomalliin, jonka päälle tiestö sijoittuu.

Lopuksi kun laskentamalli on laskenut äänen etenemiseen vaikuttavien tekijöiden yhteisvaikutuksen tien eri osille, laskee se tien osien äänitehollisesta summasta muodostuvan kokonaisäänitason laskentapisteesä (Nordic Council of Ministers 1996, 40).

5.2 Ympäristömelumittauksissa käytetyt menetelmät

Ympäristömelumittauksien toteutuksessa sovellettiin ympäristöministeriön ohjetta ympäristömelun mittaamisesta, joka on tarkoitettu sovellettavaksi, mikäli mittaustuloksia on tarkoitus verrata valtioneuvoston päätökseen melutason ohjearvoista (Ympäristöministeriö 1995, 3). Tammervoima Oy:n hyötyvoimalaitoksen ympäristöluvassa määritellyt raja-arvot pohjautuvat valtioneuvoston päätökseen melutason ohjearvoista.

5.2.1 Ympäristöministeriön ohje ympäristömelun mittaamisesta

Ympäristöministeriön ohjeen mukaisesti tulee ympäristömelumittauksissa käyttää mielellään tarkkuusluokan yksi täyttävää äänitasomittaria, mutta vähintään tarkkuusluokan kaksi täyttävää äänitasomittaria. Äänitasomittarilla tulee voida mitata melun keskiääni-taso aikapainotuksella F, S tai I. Äänitasomittarin ja muiden mittauksessa käytettävien laitteiden toimivuus tulee tarkistaa ja ne suositellaan kalibroitaviksi ennen jokaista mitausta ja niiden jälkeen. Ulkona tehtävissä mittauksissa tulee käyttää äänitasomittarin laitevalmistajan suosittelemaa tuulisuojaa. Mittauskorkeudeksi suositellaan 1,5 metriä. (Ympäristöministeriö 1995, 10, 14.)

Ympäristöministeriön ohjeessa on määritelty, että ympäristömelumittaukset tulisi toteuttaa ajankohtana, jolloin sääolosuhteilla on mahdollisimman vähäinen vaikutus mitaustulokseen. Sääolojen vaikutus korostuu etäisyyden kasvaessa, josta johtuen mitausetäisyyden tulisi olla lyhyt. Mittausetäisyys tulisi olla mielellään alle 30 metriä äänilähteestä. Tuulen tulisi olla heikko eli korkeintaan 3,5 m/s mittattuna kahden metrin korkeudelta ja sen suunnan tulisi olla ± 45 asteen sektorilla äänilähteestä mitauspisteeseen päin. Ilman lämpötilan tulee olla äänitasomittarin toiminta-alueella. Mittausajankohtaa määriteltäessä on otettava huomioon ennustetut sääolot ja arvioida niiden soveltuvuutta ympäristömelumittauksen suorittamiseen. Mittausaikana vallitsevat sääolot suositellaan varmentamaan käyttämällä kentäsääasemaa. Sateella ei mittauksia tule suorittaa. (Ympäristöministeriö 1995, 17–18.)

Mitattaessa tietyn äänilähteen aiheuttamaa äänitasoa mitauspisteessä täytyy ottaa huomioon mittauksen aikainen taustamelu. Ohjeena on, että taustamelun aiheuttaman äänitason tulee olla 10 dB pienempi kuin mitattavan melulähteen aiheuttama äänitaso. Taus-

tamelun aiheuttama vaikutus mittaukseen on helpompi tunnistaa tarkkailemalla mittaria koko mittausjakson ajan, kuitenkin siten, ettei mittaja aiheuta melun heijastumista äänitasomittarin suuntaan. Ohjeena on, että mittaja tarkkailee äänitasomittaria mittauksen ajan. (Ympäristöministeriö 1995, 12, 18.)

Ympäristömelumittaukset tulisi pyrkiä suorittamaan mittauspisteissä, joissa äänen heijastukset eivät pääse vaikuttamaan mittaukseen. Mikäli ympäristömelumittauksia kuitenkin tehdään heijastavien esteiden läheisyydessä, kuten rakennusten lähellä, valitaan mittauspisteeksi kahden metrin etäisyys rakennuksen julkisivusta. Myös etäisyys muista ääntä mahdollisesti heijastavista pinnoista tulee olla kaksi metriä. (Ympäristöministeriö 1995, 14.)

5.3 Äänitehotasojen määrittämisessä käytetyt menetelmät

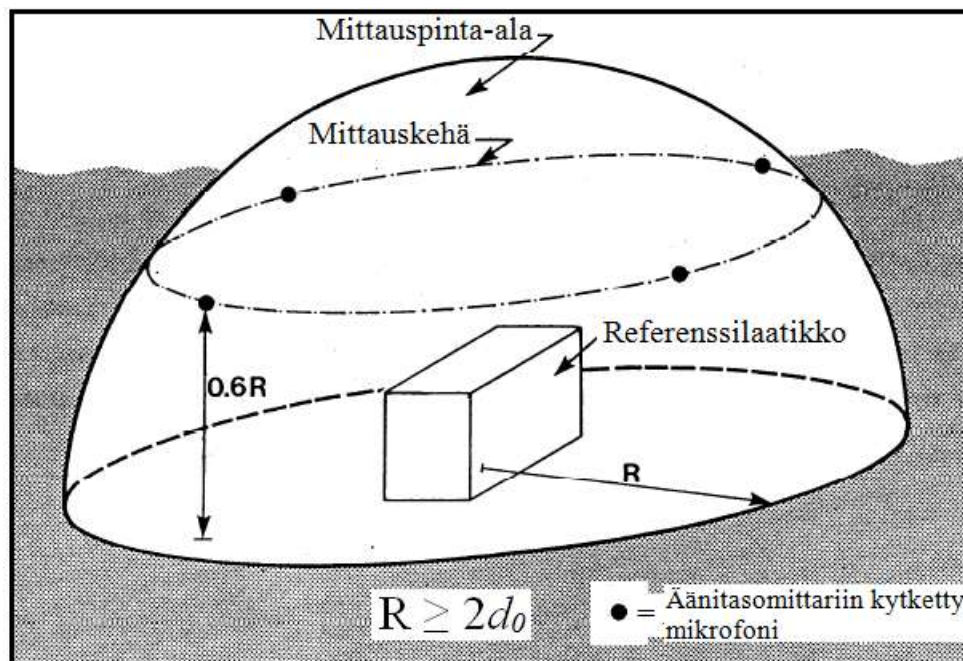
Hyötyvoimalaitoksen äänilähteiden äänitehotasot määritettiin Nordtestin NT ACOU 080-standardin mukaisesti. Standardissa on esitelty teollisuuden äänilähteiden äänitehotasojen määrittäminen käyttäen ”sphere-” ja ”box-menetelmää”. Standardissa suositellaan käyttämään sphere-menetelmää, mikäli mahdollista. Tämä perustuu siihen, että sphere-menetelmällä saadaan äänitehotason määrittämisen yhteydessä myös tieto äänen suuntaavuudesta. Box-menetelmää käytetään, mikäli sphere-menetelmän käyttö ei ole mahdollista. Tällainen tilanne voi johtua esimerkiksi esteistä tai tilan puutteesta. Äänen suuntaavuudella tarkoitetaan äänilähteen säteilemän äänitehon jakaantumista eri suuntiin erisuuruisella voimakkuudella. (NT ACOU 1991, 2.)

Sphere-menetelmässä äänilähteestä muodostetaan ensin tasasivuinen kuvitteellinen laatikko, jonka sisään jäävät kaikki äänilähteen ääntä tuottavat osat. Tätä laatikkoa kutsutaan referenssilatiksi. Referenssilatikon mittasuhteet tietämällä voidaan laskea sen ”ominaismittasuhte” (d_0), jonka yksikkönä käytetään pituuden yksikköä metriä. Äänilähteen referenssilatikon ominaismittasuhte on tärkeä, sillä se määrittää mittausetäisyyden äänilähteestä. Ominaismittasuhteen laskukaava riippuu äänilähteen sijainnista, mutta esimerkiksi maassa ja kahden seinän risteämäkohdassa olevan äänilähteen referenssilatikon ominaismittasuhte voidaan laskea kaavan (17) mukaisella tavalla. (NT ACOU 1991, 4–5.)

$$d_0 = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2} \text{ m} \quad (17)$$

jossa: I_1 = referenssilaatikon pituus, I_2 = referenssilaatikon leveys ja I_3 = referenssilaatikon korkeus (NT ACOU 1991, 5).

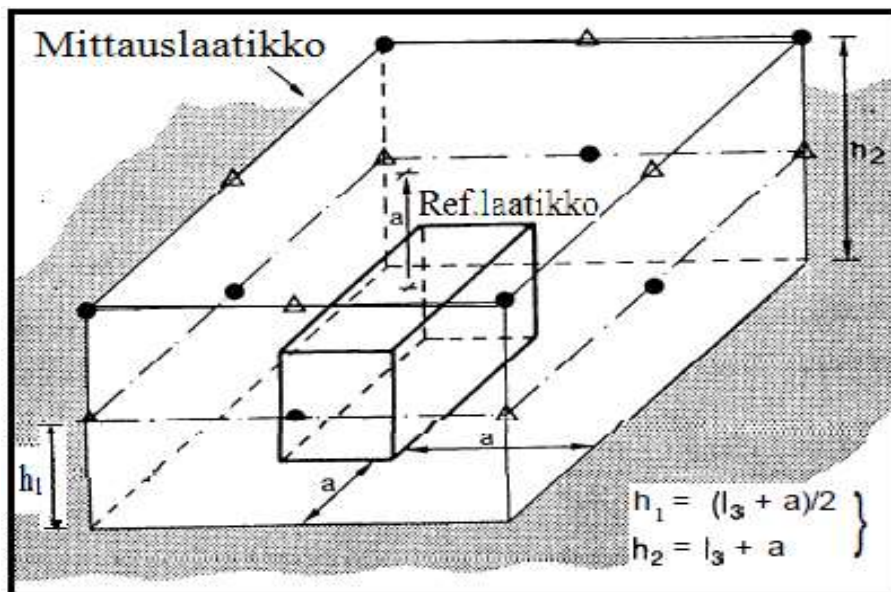
Alla olevassa kuvassa (12) on havainnollistettu Nordtestin standardin mukainen äänitehotason määrittäminen käyttäen sphere-menetelmää. Äänipainetasomittarit sijoitetaan mittauskehälle, jonka sijainti on etäisyydellä R referenssilaatikon alapinnan keskustasta mitattuna. Etäisyys R tulee olla mahdollisimman suuri, mutta kuitenkin sellainen, ettei mitattava äänilähde sekoitu muihin äänilähteisiin. Etäisyys R tulee myös olla vähintään kaksinkertainen referenssilaatikon ominaismittasuhteeseen nähden. Ensimmäinen äänipainetasomittari sijoitetaan äänipainetasoltaan korkeimpaan kohtaan mittauskehälle, jonka jälkeen loput mittarit sijoitetaan tasaisesti mittauskehälle. Mittauspisteiden määrä sekä niiden sijainti riippuu äänilähteen sijainnista. Kuvassa (12) on havainnollistettu lattialla tai maassa olevan äänilähteen mittauspisteet. (kuva 12.) (NT ACOU 1991, 10.)



KUVA 12. Äänitehotason määrittäminen sphere-menetelmällä (NT ACOU 080 1991, 10, muokattu)

Äänitehotason määrittäminen voidaan tehdä myös box-menetelmällä vaativissa mittausolosuhteissa. Esimerkiksi tilan vähyys, erilaiset esteet tai äänilähteen hankala sijainti voivat olla perusteita box-menetelmän käytölle. Box-menetelmää käytettäessä ei saada äänitehotason määrittämisen yhteydessä tietoa äänen suuntaavuudesta. (NT ACOU 1991, 2.)

Äänitehotason määrittämisen ensimmäinen vaihe käytettäessä box-menetelmää on muodostaa äänilähteelle referenssilaatikko samaan tapaan kuin sphere-menetelmässä. Tämän jälkeen määritetään box-menetelmän tärkein suure a , joka tarkoittaa etäisyyttä referenssilaatikon pinnasta mittauslaatikon pintaan kuvassa (13) osoitetulla tavalla. Etäisyys a tulee olla mahdollisimman suuri, mutta vähintään yli 0,15 metriä ja mielellään yli metrin. Etäisyyden a määrittämisen jälkeen voidaan sen avulla määrittää äänipainetasomittareiden korkeus h_1 ja h_2 kuvassa (13) havainnollistetulla tavalla. Tämän jälkeen tiedetään mittapisteiden sijainti kuvitteellisen mittauslaatikon pinnalla. Lisämittauspisteitä saatetaan tarvita tilanteissa, joissa referenssilaatikko ja mittauslaatikko ovat lähellä toisiaan. Lisämittauspisteet on merkitty kuvassa (13) kolmioilla. Kuvassa (13) on esitetty lattialla tai maassa olevan äänilähteen mittauspisteet. (NT ACOU 1991, 12–13.) (kuva 13.)



KUVA 13. Äänitehotason määrittäminen box-menetelmällä (NT ACOU 080 1991, 14, muokattu)

Standardissa määritellyllä tavalla sijoitettujen mittauspisteiden äänipainetasojen ekvivalenttitaso voidaan laskea aiemmin esitellyn yhtälön (9) osoittamalla tavalla. Tätä tietoa tarvitaan laskettaessa äänilähteen äänitehotaso kaavassa (18) havainnollistetulla tavalla. Kaavaan (18) tarvitaan myös tieto mittauslaatikon pinta-alasta käytettäessä box-menetelmää ja mittauspinta-alasta käytettäessä sphere-menetelmää. Yhtälössä (18) käytetyksi referenssipinta-alaksi on määritelty 1 m^2 . Äänitehotaso lasketaan erikseen terssikaistoittain, jolloin käytetään kunkin terssikaistan vastaavia äänipainetasoarvoja. Etäi-

syydestä a riippuva korjaus E on väliltä 1 – 3 dB ja sitä sovelletaan vain box menetelmällä tehtyihin mittauksiin. Korjauksen suuruus määräytyy mittauslaatikon ja referenssilatikon pinta-alojen suhteesta ja se on sitä suurempi, mitä pienempi etäisyys a on. (NT ACOU 1991, 12,15.)

$$L_w = L_{eq} - E + 10 \log \left(\frac{S}{S_0} \right) \text{ dB} \quad (18)$$

jossa: L_{eq} = Mitattujen äänipainetasojen ekvivalenttitaso, E = etäisyydestä a riippuva korjaus (0 – 3 dB), S = Mittauspinta-ala, S_0 = referenssipinta-ala (1 m²) (NT ACOU 1991, 15).

6 TAMMEROVOIMAN HYÖTYVOIMALAITOKSEN MELUSELVITYS

6.1 Kohteen perustiedot

Tammervoima Oy:n hyötyvoimalaitos on valmistunut joulukuussa 2015 Tampereelle Nurmen kylään Tarastenjärven jätteenkäsittelykeskuksen välittömään läheisyyteen (kuva 14). Hyötyvoimalaitos on otettu käyttöön vuoden 2016 alussa ja se on suunniteltu ympärivuotiseen jatkuvaan toimintaan. (kuva 15.) (Tammervoima Oy 2016.)



KUVA 14. Tammervoiman hyötyvoimalaitoksen sijainti kartalla (Maanmittauslaitos 2016, muokattu)

Hyötyvoimalaitoksessa poltetaan pääosin aiemmin jätteenkäsittelykeskukselle loppusijoitukseen päätyntä yhdyskuntajätettä. Hyötyvoimalaitoksella on mahdollista polttaa myös elinkeinosektorilta peräisin olevaa jätettä, sivutuoteasetuksen mukaista eläinperäistä jätettä, terveydenhuollon tartuntavaarallista jätettä sekä vaarallista jätettä. Tammervoima Oy:n ympäristöluvassa on määritelty, että hyötyvoimalaitoksella saa polttaa korkeintaan 180 000 tonnia jätettä vuodessa, josta korkeintaan 13 000 tonnia saa olla vaarallista jätettä, 1000 tonnia terveydenhuollon tartuntavaarallista jätettä ja 10 000 tonnia sivutuoteasetuksen mukaista eläinperäistä jätettä. (Aluehallintovirasto 2013,

30;Tammervoima Oy 2016.) Poltettavaksi jätteeksi kelpaa jätehierarkian mukaisesti vain kierrätykseen kelpaamaton jäte (Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 98/2008; Tammervoima Oy 2016). Hyötyvoimalaitos käyttää tukipolttoaineena kevyttä polttoöljyä. Tukipolttoainetta käytetään laitoksen käynnistyessä sekä tilanteissa, joissa polttokattilan lämpötila uhkaa pudota alle 850 °C asteen. Tukipolttoaineen käytöllä varmistetaan jätteen täydellinen palaminen. (Aluehallintovirasto 2013, 15.)

Jätteen poltosta saatu energia hyödynnetään sähkön- ja lämmöntuotannossa. Hyötyvoimalaitos tuottaa sähköä vuosittain noin 90 GWh ja kaukolämpöä noin 310 GWh, joka vastaa 30 000 asunnon vuosittaista lämmön ja sähkön tarvetta. (Tammervoima Oy 2016.)

Yhdyskuntajätteen toimituksesta hyötyvoimalaitokselle vastaavat Pirkanmaan Jätehuolto Oy ja Jyväskylän jätehuoltoyhtiö Mustankorkea Oy. Hyötyvoimalaitoksella tuotetun energian siirrosta ja myymisestä taas vastaa Tampereen Sähkölaitos Oy. Tammervoima Oy on Pirkanmaan Jätehuollon ja Tampereen Sähkölaitoksen yhteinen hanke. (Tammervoima Oy 2016.)



KUVA 15. Tammervoima Oy:n Tarastenjärven hyötyvoimalaitos

6.2 Työn taustat ja tavoitteet

Opinnäytetyö tehdään Tammervoima Oy:n uudelle hyötyvoimalaitokselle ja sen tavoitteena on tuottaa hyötyvoimalaitokselle osa sen ympäristöluvan (dnro: LSSA-VI/236/04.08/2011) vaatimasta meluselvityksestä.

Tammervoima Oy:n Tarastenjärven hyötyvoimalaitoksen kaltainen jätettä polttava voimalaitos luokitellaan luvanvaraiseksi Helsingissä 4.9.2014 päivitetyn valtioneuvoston asetuksen ympäristönsuojelusta perusteella (Valtioneuvoston asetus ympäristönsuojelusta 2014/713). Tammervoima Oy:n hyötyvoimalaitoksen kaltaisen jätettä polttoaineenaan hyödyntävän voimalaitoksen lupaviranomaiseksi on määritelty aluehallintovirasto, joka toimii valtion ympäristölupaviranomaisena (Ympäristönsuojelulaki 2014/527; Valtioneuvoston asetus ympäristönsuojelusta 2014/713).

Aluehallintovirasto on antanut päätöksen Tammervoima Oy:n ympäristölupahakemukseen 28.2.2013. Tammervoima Oy:n hyötyvoimalaitoksen ympäristölupapäätöksessä on määritelty, että meluselvitys tulee tehdä laitoksen toiminnan vakiinnuttua ja korkeintaan yhden vuoden kuluttua toiminnan alkamisesta, jotta ympäristöluvassa annettujen melutason raja-arvojen alittumisesta voidaan varmistua. Ympäristöluvassa on määritelty laitoksen tuottaman melutason raja-arvot laitosta lähimpänä sijaitseville asuinalueille ja ne perustuvat valtioneuvoston päätökseen melutason ohjearvoista (993/1992) asuinalueilla, taajamien virkistysalueilla ja hoito-, sekä oppilaitosalueilla ulkona (taulukko 5). Ympäristöluvassa määrätyt melun raja-arvot on annettu A-taajuuspainotettuina ekvivalenttitasoina ja ovat 55 dBA päivälle (7 – 22) ja 50 dBA yölle (22 – 7).

Tammervoima Oy:n ympäristöluvassa on määritelty, että hyötyvoimalaitoksen meluselvitys tulee tehdä yhdessä alueen muiden toimijoiden kanssa. Tässä opinnäytetyössä keskitytään kuitenkin ainoastaan hyötyvoimalaitoksen toiminnan aiheuttamaan meluun. Tätä opinnäytetyötä hyödynnetään Ramboll Finland Oy:n Tammervoima Oy:lle tuottamassa ympäristöluvan vaatimassa meluselvityksessä, jossa otetaan huomioon myös alueen muut toimijat. Ramboll Finland Oy:n tuottama edellä mainittu meluselvitys on määrä valmistua vuoden 2016 loppuun mennessä.

Tammervoima Oyn ympäristöluvassa on määritelty, että meluselvitys tulee toteuttaa vuoden sisällä hyötyvoimalaitoksen toiminnan vakiintumisesta mallintamalla ja ympäristömelumittauksin (Aluehallintovirasto 2013, 93).

6.3 Melumallinnus

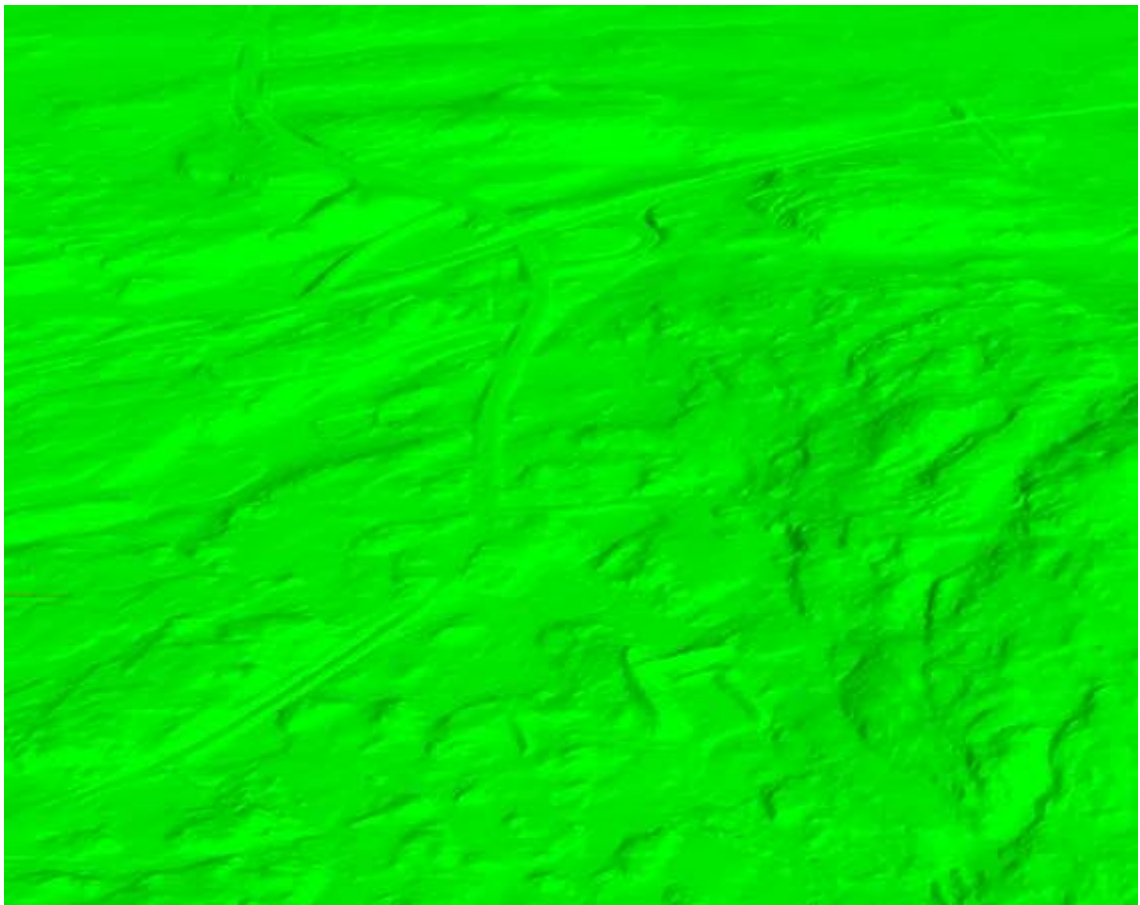
Melumallinnus tehtiin käyttäen SoundPLAN 7.4 ohjelmistoa. Laskentamallina ohjelmistossa käytettiin pohjoismaista teollisuusmelun laskentamallia, sekä pohjoismaista liikennemelun laskentamallia. Edellä mainittujen laskentamallien huomioon ottamat parametrit on esitelty aiemmin. Metsiä tai kasvillisuusvyöhykkeitä ei otettu melumallinnuksessa huomioon, sillä niiden pysyvyydestä ei voida olla varmoja. Lähtötietojen muokkaamiseen käytettiin AutoCad Map 3D ja Excel ohjelmistoja.

6.3.1 Maastomallin luominen

Korkeustiedot saatiin maanmittauslaitoksen vapaasti käytössä olevasta datasta. Maastomallissa käytettiin kahden metrin korkeusmallia, joka oli mahdollista ladata Maanmittauslaitoksen sivuilta ja avata sen jälkeen SoundPLAN ohjelmistossa. Käytetty kahden metrin korkeusmalli oli laatuluokkaa yksi eli sen tarkuus oli $\pm 0,3$ m. Maanmittauslaitokselta saatu korkeusmalli oli tuotettu laserkeilaustekniikkaa käyttäen ja sen pistetiheys oli vähintään 0,5 pistettä yhtä neliometriä kohden. Maanmittauslaitokselta saatu korkeusmalli oli ETRS-TM35-FIN koordinaattijärjestelmässä ja N2000 korkeusjärjestelmässä, joten muut lähtötiedot tuli muuntaa samaan koordinaatistoon ja korkeusjärjestelmään. SoundPLAN ohjelmistossa Maanmittauslaitoksen korkeuspisteistöstä rajattiin noin 70 km² pinta-alaltaan oleva alue siten, että Tammervoima Oyn hyötyvoimalaitoksen sijainti oli likimain alueen keskellä.

Maanmittauslaitoksella ei ollut hyötyvoimalaitoksen valmistumisen jälkeisiä päivitettyjä korkeustietoja hyötyvoimalaitosalueesta tai sen välittömästä läheisyydestä, joten ne piti päivittää manuaalisesti. Tämä tehtiin Tammervoima Oy:ltä saadun hyötyvoimalaitoksen asemapiirustuksen perusteella AutoCad Map 3D ohjelmistossa. Kun korkeustiedot oli syötetty manuaalisesti AutoCad Map 3D ohjelmalla, oli ne mahdollista tuoda SoundPLAN ohjelmistoon. Tällöin SoundPLAN ohjelmistoon aiemmin ladatusta

Maanmittauslaitoksen korkeuspisteistä leikattiin pois päivittämätön laitosalue ja sen lähistö, jotka korvattiin manuaalisesti päivitettyillä korkeustiedoilla. Tämän jälkeen SoundPLAN ohjelmistoon ladatut korkeuspisteet vastasivat likimain alueen nykytilan mukaisia korkeustietoja, jolloin oli mahdollista suorittaa maastomallin laskenta kolmioimalla. Kolmioinnissa SoundPLAN laskee ja arvioi toisiaan lähimpänä olevien korkeuspisteiden korkeuksia ja luo niiden perusteella yhtenäisen maastomallitason. Osa SoundPLAN ohjelmiston laskemasta kolmioidusta maastomallista on havainnollistettu kuvassa (16).



KUVA 16. Osa SoundPLAN 7.4 ohjelmiston Maanmittauslaitoksen korkeuspisteistä laskemasta kolmioidusta maastomallista

Hyötyvoimalaitoksen ja Pirkanmaan jätehuollon jätteenkäsittelykeskuksen asfaltoidut piha-alueet mallinnettiin Maanmittauslaitoksen maastokartan perusteella, sekä Tamervoima Oy:ltä saadun laitospäärustuksen pohjalta. Laitoksen lähistön asfaltoidut piha-alueet määriteltiin ääntä heijastaviksi käyttäen SoundPLAN ohjelmiston Ground Absorption-toimintoa. Asfaltoitujen piha-alueiden Ground Absorption arvoksi määriteltiin 0, joka tarkoittaa että kaikki asfalttiin kohdistuva ääni heijastuu kokonaisuudessaan ja

jatkaa etenemistään ympäristössä. Pohjoismainen teollisuusmelun laskentamalli olettaa maanpinnan olevan aina ääntä absorboiva eli pehmeä, jonka vuoksi SoundPLAN ohjelmistossa täytyy määritellä manuaalisesti kaikki ääntä heijastavat pinnat.

6.3.2 Hyötyvoimalaitoksen mallintaminen

Maastomallin laskemisen jälkeen voitiin hyötyvoimalaitos mallintaa SoundPLAN 7.4 ohjelmistoon Tammervoima Oy:ltä saadun asemapiirustuksen pohjalta. Hyötyvoimalaitoksen asemapiirustus oli ETRS-GK24 koordinaattijärjestelmässä ja N2000 korkeusjärjestelmässä, joten koordinaattijärjestelmä tuli muuntaa ETRS-TM35-FIN koordinaatistoon AutoCad Map 3D ohjelmistossa. Tämän jälkeen oli mahdollista piirtää hyötyvoimalaitoksen eri osien ääriviivat AutoCad Map 3D ohjelmassa, jonka jälkeen ne siirrettiin SoundPLAN 7.4 ohjelmistoon. Tärkeää oli piirtää laitoksen eri osat omina alueina, jotta niiden korkeudet oli mahdollista määritellä myöhemmin SoundPLAN ohjelmistossa. Kun laitoksen eri osien ääriviivat oli tuotu SoundPLAN ohjelmistoon oikeassa koordinaattijärjestelmässä ja maastomalli oli saatu laskettua, määriteltiin laitosrakennusten pohjakorkeus sijaitsemaan maastomallin pinnalla. Tämän jälkeen laitoksen eri osien korkeus maastomallin yläpuolella määriteltiin Tammervoima Oy:ltä saadun hyötyvoimalaitoksen pääpiirustuksen mukaan. Pääpiirustuksesta oli nähtävissä laitoksen eri osien korkeudet maanpinnasta mitattuna.

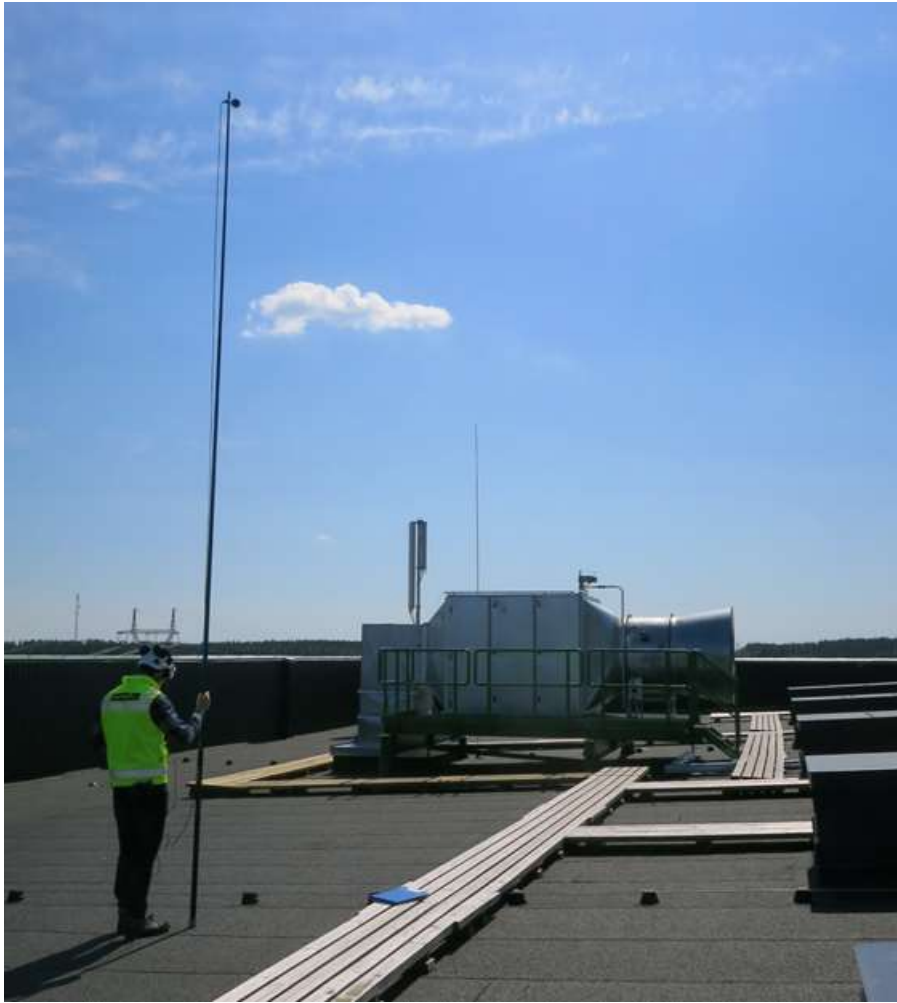
6.3.3 Hyötyvoimalaitoksen äänilähteiden äänitehotasojen määrittäminen

Melumallinnukseen tarvittavat äänilähteiden äänitehotasot määritettiin tekemällä melupäästömittauksia hyötyvoimalaitosalueella sijaitseville äänilähteille. Hyötyvoimalaitoksen äänilähteiden äänitehotasojen määrittämisessä käytettiin tarkkuusluokan yksi Norsonicin Nor118 äänipainetasomittaria. Nor118 äänipainetasomittarilla on mahdollista mitata äänipainetasoja terssikaistoittain 6,3 Hz ja 20 kHz välisillä taajuuksilla. (Norsonic 2002, 3.) Äänitehotasojen määrittämiseen tarvittavat äänepainetasot mitattiin A-taajuuspainotettuina ekvivalenttitasoina terssikaistoittain taajuusvälillä 20 Hz – 20 kHz. Aikapainotuksena mittauksissa käytettiin fast aikapainotusta. Äänitasomittari kalibroitiin ennen ja jälkeen mittausten ja niissä otettiin huomioon myös mittarin ja mikrofonin väliin kytketty jatkojohto. Kalibraattorina käytettiin äänitasomittarin laitevalmistajan

suosittellemaa tarkkuusluokan yksi Norsonic Nor1251 kalibraattoria. Mittauksissa käytettiin mikrofonin tuulisuojaa.

Tammervoima Oyn hyötyvoimalaitoksen äänilähteiden äänitehotasojen määrittämisessä käytettiin Nordtestin NT ACOU 080-standardissa määriteltyjä sphere-, sekä box-menetelmiä. Äänilähteen numero yksi äänitehotason määrittämiseen käytettiin box-menetelmää vaikeista mittausolosuhteista johtuen (taulukko 7). Kyseinen äänilähde sijaitsi katolla, jossa etäisyys katon reunalle oli pieni. Äänilähde oli myös sijoitettu jalus-talle 3,8 m korkeuteen sen alapuolella olevalta katolta mitattuna. Kaikkien muiden hyötyvoimalaitoksen äänilähteiden äänitehotasot mitattiin käyttäen sphere-menetelmää (taulukko 7).

Äänilähteen numero kaksi eli jätebunkkerin poistoilmapuhaltimen äänitehotason määrittämiseen käytettiin sphere-menetelmää, sillä sen läheisyydessä oli riittävästi tilaa kyseisen menetelmän käyttämiseen. Alla olevassa kuvassa (17) suoritetaan edellä mainitun poistoilmapuhaltimen äänitehotasomittausta. Jätebunkkerin poistoilmapuhaltimen osoittautui tehtyjen mittausten perusteella ääntä suuntaavaksi, mikä otettiin huomioon mallinnusta tehdessä. Taulukossa (7) on esitetty äänilähteen numero kaksi korkein laskettu äänitehotaso eli suunnan 0° äänitehotaso. Mallinnuksessa äänilähteen numero kaksi äänitehotasot määriteltiin suunnittain ottaen huomioon myös muista suunnista lasketut äänitehotasot.



KUVA 17. Jätebunkkerin poistoilmapuhaltimen äänitehotason määrittäminen sphere-menetelmällä

Taulukossa (7) on listattu hyötyvoimalaitoksen äänilähteet, joille tehtiin melupäästön määrittäminen NT ACOU 080 standardin mukaisesti. Äänitehotasot on esitetty taulukossa (7) A-taajuuspainotettuina äänitasoina oktaavikaistoittain ja yhteenlaskettuna äänitasona. Äänilähteet tunnistettiin aistinvaraisesti sekä laitosjohtaja Mika Pasulan tarjoaman esittelykierroksen perusteella. Esittelykierroksella kierrettiin laitoksen äänilähteet, joilla on mahdollisuus kuulua laitoksen lähiympäristössä. Taulukosta (7) voidaan nähdä, että laitoksen merkittävimmät äänilähteet ovat äänilähde numero yksi ja kaksi, joiden äänitehotasoiksi määritettiin 106 dBA ja 117 dBA. Kyseiset äänilähteet sijaitsevat laitoksen katolla, mikä lisää niiden merkityksellisyyttä meluselvityksessä.

Äänilähteet numero kuusi ja kymmenen todettiin äänitehotasojen määrittämisen perusteella ääntä kapeakaistaisesti säteileviksi. Kapeakaistaisuuden toteaminen tapahtui aistinvaraisesti ja taajuusanalyysiin perustuen. Kapeakaistaisuutta ei kuitenkaan huomioitu melumallinnuksessa, sillä laitosta lähimmässä häiriintyvässä kohteessa ei ympäristömelu-

mittauksien mukaan esiintynyt enää kapeakaistaista melua. Tämä johtuu siitä, että melun kapeakaistaisuus heikkenee etäisyyden kasvaessa.

TAULUKKO 7. Tammervoiman hyötyvoimalaitoksen äänilähteiden äänitehotasot oktaavikaistoittain ja niiden määrittämiseen käytetty mittausmenetelmä

Äänilähde	Äänitehotaso oktaavikaistoittain, $L_{W(A)}$									Oktaavikaistojen yhteenlaskettu äänitaso, $L_{W(A)}$	Mittausmenetelmä
	31.5 Hz	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz		
L1	72	87	93	97	99	101	99	93	85	106	NT ACOU 080-box
L2	58	85	102	110	113	112	108	103	93	117	NT ACOU 080-sphere
L3	61	72	79	86	87	87	85	77	69	93	NT ACOU 080-sphere
L4	45	63	75	87	85	82	73	60	40	90	NT ACOU 080-sphere
L6	52	65	71	72	71	68	77	65	58	80	NT ACOU 080-sphere
L8	58	68	74	78	77	74	71	61	49	83	NT ACOU 080-sphere
L9	48	58	65	66	63	52	43	32	31	70	NT ACOU 080-sphere
L10	48	68	71	76	87	78	71	58	41	88	NT ACOU 080-sphere

Kaikkien Tammervoima Oy:n hyötyvoimalaitoksen meluselvityksen kannalta merkittävien äänilähteiden sijainti on havainnollistettu alla olevassa kuviossa (4). Kuviossa (4) näkyvät katolla sijaitsevat äänilähteet numero yksi ja kaksi, joille määritettiin suurimmat äänitehotasot. Äänilähteet numero kolme, neljä, kahdeksan ja kymmenen ovat ilmanvaihtokanavia, jotka sijaitsevat laitoksen ulkoseinustalla. Äänilähde numero kuusi on lentotuhkan kuljetushissi ja äänilähde numero yhdeksän on kuonabunkkerin kiinni olevan oven edusta. (kuvio 4.)



KUVIO 4. Tammervoima Oy:n hyötyvoimalaitoksen meluselvityksen kannalta merkittävimpien äänilähteiden sijainti laitosalueella (Maanmittauslaitos 2016, muokattu)

Kaikista Tammervoima Oy:n hyötyvoimalaitoksen alueella sijaitsevista äänilähteistä on liitteenä (1) myös melupäästön mittauspöytäkirja, josta käy ilmi jokaisen äänilähteen mitattu äänitehotaso oktaavikaistoittain ja yhteenlaskettuna, mittausajankohta, käytetty laitteisto, mittausmenetelmä ja mahdollinen melun kapeakaistaisuus tai impulssimaisuus.

6.3.4 Hyötyvoimalaitoksen äänilähteiden mallintaminen

Hyötyvoimalaitoksen äänilähteet mallinnettiin niiden tyyppin mukaan. Äänilähteet numero kaksi, neljä, kuusi, kahdeksan ja kymmenen mallinnettiin pistelähteinä. Loput äänilähteet eli äänilähde numero yksi, kolme ja yhdeksän mallinnettiin aluelähteinä. Äänilähteiden tarkka sijainti määriteltiin SoundPLAN 7.4 ohjelmistoon tuodun Tammervoima Oy:ltä saadun laitospiirustuksen perusteella. Laitospiirustuksesta oli nähtävissä äänilähteiden tarkka sijainti. Äänilähteiden korkeus määriteltiin laitospiirustuksen, sekä äänitehotasojen määrittelyn yhteydessä tehdyn kenttäpöytäkirjan ja laitosalueella otettujen kuvien perusteella.

Äänilähteiden äänitehotasot määriteltiin SoundPLAN 7.4 ohjelmistossa oktaavikaistoittain taajuuksilla 31 – 8000 Hz. Tämä tehtiin käyttäen aiemmin Nordtest NT ACOU 080 standardin mukaan laskettuja äänitehotasoarvoja. Äänitehotasot syötettiin äänilähteille oktaavikaistoittain, joista SoundPLAN laski äänilähteen kokonaisäänitehotason ja muodosti äänilähteille niiden melun taajuusjauman mukaisen spektrin. Kaikkien äänilähteiden toiminta-ajaksi määriteltiin 24 tuntia vuorokaudessa.

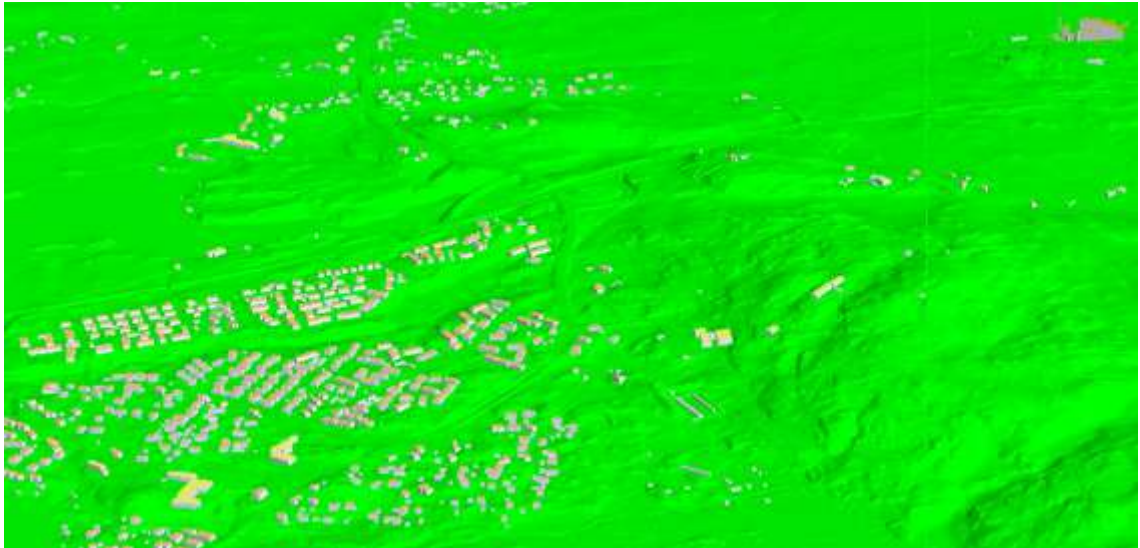
Äänilähteet numero kuusi ja yhdeksän todettiin äänitehotasoja määrittäessä kapeakaistaiseksi aistinvaraisesti ja taajuusanalyysiin perustuen. Tämän vuoksi ne mallinnettiin käyttämällä määritettyjä äänitehotasoarvoja sekä kapeakaistakorjattuja arvoja, jolloin määritettyihin arvoihin lisättiin 5 dB oktaavikaistoittain. Kapeakaistaisista äänilähteistä luotiin kaksi eri versiota, jotka määriteltiin eri tasoihin SoundPLAN ohjelmistossa, jotta lopullisissa laskelmissa oli mahdollista laskea tulokset erikseen käyttäen edellä mainittujen äänilähteiden määritettyjä äänitehotasoja sekä kapeakaistakorjattuja äänitehotasoja. Edellä mainittu menettelytapa olisi mahdollistanut äänitasojen laskemisen kapeakaistakorjatuilla arvoilla, mikäli ympäristömelumittauksissa olisi osoittautunut, että

jossakin mittauspisteessä esiintyy kapeakaistaista melua. Tällaista tilannetta ei kuitenkaan mittausten mukaan ollut, mikä johtuu siitä, että melun kapeakaistaisuus heikkenee etäisyyden kasvaessa.

Äänilähde numero kaksi oli ääntä voimakkaasti suuntaava, jonka vuoksi sen horisontaalinen suuntaavuus määriteltiin SoundPLAN ohjelmistossa. Tämä tehtiin käyttämällä äänilähteiden suuntaavuus toimintoa, jossa määriteltiin ensin 0° suunnan äänitehotasoarvot oktaavikaistoittain, jonka jälkeen syötettiin 90°, 180° ja 270° suuntien äänitehotasoarvojen ja 0° suunnan oktaavikaistakohtainen äänitehotasoarvojen erotus niitä vastaaville riveille. Tämän jälkeen SoundPLAN laski syötetyistä arvoista äänen suuntaavuuden 5° asteen välein 360° asteen sektorille eli joka suuntaan. 0° suuntana käytettiin suuntaa, josta oli määritetty suurimmat äänitehotasoarvot oktaavikaistoittain. 90° suunta oli etelässä, 180° suunta oli idässä ja 270° suunta oli pohjoisessa niin, että äänilähde sijaitsi mittauspisteiden keskellä.

6.3.5 Lähialueen rakennusten mallintaminen

Hyötyvoimalaitoksen lähialueiden rakennustiedot saatiin maanmittauslaitoksen vapaasti käytettävissä olevasta maastotietokannasta ETRS-TM35-FIN koordinaattijärjestelmässä ja N2000 korkeusjärjestelmässä, joten niitä ei tarvinnut muuntaa eri koordinaatistoon. Rakennukset jaettiin niiden tyyppin mukaan ensin tasoihin AutoCad Map 3D ohjelmassa, jonka jälkeen ne oli mahdollista tuoda tasoittain SoundPLAN ohjelmistoon. Rakennuksien tuonti tasoittain mahdollisti eri rakennustyyppien korkeuden määrittämisen erikseen. Tämän jälkeen kaikkien rakennusten pohjakorkeus määriteltiin sijaitsemaan aiemmin lasketun maastomallin pinnalla. Kuvassa (18) näkyy Tammervoima Oy:n hyötyvoimalaitoksen lähellä sijaitsevia rakennuksia. Tammervoima Oy:n hyötyvoimalaitos sijaitsee kuvan (18) oikeassa yläkulmassa.



KUVA 18. Tammervoima Oy:n hyötyvoimalaitos ja sen lähistöllä sijaitsevia rakennuksia

SoundPLAN 7.4 ohjelmistossa määritellyt korkeudet eri rakennustyypeille on esitetty taulukossa (8). Mallinnusalueena käytettiin noin 70 km² pinta-alaltaan olevaa aluetta ja se rajattiin niin, että Tammervoima Oy:n hyötyvoimalaitos sijoittui likimain alueen keskelle. Alueella sijaitsi satoja rakennuksia, joten yksittäisten rakennuksien korkeuksia oli tämän työn puitteissa mahdotonta määrittää. Tästä johtuen rakennuksien korkeudet määriteltiin rakennustyypeittäin. Määritellyt rakennusten korkeudet vastaavat Ramboll Finland Oy:n meluselvityksissä yleisesti käyttämiä rakennustyyppien korkeuksia. Tammervoima Oy:n hyötyvoimalaitos ja sen eri osien korkeus mallinnettiin tarkasti Tammervoima Oy:ltä saadun hyötyvoimalaitoksen pääpiirustuksen mukaan.

TAULUKKO 8. SoundPLAN 7.4 ohjelmistossa määritellyt korkeudet eri rakennustyy-
peille

Rakennustyyppi	Korkeus (m)
Asuinrakennukset (1–2 kerrosta)	7
Asuinrakennukset (3–n kerrosta)	11
Lomarakennukset	5
Liike- ja toimistorakennukset, sekä kirkolliset rakennukset (1–2 kerrosta)	8
Liike- ja toimistorakennukset, sekä kirkolliset rakennukset (3–n kerrosta)	11
Teollisuusrakennukset	8
Muut rakennukset (esimerkiksi: piharakennukset)	4

6.3.6 Lähialueen tiestön mallintaminen

Hyötyvoimalaitoksen lähistöllä sijaitsevat tiet mallinettiin Maanmittauslaitoksen maastokartan perusteella SoundPLAN ohjelmistossa. Hyötyvoimankatu, Hyötyvoimankuja ja Tarastenjärventie mallinettiin Jyväskylän tielle asti. Teiden leveydeksi määriteltiin kahdeksan metriä, joka perustui teiden ilmakuvaan mitattuun leveyteen. Tarastenjärventien silta, joka ylittää Jyväskylän tien, määriteltiin 8,5 metriä leveäksi. Sillan reunoille mallinettiin 0,2 metriä korkea reunakivetys. Tämän jälkeen suoritettiin uudestaan maastomallin kolmiointi, jossa otettiin huomioon myös mallinnettu tiestö. Tämän tarkoituksena oli poistaa tiestön ja vanhan maastomallin kolmioverkon päällekkäisyydet, joiden vuoksi osa tiestöstä oli paikoitellen maastomallin sisällä. Uuden kolmioinnin

jälkeen tie oli kokonaisuudessaan maastomallin pinnalla, eikä päällekkäisyyksiä esiintynyt.

Mallinnettujen teiden liikennemäärät saatiin Tammervoima Oy:n ympäristöluvasta (dnro: LSSAVI/236/04.08/2011). Ympäristöluvassa on määritelty raskailla ajoneuvoilla toteutettavien jätetoimituksien vuorokausittainen enimmäismäärä ja ajanjakso, jolloin toimituksia voidaan tehdä. Ympäristöluvassa on määritelty, että jätetoimituksia voi olla päivittäin korkeintaan 135 kappaletta. Mallinnuksessa on huomioitu raskaiden ajoneuvojen edestakainen liikennöinti hyötyvoimalaitoksen ja Jyväskylätien välillä, jolloin teiden todelliseksi vuorokausiliikenteeksi saatiin 270 kappaletta raskaita ajoneuvoja. Toimitusajankohdaksi ympäristöluvassa on määritelty klo 6 – 22 välinen aika. Ympäristöluvassa määritellyt melun raja-arvot on annettu päivä- ja yökohtaisina ekvivalenttitasoina, jonka vuoksi kokonaisliikennemäärä jaettiin toteutuvaksi tasaisesti välillä klo 6 – 22. Tällöin saatiin kokonaisliikennemääräksi 17 ajosuoritusta yölle eli klo 22 – 7 ja 253 ajosuoritusta päivälle eli klo 7 – 22. SoundPLAN ohjelmistoon tarvittiin tieto liikennemäärästä tunneittain, jolloin saatiin yöajan liikennemääräksi 1,9 ajosuoritusta tunnissa ja päiväajalle 16,9 ajosuoritusta tunnissa. Raskailla ajoneuvoilla toteutettava jätetoimitusliikenne on mallinnuksessa määritelty saapuvan kokonaisuudessaan Jyväskylätien länsisuunnasta eli Tampereen suunnasta.

Jyväskylätien ja hyötyvoimalaitoksen välisten tieosuuksien nopeusrajoitukset saatiin hyötyvoimalaitoskäynnillä tehtyjen havaintojen perusteella sekä Googlen tienäkymän kuvien perusteella. Tarastenjärventien Jyväskylätieltä länsisuunnasta nousevan rampin ja Jyväskylätieltä itäsuunnasta nousevan rampin väliselle tieosuudelle määriteltiin nopeusrajoitukseksi 60 km/h. Tämän tieosuuden jälkeisen Tarastenjärventiestä ja Hyötyvoimankujasta muodostuvan tieosuuden nopeusrajoitukseksi määriteltiin 50 km/h aina laitosalueen rajalle asti. Hyötyvoimalaitosalueen nopeusrajoitukseksi määriteltiin 30 km/h, joka on alhaisin mahdollinen nopeusrajoitus, minkä SoundPLAN ohjelmistolla voi tielle määritellä.

6.3.7 Laskenta

Laskenta-alueeksi SoundPLAN ohjelmistossa määriteltiin pinta-alaltaan noin 10 km² suuruinen alue, joka rajattiin niin, että laitos sijaitsi likimain laskenta-alueen keskellä.

Laskenta-alue oli mahdollista rajata sen jälkeen kun mallinnettu tilanne oli saatu vastaamaan likimain alueen nykytilannetta. Tämä tarkoittaa, että korkeus-, rakennus- ja tiestötiedot sekä muut käytetyt lähtötiedot oli tuotu SoundPLAN ohjelmistoon ja muokattu nykytilanteen mukaisiksi.

Laskennassa käytetyt parametrit on esitetty taulukossa (9). Laskentaruutukokona käytettiin 100 m^2 (= $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$), joka tarkoittaa, että ohjelma jakoi 10 km^2 suuruisen laskenta-alueen 100 m^2 kokoisiin yksittäisiin laskentaruutuihin ja laski niille äänitasot erikseen. Laskentakorkeudeksi määriteltiin 2 m laskennassa käytetyn maastomallin pinnasta, jolloin laskentakorkeus merenpinnasta mitattuna perustui kunkin laskentaruudun paikalliseen korkeustietoon. Ohjelman huomioon ottamien peräkkäisten heijastusten määräksi määriteltiin kolme. Rakennusten äänen absorptioarvona käytettiin -1 dB/heijastus , joka tarkoittaa, että esimerkiksi 50 dB suuruinen ääni heijastuu rakennuksesta 49 dB suuruisena.

Maanpinnan absorptioarvona käytettiin pehmeän maanpinnan absorptioarvoa yksi, ellei sitä määritelty erikseen. Maanpinnan absorptioarvon suuruudeksi määriteltiin nolla kaikille kovaksi luokiteltaville lähialueen maatyypeille. Kovaksi maaksi luokiteltiin kaikki asfaltoidut alueet, tien pinnat ja vesistöt. Laskennan sääolosuhteet olivat pohjoismaisen teollisuusmelun laskentamallin mukaiset eli heikko myötätuuli jokaiseen äänen etenemissuuntaan, 15 °C lämpötila ja 70% suhteellinen kosteus. (taulukko 9.)

TAULUKKO 9. SoundPLAN 7.4 ohjelmistossa käytetyt laskentaparametrit

Laskentamallit	Pohjoismaiset teollisuus- ja tieliikennemelun laskentamallit
Laskenta-alue	10 km ² , Tammervoima Oyn hyötyvoimalaitos sijoitettuna alueen keskelle
Yksittäisten laskentaruutujen koko	100 m ² , 10 m x 10 m
Laskentakorkeus	2 m maanpinnasta, absoluuttinen korkeus vaihtelee laskenta-alueen eri osien maanpinnan korkeuden mukaan
Laskennassa huomioitavien peräkkäisten heijastusten lukumäärä	3 kpl
Rakennusten äänen absorptioarvo	-1 dB/heijastus
Maanpinnan absorptioarvo	Laitosalue ja muut asfaltoidut alueet, tiet ja vesistöt = 0, Muut alueet = 1
Sääolot	Laskentamallien perusoletuksien mukaiset. Heikko myötätuuli jokaiseen äänen etenemissuuntaan, lämpötila 15 °C, suhteellinen kosteus 70 %

6.4 Ympäristömelumittaukset

Ympäristömelumittauksissa käytettiin luokan yksi tarkkuusvaatimuksen täyttävää äänitasomittaria. Äänitasomittari sijoitettiin jalustalle ja mittauskorkeutena oli 1,5 metriä. Äänitasomittari kalibroitiin ennen jokaista mittausta ja jokaisen mittauksen jälkeen, jotta mittarin tarkkuudesta voitiin varmistua. Äänitasomittari oli varustettu tuulisuojalla ja se suunnattiin osoittamaan äänilähteen suuntaan.

Mittausjaksojen pituus oli vähintään 15 minuuttia, joka on riittävä mitattaessa usein erittäin tasaista ja laajalle taajuusjakaumalle jakaantuvaa voimalaitosmelua. Äänitasomittaria seurattiin koko mittausjakson ajan, jotta mahdollinen muu kuin hyötyvoimalaitoksen aiheuttama melu oli helpompi tunnistaa. Äänitaso mitattiin A-taajuuspainotettuna ekvivalenttitasona ja aikapainotuksena käytettiin fast aikapainotus-

ta. Melun taajuusjakauma tallennettiin terssikaistoittain, joka mahdollisti mahdollisen melun kapeakaistaisuuden toteamisen taajuusjakaumasta.

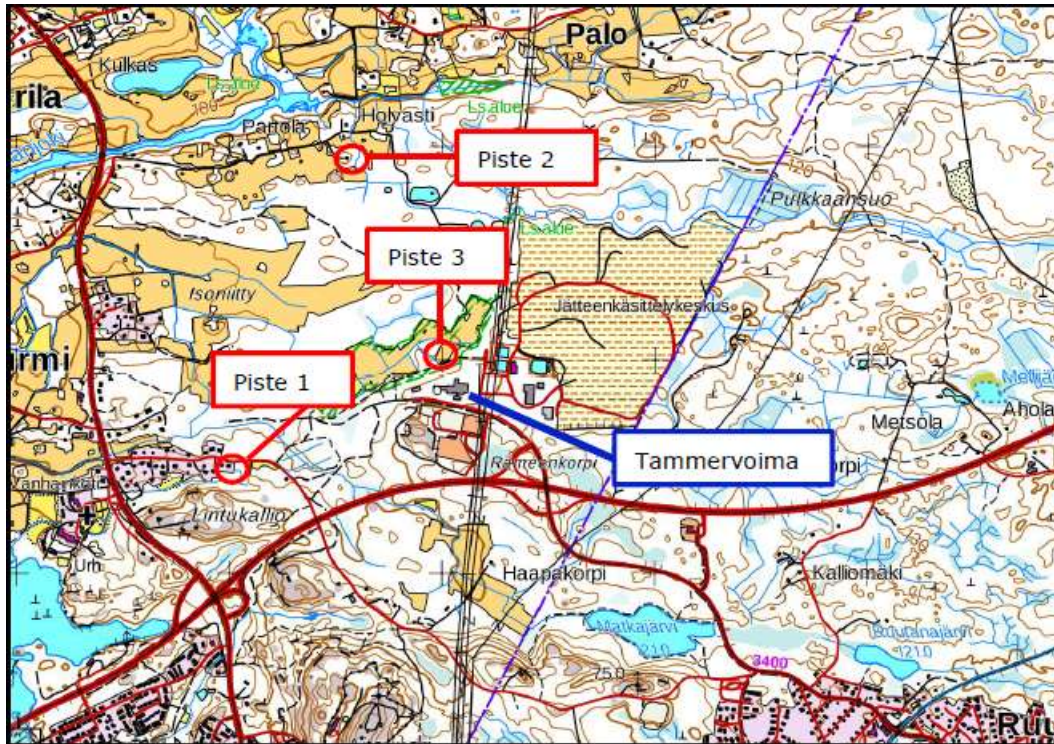
Mittaukset valikoitiin suoritettavaksi olosuhteiden kannalta suotuisina ajankohtina. Tämä tarkoittaa, että mittausten suoritushetkellä ei satanut ja tuuli oli lievä, mutta hyötyvoimalaitokselta mittauspisteelle päin sektorissa $\pm 45^\circ$ puhaltava, kuten Ympäristöministeriö ohjeessa on esitetty. Osa mittauksista suoritettiin täysin tyynellä säällä, joka täyttää myös ympäristöministeriön mittausohjeen mukaiset sääolot.

Mittausajankohdan esivalinta tehtiin Ilmatieteen laitoksen vapaasti käytössä olevien sääennusteiden perusteella. Mittausajankohdan esivalinnalla varmistuttiin mittausten kannalta suotuisista sääoloista. Päiväajan mittauksien aikana vallinneet sääolosuhteet todettiin käyttämällä paikalle tuotua Davis Vantage Pro kenttäasemaa, joka sijoitettiin mittauspisteen läheisyyteen. Sääasemalla tallennettiin tieto mittauksen aikana vallinneesta lämpötilasta, tuulen nopeudesta ja suunnasta sekä suhteellisesta ilmankosteudesta. Tämän lisäksi mittaaja havainnoi ja merkitsi ylös mittaushetkellä vallinneet sääolosuhteet. Yöajan mittauksissa ei ollut mahdollisuutta käyttää kenttäasemaa, joten sääolosuhteiden todentaminen perustui Ilmatieteen laitoksen säädataan ja mittaajan säähavaintoihin.

Ympäristömelumittauksissa käytettiin äänitasomittarina Norsonicin Nor118 äänipainetasomittaria, jolla mitattiin A-taajuuspainotettuja äänipainetason ekvivalenttitasoja terssikaistoittain. Kalibraattorina käytettiin äänitasomittarin laitevalmistajan suosittelemaa tarkkuusluokan yksi Norsonic Nor1251 kalibraattoria. Sääasemana käytettiin Davisin Vantage Pro 2 liikutettavaa sääasemaa.

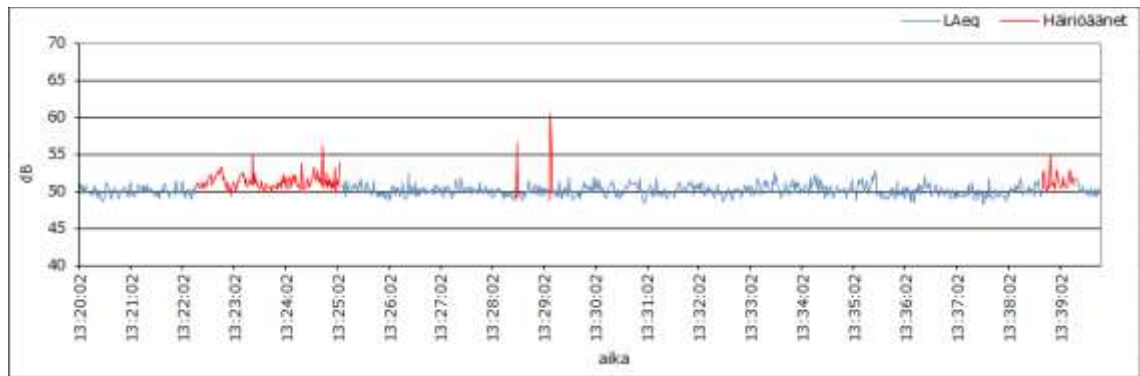
Ympäristömelumittauksia suoritettiin kolmessa mittauspisteessä. Jokaisessa mittauspisteessä suoritettiin päiväajan sekä yöajan ympäristömelumittaukset erikseen. Mittauspisteet yksi ja kaksi sijaitsivat hyötyvoimalaitokselta tarkasteltuna lähimpien asuinalueiden reunalla, joten niissä sovellettiin Tammervoima Oy:n ympäristöluvassa määriteltyjä melutason raja-arvoja. Mittauspiste yksi sijaitsi noin 850 – 900 metriä laitosalueelta Nurmen kylän suuntaan. Mittauspiste kaksi sijaitsi noin kilometrin etäisyydellä laitosaluusta Palon kylän suunnassa. Mittauspiste kolme sijaitsi hyötyvoimalaitoksen pääosin luoteispuolella olevan luonnonsuojelualueen reunalla. Mittauspisteelle kolme ei kuitenkaan ollut Tammervoima Oy:n ympäristöluvassa määritelty melutason raja-

arvoja. Etäisyys laitosalueen reunalta läheisen luonnonsuojelualueen reunalle on noin 50 metriä (kuva 19.) Liitteissä (2–7) on lisäksi esitetty mittauspisteiden tarkempi sijainti.



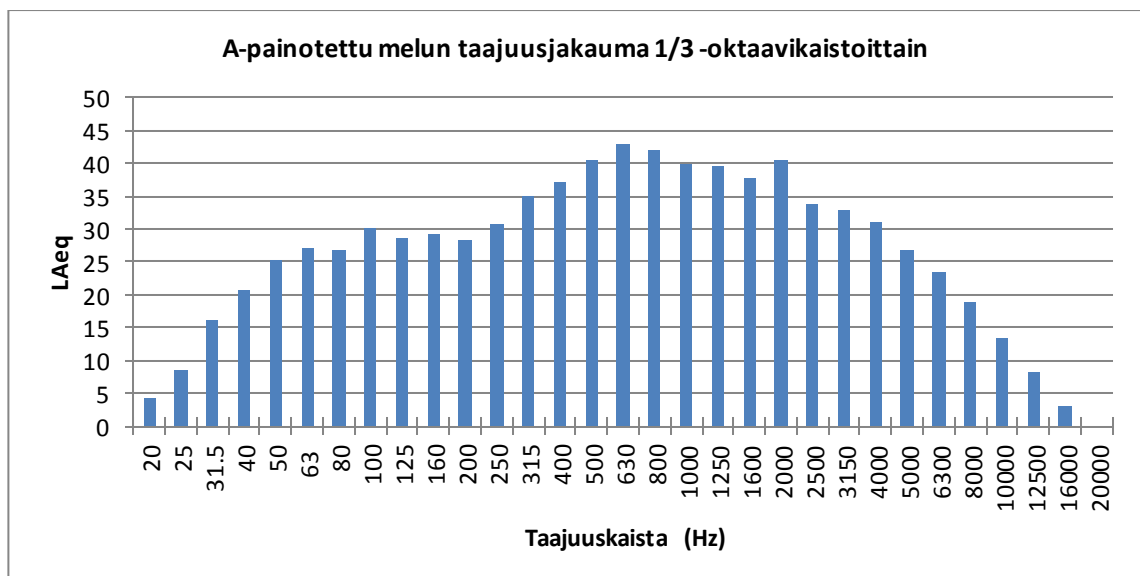
KUVA 19. Ympäristömelun mittauspisteet, sekä Tammervoiman hyötyvoimalaitos kartalla (Ramboll Finland Oy 2016)

Mittausjaksojen aikana esiintyneet häiriöäänät poistettiin mittausdatasta mittausten aikana tehtyjen havaintojen perusteella, eikä niitä otettu huomioon lopullisessa tuloksessa. Alla olevassa kuviossa (5) on esitetty mittauspisteessä kolme tehdyn päiväajan mittauksen aikaiset häiriöäänät. Kuviossa (5) punaisella värillä esitettyjä häiriöäänäitä olivat kaikki äänät, jotka eivät olleet hyötyvoimalaitokselta peräisin. Merkittävimmät häiriöäänät johtuivat ajoneuvoliikenteestä viereiselle Tarastenjärven jätteenkäsittelykeskukseen ja niiden kuorman tyhjennyksistä sekä ajoittain äänekkäästä linnunlaulusta. Myös tuulenpuuskat aiheuttivat ajoittain häiriöäänäitä.



KUVIO 5. Mittauspisteen numero kolme mittausdatasta poistetut häiriöäänät.

Mittausdatasta tarkistettiin myös ympäristömelun mahdollinen kapeakaistaisuus, jonka toteamiseksi tarvitaan sekä aistinvarainen että mitattuun dataan perustuva havainto. Tutkituissa mittauspisteissä esiintyvä melu ei ollut mittausdatan perusteella kapeakaistaista, vaikka mittauspisteessä kolme epäiltiin melua aistihavainnon perusteella kapeakaistaiseksi. Kuviossa (6) on esitetty mittausdatasta muodostetun taajuusjakauman kuvaaja, josta mahdollinen melun kapeakaistaisuus tarkistettiin. Kuviossa (6) on esitetty mittauspisteen kolme päivääajan äänitaso A-taajuuspainotettuna ekvivalenttitasona terssikaistoittain. Kuvion (6) perusteella voidaan todeta, ettei mittauspisteessä kolme esiintynyt melu täyttänyt ympäristömelun mittausohjeessa annettua kapeakaistaisen melun määritelmää.



KUVIO 6. Mittauspisteessä numero kolme mitatun ympäristömelun taajuusjakauma terssikaistoittain.

7 EPÄVARMUUSTARKASTELU

7.1 Ympäristömelumittauksen epävarmuus

Ympäristöministeriön ohjeessa ympäristömelun mittaamiseen on esitetty ympäristömelumittausten yleisimmät epävarmuustekijät ja niistä johdettava ympäristömelumittausten luotettavuusarvio. Luotettavuusarviota tulee soveltaa aina mikäli mitattuja tuloksia verrataan ohje- tai raja-arvoihin tai mikäli tulosten perusteella halutaan tehdä johtopäätöksiä. (Ympäristöministeriö 1995, 21, 36.)

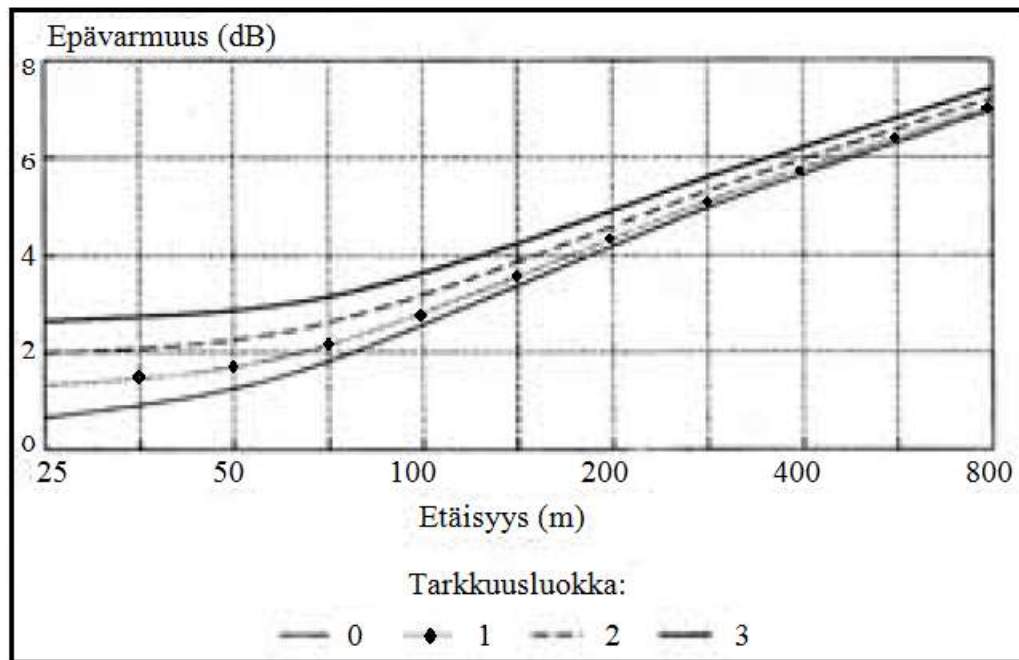
Yleisimpiä ympäristömelumittauksen epävarmuustekijöitä ovat äänilähteen ja mittauspisteen välinen etäisyys, äänitasomittarin tarkkuus, mittausmenetelmän tarkkuus, mitaajan aiheuttamat ääniheijastukset, äänilähteen äänensäteilyn vaihtelut, sääolot ja taustamelu. Sääolojen vaikutus äänen etenemiseen korostuu etäisyyden kasvaessa. Mittausolosuhteiden tulisi täyttää taulukossa (10) esitetyt vaatimukset, jotta mittauksen epävarmuus ei kasvaisi oleellisesti. (Ympäristöministeriö 1995, 21–22.) Käytännössä ympäristömelumittauksissa on hyvin vaikeata päästä ± 2 dB pienempään epävarmuuteen (Ympäristöministeriö 1995, 42).

Taulukossa (10) esitetyt vaatimukset tulisi täyttyä ympäristömelumittauksissa, joille aiotaan soveltaa ympäristöministeriön ohjeessa esitettyä luotettavuusarviota. Olosuhteissa, joissa taulukossa (10) esitetyt vaatimukset eivät täyty, sovelletaan mittausepävarmuutena ± 10 dB. (Ympäristöministeriö 1995, 22.)

TAULUKKO 10. Ympäristömelumittauksen olosuhdevaatimukset, jos sovelletaan ympäristöministeriön ohjeen mukaista luotettavuusarviota (Ympäristöministeriö 1995, 22)

Ei sadetta
Tuulen nopeus korkeintaan 3,5 m/s mitattuna vähintään 2 m korkeudella
Tuulen suunta melulähteestä mittauspisteeseen päin suunnilleen sektorissa $\pm 45^\circ$ (vaatimus koskee yli 30 m mittausetäisyyksiä)
Taustamelun aiheuttama äänitasoindikaatio vähintään 10 dB alle mitattavan äänitason
Äänitasomittarin tarkkuusluokka 2 tai parempi (1 tai parempi tulosten epävarmuudella $\Delta L = 2$ dB)

Alla olevasta kuviosta (7) voidaan arvioida ympäristömelumittauksen epävarmuutta. Tällöin on vaatimuksena, että taulukossa (10) aiemmin esitetyt olosuhdevaatimukset täyttyvät. Kuviossa (7) on otettu huomioon sääolojen ja äänitasomittarin aikaansaama epävarmuus eri etäisyyksillä, kun käytetään tarkkuusluokan 0, 1, 2 tai 3 äänitasomittaria. (Ympäristöministeriö 1995, 40.)



KUVIO 7. Sääolojen ja mittarin tarkkuuden aiheuttama epävarmuus eri etäisyyksillä, kun mitataan tasaista melua. (Ympäristöministeriö 1995, 40, muokattu)

Tehtäessä luotettavuusarvio mittauspisteelle, joka sijaitsee yli 800 metrin etäisyydellä äänilähteestä, tulee suorittaa ympäristöministeriön ohjeessa kuvailtu yksityiskohtaisempi luotettavuusarvio. Yksityiskohtaisempaa luotettavuusarviota voidaan kuitenkin soveltaa myös lyhyemmällä etäisyyksillä, mikäli tulosten epävarmuutta halutaan pienentää. Tällöin mittauksen epävarmuutta voidaan pienentää oleellisesti määrittämällä äänilähteen säteilemän äänitason keskihajonta ja suorittamalla useita toisistaan riippumattomia mittauksia mittauspisteessä. Toisistaan riippumattomiksi mittauksiksi voidaan yleensä katsoa eri päivinä suoritettut mittaukset. (Ympäristöministeriö 1995, 41.)

Tapauskohtainen kokonaisepävarmuus, jossa otetaan huomioon mittauspisteen etäisyys äänilähteestä, sääolot, äänitasomittarin tarkkuusluokka ja äänilähteen säteilemän äänen vaihtelu, voidaan laskea alla esitetyn kaavan (19) mukaisella tavalla. Kaavassa (19) muuttuja N_m riippuu mittauspisteessä suoritettujen toisistaan riippumattomien ympäris-

tömelumittausten määrästä. Muuttuja N_m on sitä suurempi mitä enemmän toisistaan riippumattomia mittauksia mittauspisteessä on suoritettu, joka tarkoittaa, että lisäämällä mittausten määrää voidaan kokonaisepävarmuutta laskea merkittävästi. Toinen tärkeä muuttuja kaavassa (19) on t_i , joka riippuu äänilähteen säteilemän äänitason keskihajonnan laskemiseen käytettyjen mittausten määrästä. Taulukossa (11) on esitetty edellä mainittujen mittausten lukumäärän ja muuttujan t_i välinen suhde. Muuttuja t_i on sitä pienempi mitä enemmän toisistaan riippumattomia mittauksia on käytetty äänilähteen säteilemän äänitason keskihajonnan laskemiseen. Tämä tarkoittaa, että mittauksen kokonaisepävarmuus pienenee mitä enemmän mittauksia äänilähteen säteilemän äänitason keskihajonnan määrittämiseen on käytetty. (Ympäristöministeriö 1995, 36–41.)

Etäisyydestä ja säästä johtuvaa epävarmuustekijää kuvaa kaavassa (19) muuttuja $\sigma_{sää}$. Edellä mainitun muuttujan arvo saadaan kuviosta (8) ja se riippuu mittauspisteestä ja äänilähteen välisestä etäisyydestä. Säästä ja etäisyydestä johtuva epävarmuus kasvaa mittauspisteestä ja äänilähteen välisen etäisyyden kasvaessa. (Ympäristöministeriö 1995, 36–41.)

$$\delta = \sqrt{\left(\frac{t_i}{\sqrt{N_m}} \sigma_m\right)^2 + \left(\frac{1,65}{\sqrt{N_m}} \sigma_{sää}\right)^2 + (1,65 \sigma_{tl})^2} \text{ dB} \quad (19)$$

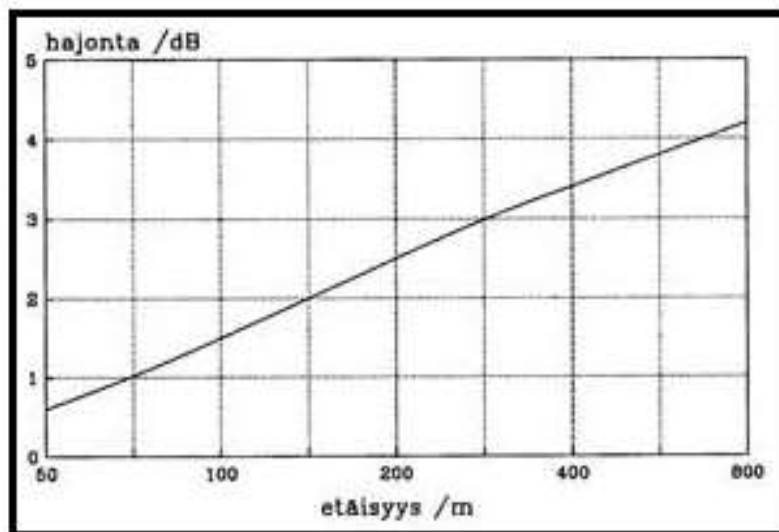
jossa:

- t_i = taulukosta (11) saatava arvo, joka riippuu toisistaan riippumattomien äänilähteen äänisäteilyn vaihtelumittausten lukumäärästä
- N_m = mittauspisteessä tehtyjen toisistaan riippumattomien ympäristömelumittausten lukumäärä
- σ_m = äänilähteen äänisäteilyn keskihajonta, joka mitataan äänilähteen läheltä toisistaan riippumattomilla mittauksilla
- $\sigma_{sää}$ = kuviosta (8) saatava arvo, joka riippuu mittauspisteestä ja äänilähteen välisestä etäisyydestä
- σ_{tl} = äänitasomittarin tarkkuusluokkaa vastaava keskihajonta-arvo (tarkkuusluokan 1 äänitasomittarille = 0,8).

(Ympäristöministeriö 1995, 36–41, muokattu.)

TAULUKKO 11. Äänilähteen äänisäteilyn vaihtelumittausten lukumäärän ja termin t_i välinen suhde (Ympäristöministeriö 1995, 38)

Äänilähteen äänisäteilyn vaihtelumittausten lukumäärä (kpl)	2	3	4	5	6	7–9	10–16	17–	∞
t_i	6,31	2,92	2,35	2,13	2,02	1,9	1,8	1,7	1,65



KUVIO 8. Sääoloista johtuva epävarmuus eri etäisyyksillä, kun taulukon (10) ehdot täyttyvät (Ympäristöministeriö 1995, 40)

7.2 Melumallinnuksen epävarmuus

Melumallinnus tehtiin käyttäen SoundPLAN 7.4 laskentaohjelmistoa, jossa laskentamalleina käytettiin pohjoismaisia teollisuus- ja tieliikennemelun laskentamalleja. SoundPLAN 7.4 on yksi monista melun leviämisen arvioimiseen käytetyistä laskentaohjelmistoista. Käytetyn laskentaohjelman ei pitäisi itsessään vaikuttaa laskentatuloksiin, vaan melumallinnuksen epävarmuustekijät muodostuvat pääosin melumallinnuksessa käytettyjen laskentamallien, sekä käytettyjen lähtötietojen epävarmuuksista (Eurasto 2009, 12).

Eri laskentaohjelmilla lasketut tulokset saattavat Iso-Britanniassa vuonna 2006 tehdyn tutkimuksen mukaan kuitenkin erota toisistaan jonkin verran, vaikka tulosten laskemi-

seen käytettäisiin samoja laskentamalleja. Iso-Britanniassa tehdyssä tutkimuksessa käytettiin viittä eri laskentaohjelmaa, joissa kaikissa oli käytössä englantilainen tieliikennemelun laskentamalli CRTN. Tutkimuksen perusteella suurin keskimääräinen ero laskentaohjelmien laskemien äänitasojen välillä oli 2 dB, kun taas suurin ero tarkasteltaessa yhtä pistettä oli jopa 11 dB. Eroavaisuudet johtuvat eroista laskentamallien toteutuksessa laskentaohjelmissa. Tämä tarkoittaa, että osassa laskentaohjelmistoja tietylle laskentamallille on tehty olettamuksia, jotka eroavat muiden laskentaohjelmistojen tekemistä olettamuksista hieman. (Hepworth 2006;Eurasto 2009, 12.)

7.2.1 Tiet ja liikennemäärät

Raskailla ajoneuvoilla toteutettava jätetoimitusliikenne on mallinnuksessa määritelty saapuvan kokonaisuudessaan Jyväskylätien länsisuunnasta eli Tampereen suunnasta. Todellisuudessa osa jätetoimituksista saattaa saapua myös Jyväskylätien itäsuunnasta, sillä jätetoimituksia tekee myös pienessä määrin Jyväskylän jätehuoltoyhtiö Mustankorkea Oy. Tarkkaa tietoa jätetoimituksien saapumissuunnasta ei ollut, joten kaikki toimitukset mallinnettiin saapuvaksi Tampereen suunnasta. Käytännössä jätetoimituksien vuorokausimäärät ovat kuitenkin niin pieniä Jyväskylätien kokonaisliikenteeseen nähden, ettei tehdyllä oletuksella ole merkitystä.

Melumallinnuksessa ei otettu hyötyvoimalaitoksen lähialueen tiestön liikennemäärissä huomioon työmatkaliikennettä, joka lisää tiestön kokonaisvuorokausiliikennemääriä jonkin verran. Työmatkaliikennettä ei huomioitu mallinnuksessa, sillä sen määrästä ja ajankohdasta ei ollut saatavilla tarkkaa tietoa. Työmatkaliikenteen määrä saattaa myös vaihdella eri tekijöistä johtuen. Sen vaikutus on kuitenkin oletettavasti vähäinen suhteessa jätekuljetuksiin.

7.2.2 Maastomalli ja rakennustiedot

Melumallinnuksen maastomallissa käytettyä Maanmittauslaitoksen kahden metrin korkeusmallia on tuotettu kahdessa eri laatuluokassa. Laatuluokan yksi tarkkuus on $\pm 0,3$ m, kun taas laatuluokan kaksi tarkkuus on ± 1 m. Korkeusmalli on tuotettu laserkeilausaineistosta, jota tuotetaan tekemällä keilauslentoja mitattavan alueen yllä. Laatuluokkien

tarkkuusero johtuu korkeusmalleihin käytetystä laserkeilausaineistosta. Laatuluokan yksi laserkeilausaineisto on kerätty keväällä, jolloin kasvillisuus on vähäistä. Tästä johtuen laserkeilausaineisto vastaa paremmin maan todellisia muotoja, kun tapahtuu vähemmän virheellisiä heijastuksia kasvillisuudesta. Laatuluokan yksi korkeusmalli on myös mittauksen jälkeen tarkastettu manuaalisesti ilmakuviin perustuen. Melumallinnuksessa luotuaan maastomalliin käytettiin kahden metrin korkeusmallia, joka oli laatuluokkaa yksi. (Maanmittauslaitos 2016.)

Maastomalli laskettiin SoundPLAN 7.4 ohjelmistossa Maanmittauslaitoksen korkeuspisteistöstä. Pisteiden välisen korkeuden SoundPLAN arvioi käytettävissä olevien pisteiden perusteella, josta johtuen maastomalli ei vastaa täysin maanpinnan todellisia muotoja. Tämän epävarmuustekijän vaikutus laskentatulokseen voidaan kuitenkin luokitella merkityksettömäksi.

Melumallinnuksessa käytetyt rakennustiedot saatiin Maanmittauslaitoksen maastotietokannasta. Maastotietokannan rakennettujen kohteiden sijaintitarkkuus on useimmiten ± 3 m. (Maanmittauslaitos 2016.) Kyseisellä epävarmuudella ei ole merkitystä, sillä hyötyvoimalaitosta lähimpänä sijaitsevat rakennukset ovat suhteellisen kaukana laitoksesta.

Mallinnetulla alueella sijaitsevien rakennuksien suuren määrän takia oli tämän työn puitteissa mahdotonta määrittellä jokaisen rakennuksen korkeutta erikseen, josta johtuen jouduttiin rakennuksille käyttämään rakennustyyppeihin ja kerroslukumääriin perustuvia rakennuskorkeuksia. Tästä johtuen rakennusten korkeudet eivät vastaa täysin rakennusten oikeita korkeuksia. Edellä mainitulla epävarmuustekijällä ei ole kuitenkaan merkittävää vaikutusta laskentatulokseen.

7.2.3 Pohjoismaisten teollisuus- ja tieliikennemelun laskentamallien tarkkuus

Pohjoismaisella teollisuusmelun laskentamallilla laskettujen A-taajuuspainotettujen äänitason ekvivalenttitasojen keskihajonta vaihtelee mallinnetusta tilanteesta riippuen. Laskentamallilla laskettujen tulosten keskihajonta on 5 – 10 dBA yhdelle maanpinnasta nähden matalalle sijoitetulle äänilähteelle, kun äänilähde säteilee kapeakaistaista melua taajuusvälillä 250 – 500 Hz. Keskihajonnan arvioidaan olevan suurin tilanteessa, jossa matalalla oleva äänilähde säteilee kapeakaistaista 250 – 500 Hz taajuisista ääntä vastaan-

ottimelle, joka sijaitsee lähellä maata ja kaukana äänilähteestä. (Kragh ym. 1982, 9.)

Laskentamallilla laskettujen tulosten keskihajonta on 1 – 3 dBA tilanteessa, jossa ryhmä äänilähteitä säteilee laajakaistaista melua ja vastaanotin on alle 500 metrin etäisyydellä äänilähteistä. Tällöin keskihajonta on suurempi, mikäli vastaanotin sijaitsee noin kahden metrin korkeudessa ja vastaavasti pienempi, mikäli vastaanotin sijaitsee yli viiden metrin korkeudessa. (Kragh ym. 1982, 9.)

Pienin keskihajonta pohjoismaisella teollisuusmelun laskentamallilla lasketuille äänitasoille on kun laajakaistaista melua säteileviä äänilähteitä on useita ja ne sijaitsevat melko korkealla. Tällaisessa tilanteessa keskihajonta on alle 1 dBA, kun vastaanotin sijaitsee yli viiden metrin korkeudessa tai lähellä äänilähteitä. (Kragh ym. 1982, 10.)

7.2.4 Mallinnuksessa käytettyjen äänilähteiden äänitehotasojen tarkkuus

Tammervoima Oy:n hyötyvoimalaitoksen äänilähteiden äänitehotasot määritettiin NT ACOU 080 standardin mukaisesti. Edellä mainitun standardin mukaisesti tehtyjen mitausten epävarmuustaso on ± 2 dBA, kun mitataan laajakaistaista teollisuusmelua hyödyntäen useaa mittauspistettä samalle äänilähteelle. (NT ACOU 080 1991, 9.) Äänilähteiden äänitehotasojen määrittämiseen liittyvä epävarmuustaso lisää mallinnustuloksiin liittyvää epävarmuutta jonkin verran.

8 TULOKSET JA JOHTOPÄÄTÖKSET

8.1 Tuloksien vertailu raja-arvoihin epävarmuudet huomioiden

Tässä meluselvityksessä käytettiin tutkimusmenetelminä Tammervoima Oy:n ympäristöluvan (dnro: LSSAVI/236/04.08/2011) mukaisesti ympäristömelumittauksia päivä- ja yöaikoina lähimmissä häiriintyvissä kohteissa sekä melunleviämismallinnusta.

Mitaten ja mallintaen saatuja tuloksia verrattiin ympäristö lupaan ympäristöministeriön mittausohjeen mukaisesti. Tämä tarkoittaa, että ympäristöluvassa määritellyt raja-arvot ylittyvät mikäli mittaus- ja mallinnustulos on suurempi kuin raja-arvon (L_0) ja epävarmuuden (ΔL) summa. Raja-arvo voidaan vastaavasti todeta alittuneeksi, mikäli mittaus- ja mallinnustulokset ovat pienempiä kuin ympäristöluvassa määritellyn raja-arvon ja epävarmuuden erotus. (Ympäristöministeriö 1995, 23.)

Ympäristömelumittausten mittaustulosten epävarmuudet määritettiin ympäristöministeriön ohjeen mukaisesti ja niiden määrittämisessä otettiin huomioon laitoksen ja mittauspisteen välinen etäisyys, toisistaan riipumattomien mittausten lukumäärä, mittalaitteen hajonta ja sääolojen muodostama epävarmuus. Ympäristömelumittauksen epävarmuustason määrittämisessä sovellettiin aiemmin esiteltyä laskukaavaa (19). Näätäsuon luonnonsuojelualueen reunalla sijaitsevalle mittauspisteelle numero kolme määritettiin epävarmuudeksi ± 3 dB. Nurmen kylän suunnassa laitoksesta noin 900 metrin päässä sijaitsevalle mittauspisteelle numero yksi määritettiin epävarmuustasoksi ± 7 dB. Palon kylän suunnassa laitoksesta noin kilometrin päässä sijaitsevan mittauspisteen numero kaksi epävarmuustasoksi saatiin ± 8 dB. Sääolot olivat kaikkien päivä- ja yöajan mittausten aikana ympäristöministeriön mittausohjeen mukaiset ja ne on esitelty liitteissä (2–7) erikseen jokaiselle mittauspisteelle.

Mallinnustulosten epävarmuus määriteltiin pohjoismaisen teollisuusmelun laskentamallin mukaisesti, jolloin laitosta lähimpänä sijaitsevan luonnonsuojelualueen äänitasojen epävarmuudeksi saatiin ± 3 dB. Laitosta lähimpien häiriintyvien asuinalueiden etäisyydellä sovellettiin ± 5 dB epävarmuustasoa, sillä ne sijaitsivat huomattavasti kauempana. Mallinnuksen epävarmuustason määrittämisessä on huomioitu pohjoismaisten teollisuus- ja tieliikennemelun sekä äänitehotasojen määrittämisen epävarmuudet.

Ympäristömelumittauksista saadut tulokset sekä mittauksen epävarmuustasot on esitelty taulukossa (12). Liitteissä (2–7) on esitetty myös ympäristömelumittauksen melumittauspöytäkirjat kaikille mittauspisteille päivä- ja yöaikana tehdyistä mittauksista. Liitteinä (2–7) olevista melumittauspöytäkirjoista käy ilmi ympäristömelumittauksen mittauspaikkojen sijainti, mittausajankohta, käytetty laitteisto, sääolot mittauksen aikana, mittauksen epävarmuustaso, poistetut häiriöäänet ja melun taajuusjakauma.

TAULUKKO 12. Mittaustulosten ja epävarmuuksien vertailu ympäristöluvan raja-arvoihin

Mittauspiste	$L_0 + \Delta L$	$L_0 - \Delta L$	Mittaustulos	Vertaus ympäristöluvan raja-arvoihin (Alitus/Ylitys/Ei varmuutta)
P.1 päivä	62 dBA	48 dBA	47 dBA	alitus
P.1 yö	57 dBA	43 dBA	42 dBA	alitus
P.2 päivä	63 dBA	47 dBA	43 dBA	alitus
P.2 yö	58 dBA	42 dBA	37 dBA	alitus
P.3 päivä	58 dBA	52 dBA	50 dBA	alitus
P.3 yö	53 dBA	47 dBA	51 dBA	ei varmuutta

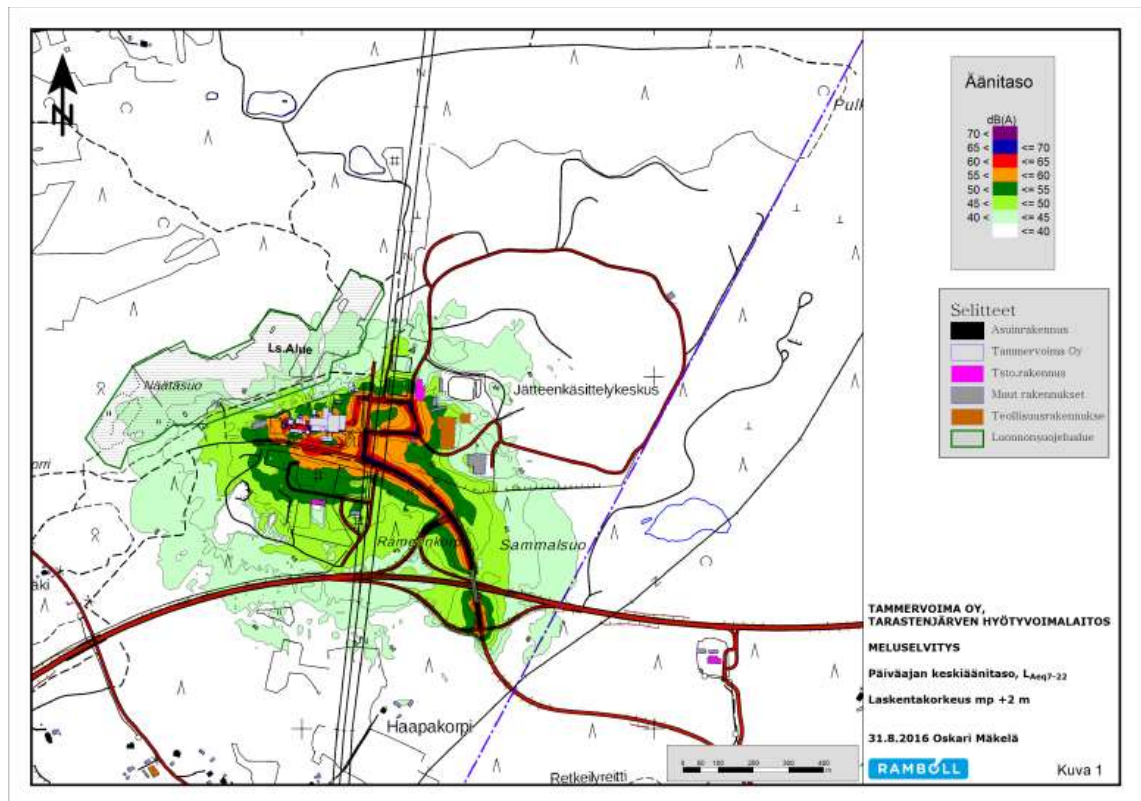
Melumallinnustulokset ja niiden epävarmuustasot on esitetty taulukossa (13). Taulukossa (13) esitetyt mallinnustulokset on saatu mittauspisteisiin numero yksi, kaksi ja kolme sijoitetuille vastaanottimille.

TAULUKKO 13. Mallinnustulosten ja epävarmuuksien vertailu ympäristöluvan raja-arvoihin

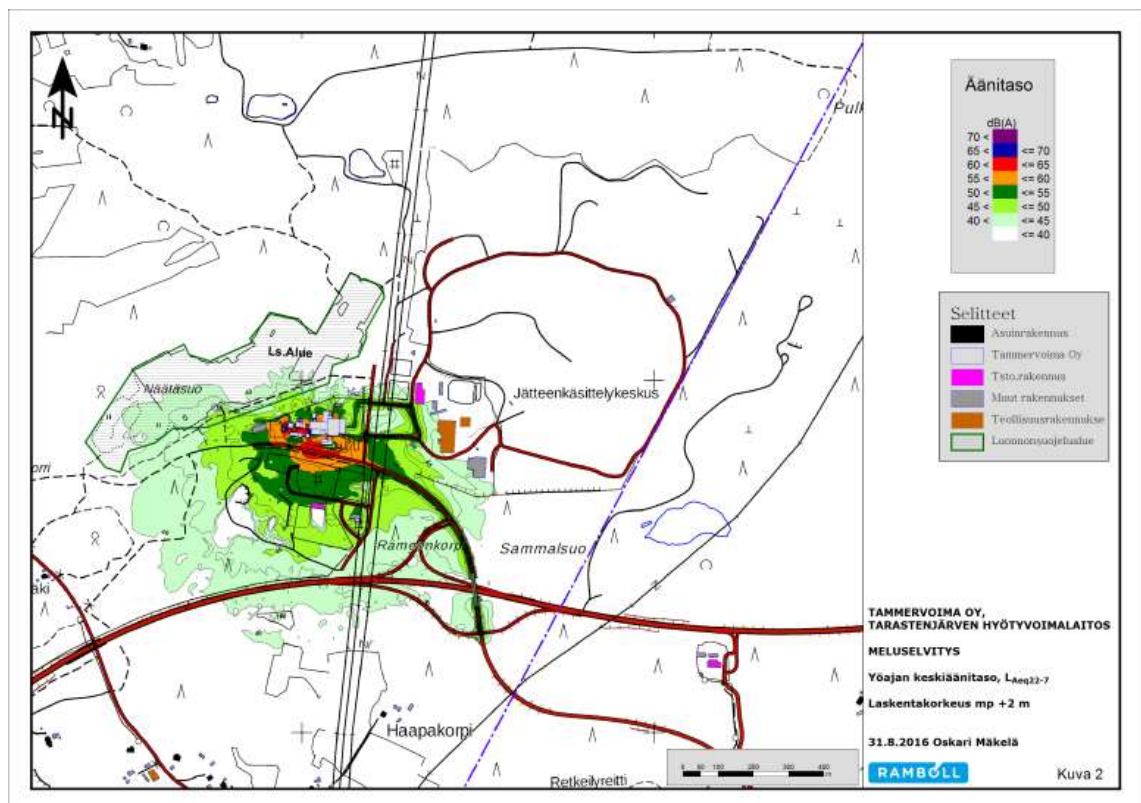
Mittauspiste	$L_0 + \Delta L_{(Mallinnus)}$	$L_0 - \Delta L_{(Mallinnus)}$	Mallinnustulos	Vertaus ympäristöluvan raja-arvoihin (Alitus/Ylitys/Ei varmuutta)
P.1 päivä	60 dBA	50 dBA	32 dBA	alitus
P.1 yö	55 dBA	45 dBA	32 dBA	alitus
P.2 päivä	60 dBA	50 dBA	27 dBA	alitus
P.2 yö	55 dBA	45 dBA	22 dBA	alitus
P.3 päivä	58 dBA	52 dBA	47 dBA	alitus
P.3 yö	53 dBA	47 dBA	46 dBA	alitus

Melunleviämismallit, joista käy ilmi hyötyvoimalaitoksen lähialueiden melutasot, on esitelty kuvissa (20 & 21). Tämän lisäksi melunleviämismallit on esitetty suuremmissa koossa erikseen päivä- ja yöajalle liitteissä (8) ja (9). Melutasot on havainnollistettu värikoodein ja niiden selitykset löytyvät melunleviämismallien oikeasta yläkulmasta. Kuvassa (20) on esitetty Tammervoima Oyn hyötyvoimalaitoksen päiväajan melunleviämismalli. Kuvassa (21) on vastaavasti esitetty hyötyvoimalaitoksen yöajan melunleviämismalli. Kuvien (20 & 21) ainoa ero on, että yöajan melunleviämismallissa on hyötyvoimalaitokselle johtavalle tielle mallinnettu vähemmän raskailla ajoneuvoilla suoritettavia jätetoimituksia päiväajan melunleviämismalliin verrattuna. Mallinnuksessa käytetyt jätetoimitusmäärät on esitetty aiemmin tässä työssä. Kaikki hyötyvoimalaitoksen muut äänilähteet olivat toiminta-ajaltaan ympärivuorokautisia, joten niistä ei syntynyt eroa kuvien (20 & 21) välille.

Tammervoima Oyn päivä- ja yöajan melunleviämismallien perusteella voidaan todeta, että hyötyvoimalaitoksen melu ei ulotu laitokselta vähintään 900 metrin päässä sijaitseville lähimmille Palon kylän ja Nurmen kylän suunnan asuinalueille eli mittauspisteille numero yksi ja kaksi (kuva 20) (kuva 21). Kuvissa (20 & 21) näkyvälle Näätäsuon luonnonsuojelualueelle eli mittauspisteelle numero kolme ulottuu laajalti 45 dBA melutaso. Myös 50 dBA melutaso ulottuu pieneltä osin luonnonsuojelualan rajojen sisäpuolelle. Luonnonsuojelualueelle ei kuitenkaan sovelleta ympäristöluvan raja-arvoja.



KUVA 20. Tammervoima Oy:n hyötyvoimalaitoksen päiväajan melunleviämismalli



KUVA 21. Tammervoima Oy:n hyötyvoimalaitoksen yöajan melunleviämismalli

Tehtyjen mittausten ja mallinnuksen perusteella sekä epävarmuudet huomioiden voidaan todeta ympäristöluvassa melutason raja-arvojen alittuvan lähimmillä asuinalueilla eli mittauspisteissä numero yksi ja kaksi. Tammervoima Oy:n ympäristöluvassa on määriteltä, että raja-arvoja sovelletaan ainoastaan lähimmille häiriintyvälle asuinalueille, joten ympäristöluvassa määriteltä melutasovaatimus voidaan näiden tulosten perusteella todeta alittuvan. Tammervoima Oy:n hyötyvoimalaitoksen melu ei myöskään mittajaan aistihavainnon perusteella kuulunut lähimmillä asuinalueilla sijaitsevilla mittauspisteissä numero yksi ja kaksi, jonka perusteella voidaan myös todeta melutason raja-arvon alittuvan.

Mittauspisteessä numero kolme voidaan todeta päiväajan melutason raja-arvon alittuvan. Mittauspisteessä kolme yöajan melutason raja-arvon alittumisesta tai ylittymisestä ei voida tehtyjen mittausten perusteella varmistua, vaikka kyseisen pisteen mallintamalla laskettu melutaso alittaakin melutason raja-arvon. Mittauspisteessä numero kolme ei kuitenkaan sovelleta Tammervoima Oy:n ympäristöluvassa määriteltä raja-arvoja, joten melutason raja-arvon alittumisesta tai ylittymisestä ei tarvitse varmistua.

8.2 Mallinnus- ja mittaustulosten vertailu epävarmuudet huomioiden

Mallinnus- ja mittaustulokset ovat epävarmuudet huomioiden yhtenäisiä laitosta lähimpänä sijaitsevassa mittauspisteessä numero kolme. Tämän lisäksi mittauspisteessä numero yksi yöajan mitattu- ja mallinnettu tulos ovat epävarmuudet huomioiden yhteneviä. Muut mitatut- ja mallinnetut tulokset eivät ole epävarmuudet huomioiden yhteneviä. Tämä johtuu mittauspisteiden ja hyötyvoimalaitoksen välisestä suuresta etäisyydestä, joka korostaa mittauspisteissä esiintyneen taustamelun vaikutusta, kun hyötyvoimalaitoksen melu kuuluu hiljaisemmin.

Käytännössä on mielekästä vertailla ainoastaan mittauspisteessä numero kolme mallinnus- ja mittaustuloksia, sillä se sijaitsee laitoksesta vain noin 100 m etäisyydellä. Muut mittauspisteet sijaitsevat laitoksesta selvästi kauempana, mikä lisää tulosten epävarmuustasoa ja nostaa taustamelun merkitystä mitattuihin tuloksiin. Tammervoima Oy:n hyötyvoimalaitoksen aiheuttamasta melutasosta mittauspisteissä numero yksi ja kaksi saa tarkimman kuvan mallinnustuloksia tarkastelemalla. Tämä johtuu siitä, että mallinnuksessa on laskettu ainoastaan Tammervoima Oy:n hyötylaitoksen vaikutus mittaus-

pisteiden melutasoon, kun taas ympäristömelumittauksista saaduissa tuloksissa on mukana myös alueen taustamelu. Mittauspisteissä numero yksi ja kaksi vallinnut taustamelu vaikutti pisteissä mitattuun melutasoon oleellisesti. Ympäristömelumittausten tuloksia kasvattanut taustamelu muodostui mittauspisteissä numero yksi ja kaksi pääosin läheisten teiden äänistä, linnunlaulusta, hyönteisten äänistä ja tuulenpuuskien aiheuttamasta puiden havinasta. Mittauspisteessä numero kolme ei taustamelulla ollut yhtä suurta vaikutusta mittaustuloksiin sen laitosta lähellä olevan sijainnin vuoksi.

Taulukosta (14) voidaan nähdä mittauspisteistä mitattujen tulosten sekä mittauspisteille mallinnettujen tulosten yhdenmukaisuuden vertailu epävarmuudet huomioiden. Mittauspisteiden numero yksi ja kaksi suuret erot mallinnettujen ja mitattujen tulosten välillä selittyvät suurella mittausetäisyydellä. Taulukosta voidaan nähdä myös, että mittauspisteen numero kolme mitatut- ja mallinnetut tulokset ovat epävarmuus huomioiden yhteneviä. Taulukosta (14) on kuitenkin nähtävissä, että myös mittauspisteessä numero kolme mallinnetut tulokset ovat alhaisempia, kuin mitatut tulokset. Tämä johtuu luultavasti osaksi ympäristömelumittauksien taustamelusta, joka sisälsi myös laitoksen toimintaan liittymättömiä ääniä. Myös äänitehotasojen määrittämisessä oli mahdollinen epävarmuustaso ± 2 dB, joka saattaa vaikuttaa käytettyjen laskentamallien lisäksi mallinnustulokseen, sillä mallinnuksessa käytettiin äänitehotasojen määrittämisestä saatuja arvoja.

TAULUKKO 14. Mittaus- ja mallinnustulosten vertailu epävarmuudet huomioiden

	Ympäristömelumittauksen tulos	Ympäristömelumittauksen epävarmuus	Mallinnustulos	Mallinnuksen epävarmuus	Mittaus- ja mallinnustulos ovat päällekkäisiä epävarmuus huomioiden
P.1 päivä	47 dBA	± 7 dBA	32 dBA	± 5 dBA	ei
P.1 yö	42 dBA	± 7 dBA	32 dBA	± 5 dBA	kyllä
P.2 päivä	43 dBA	± 8 dBA	27 dBA	± 5 dBA	ei
P.2 yö	37 dBA	± 8 dBA	22 dBA	± 5 dBA	ei
P.3 päivä	50 dBA	± 3 dBA	47 dBA	± 3 dBA	kyllä
P.3 yö	51 dBA	± 3 dBA	46 dBA	± 3 dBA	kyllä

9 YHTEENVETO

Tästä opinnäytetyöstä muodostui suhteellisen laaja kokonaisuus, joka johtuu meluselvi-tyksen monivaiheisuudesta. Tämän opinnäytetyön aikana suoritettiin ääneen ja meluun liittyvän teorian tutkimusta, ympäristömelumittauksia päivä- ja yöaikana ja hyötyvoima-laitoksen äänilähteiden äänitehotasojen määrittämiä. Tämän lisäksi laadittiin melumal-linnusohjelmistolla melunleviämismalli. Alla on listattu yhteenveto tämän opinnäyte-työn työprosessista ja siihen liittyvistä tärkeimmistä yksittäisistä osioista.

Teoriatiedon selvittämisen tavoitteena oli muodostaa käsitys äänen etenemiseen vaikut-tavista tekijöistä sekä ääneen ja meluun liittyvästä termistöstä. Teoriatiedon selvittämi-sellä luotiin pohja tässä opinnäytetyössä tehdylle tutkimustyölle, joka vaati tekijältään ymmärryksen ympäristömelun perusteista. Teoriatietoa löytyi useista eri lähteistä suo-men- ja englanninkielisenä.

Melumallinnuksen tekemisessä tärkeää oli ymmärtää käytettävän laskentamallin äänen etenemisen laskemisessa huomioon ottamat seikat. Lähtötietojen lataaminen vapaasti käytössä olevista tietokannoista ja ladattujen lähtötietojen muokkaaminen oli tärkeä osa mallinnustyötä. Lähtötietojen muokkaaminen tarkoitti esimerkiksi koordinaatistomuun-nosten suorittamista ladatulle datalle. Melumallinnukseen käytetyn ohjelmiston toimin-tojen opettelu oli myös isossa osassa mallinnustyötä.

Opinnäytetyötä varten suoritettiin ympäristömelumittauksia päivä- ja yöaikana sekä äänilähteiden äänitehotasojen mittauksia. Ympäristömelumittauksissa erityisen tärkeää oli tutustua ympäristöministeriön ohjeeseen ympäristömelun mittaamisesta (1/1995), jossa on listattu ympäristömelumittauksen suorittamiseen liittyviä ohjeita. Ohjeessa on listattu muun muassa ympäristömelumittauksen sääolosuhdevaatimukset ja mittauksen epävarmuustason laskeminen.

Äänitehotasojen määrittämisessä sovellettiin Nordtestin NT ACOU 080-standardin mu-kaisia ”box-” ja ”sphere-” menetelmiä. Nordtestin standardi soveltui hyötyvoimalaitok-sen äänilähteiden äänitehotasojen määrittämiseen hyvin, sillä kaikille äänilähteille paitsi äänilähteelle numero yksi oli mahdollista soveltaa ”sphere” menetelmää. Sphere-menetelmää tulee soveltaa, mikäli se on olosuhteiden puolesta mahdollista, sillä se antaa

tiedon myös äänen suuntaavuudesta. Äänitehotasojen määrittämisessä tärkeää oli opetella edellä mainitun standardin soveltaminen sekä siinä käytettävät laskukaavat. Kaikissa mittauksissa käytettiin Norsonicin 118 äänipainetasomittaria, joten mittarin toimintojen opettelu oli ensisijaisen tärkeää.

Tulosten tulkinnassa otettiin huomioon tutkimukseen liittyvät epävarmuustekijät. Epävarmuustekijöiden tunnistaminen ja niiden suuruuden laskeminen olikin merkittävä osa työtä. Epävarmuuksien suuruudet laskettiin ympäristömelumittauksille ympäristöministeriön mittausohjeen mukaisesti. Mallinnustuloksille määriteltiin epävarmuudet käytettyjen laskentamallien mukaisesti. Tulosten tulkinnassa tärkein osuus oli tulosten ja epävarmuuksien vertailu ympäristöluvassa määriteltyihin melutason raja-arvoihin. Tämä tehtiin ympäristöministeriön mittausohjeen mukaisesti. Mallinnuksessa käytettyjen laskentamallien ja melun teorian tiedon ymmärtämisen tärkeys korostui tulosten tulkinnassa. Melumallinnuksella laskettujen tulosten tulkinnassa on otettava huomioon, että ne on laskettu melun leviämisen kannalta suotuisissa olosuhteissa ja esimerkiksi tuulen suunta on aina melun etenemissuuntaan myötäinen. Todellisuudessa tämä ei olisi mahdollista, jolloin osa melumallinnuksessa lasketuista melualueista saattaisi olla pienempiä. Melun teorian tiedon pohjalta voidaan todeta, että sääolosuhteiden merkitys äänen etenemiseen korostuu etäisyyden kasvaessa, joka nostaa tulosten epävarmuutta suurella etäisyydellä entisestään.

LÄHTEET

Aluehallinto virasto. 2013. Ympäristölupapäätös. Nro:23/2013/1.

Björk, E. 1997. Meluntorjunta. Kolmas painos. Kuopio: Kuopion yliopiston painatuskeskus.

Blomberg, E & Lepoluoto, A. 2005. Audiokirja. Audiotekniikan perusteita. [Verkkojulkaisu]. Helsinki: Esa Bomberg & Ari Lepolouto.

Eargle, J. 2012. Electroacoustical Reference Data. Attenuation with distance from plane and line sources in a free field. Yhdysvallat: Springer Science + Business Media New York.

Eurasto, R. 2009. Meluselvityksen tarkkuuden parantaminen. Helsinki: Ympäristöministeriö.

Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 19.11.2008/98§4.

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

Fahy, F & Walker, J. 1998. Fundamentals of Noise and Vibration. An introduction to acoustics. Iso-Britannia: E & FN Spon.

Foreman, J. 2012. Sound Analysis and Noise Control. Yhdysvallat: Van Nostrand Reinhold.

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

Gracey & Associates. 2016. Acoustic Glossary. [Verkkojulkaisu]. Luettu 10.04.2016. <http://www.acoustic-glossary.co.uk/frequency-weighting.htm>

Hepworth, P. 2006. Accuracy implications of computerized noise predictions for environmental noise mapping. Iso-Britannia: Internoise.

Hietanen, V. 2011. Ympäristömittauksia säätelevä lainsäädäntö ja ympäristölupakäytäntö. Ympäristötekniikan koulutusohjelma. Lappeenrannan yliopisto. [Kandidaatintyö].

Indiana University. 2003. What is frequency?. [Verkkojulkaisu]. Luettu 15.04.2016. <http://www.indiana.edu/~emusic/acoustics/frequency.htm>

ISO 9613-2:1996. Acoustics-Attenuation of sound during propagation outdoors. General method of calculation.

Karttunen, H. 2016. Troposfääri. [Verkkojulkaisu]. Tähtitieteellinen yhdistys Ursa. Luettu 18.04.2016. <http://www.astro.utu.fi/zubi/atmosph/tropo.htm>

Knight, R. 2008. Physics for Scientists and Engineers. A Strategic Approach. Toinen painos. Yhdysvallat: Pearson Addison-Wesley.

- Korpinen, P. Tampereen ammattikorkeakoulu. 2005. Äänen taajuus. [Verkkójulkaisu]. Luettu 09.05.2016. http://www.aanipaa.tamk.fi/taajuus_1.htm
- Kragh, J., Andersen, B & Jakobsen, J. 1982. Environmental noise from industrial plants. General prediction method. Danish Acoustical Laboratory. Raportti 32. Tanska: The Danish Academy of Technical Sciences.
- Liikonen, L. 2013. Johdatus ympäristömeluun. Meluntorjunnan perusteet, meluselvitykset ja niiden teettäminen, sekä laatu. [Asiantuntijaesitelmä]. Alueidenkäytön koulutuspäivä 4.12.2016.
- Maanmittauslaitos. 2016. Korkeusmalli 2m. [Verkkójulkaisu]. Luettu 06.06.2016. <http://www.maanmittauslaitos.fi/digituotteet/korkeusmalli-2-m>
- Maanmittauslaitos. 2016. Laserkeilausaineisto. [Verkkójulkaisu]. Luettu 06.06.2016. <http://www.maanmittauslaitos.fi/digituotteet/laserkeilausaineisto>
- Maanmittauslaitos. 2016. Maastotietokanta. [Verkkójulkaisu]. Luettu 06.06.2016. <http://www.maanmittauslaitos.fi/digituotteet/maastotietokanta>
- Munjal, M. 2013. Noise and Vibration Control. Singapore: World Scientific Publishing Company.
- Mäkinen, E. Fysiikan lehtori. 2015. Industrial Emissions & Monitoring. [Kurssimateriaalinpanot]. 10.01–20.04. Tampereen ammattikorkeakoulu. Tampere.
- Mäkinen, E. Fysiikan lehtori. 2016. Opinnäytetyön Jarin kommenttien perusteella muokattu versio. [Sähköpostiviesti]. Erkki.makinen@tamk.fi. Luettu 12.8.2016.
- Nave, R. 2016. Inverse Square Law, Sound. [Verkkójulkaisu]. Luettu 13.04.2016. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/acoustic/invsqs.html>
- Nordic Council of Ministers. 1996a. Road Traffic Noise. Nordic prediction method. TemaNord 1996:525.
- Norsonic. 2002. Nor118-äänipainetasomittari. [Käyttöohje]. Luettu 18.05.2016.
- NT ACOU 080. Industrial Plants: Noise Emission. 1991. Espoo: Nordtest.
- Ohjeellisia toimintamalleja meludirektiivin 2003/10/EY soveltamista varten. 2009. Euroopan komission ohjeellinen käsikirja terveyttä ja turvallisuutta koskevista vähimmäisvaatimuksista. Luxemburg: Euroopan unionin julkaisu-toimisto.
- Paige, T. 2016. Outdoor Noise Barriers: Design and Applications. [Verkkójulkaisu]. Luettu 11.05.2016. http://www.enoisecontrol.com/wp-content/uploads/2014/12/outdoor_noise_barrier_wall.pdf
- Peltonen, H., Perkkio, J & Vierinen, K. 2000. Insinöörin (AMK) Fysiikka Osa II. Neljäs painos. Jyväskylä: Gummerus.
- Peters, B. 2000. Noise Control. Iso-Britannia: Pira International.

Ramboll Finland Oy. 2016. Tammervoima Oy – Ympäristöluvan edellyttämä ympäristömeluselvitys. [Mittausuunnitelmaraportti]. Tampere

Rossing, T., Moore, R & Wheeler, P. 2002. The Science of Sound. Kolmas painos. Yhdysvallat: Pearson Addison-Wesley.

Selvitys valtioneuvoston periaatepäätöksen ja valtakunnallisen toimintaohjelman toteutumisesta meluntorjunnasta. 2012. Lentomelun seudullisen seurantaryhmän selvitys. Helsinki:Ympäristöministeriö.

Sengpielaudio. 2016. Adding of equal strong non-coherent sound surces. [Verkkajulkaisu]. Luettu 13.04.2016. <http://www.sengpielaudio.com/calculator-levelchange.htm>

Sosiaali- ja terveysministeriön asetus asunnon ja muun oleskelutilan terveydellisistä olosuhteista sekä ulkopuolisten asiantuntijoiden pätevyysvaatimuksista. 23.4.2015/545.

SoundPLAN. 2016. Industrial Noise Indoors/Outdoors. [Verkkajulkaisu]. Luettu 31.05.2016. <http://www.soundplan.eu/english/soundplan-acoustics/soundplan-modules/industrial-noise-indoors-outdoors/>

SoundPLAN. 2016. SoundPLAN Acoustics. [Verkkajulkaisu]. Luettu 31.05.2016. <http://www.soundplan.eu/english/soundplan-acoustics/>

Starck, J & Teräsvirta, L. 2009. Melu. Tampere: Esa Print Oy.

Talbot-Smith, M. 2000. Sound engineer's pocket book. Toinen painos. Iso-Britannia: Reed Educational and Professional Publishing Ltd.

Tammervoima Oy. 2014. Tarastenjärven hyötyvoimalaitoksen tarkkailusuunnitelma. Tampere: Tammervoima Oy.

Tammervoima Oy. 2016. Ei heitetä energiaa hukkaan. [Verkkajulkaisu]. Luettu 17.05.2016. <http://www.tammervoima.fi/sijainti/hyoetyenergia-2.html>

Tammervoima Oy. 2016. Energiaa roskapusseista. [Verkkajulkaisu]. Pdf-tiedosto. Luettu 17.05.2016. http://www.tammervoima.fi/uploads/pdf/Tammervoima_esite_netti.pdf

Terveyden ja hyvinvoinnin laitos. 2014. Melu. [Verkkajulkaisu]. Päivitetty 29.12.2014. Luettu 15.08.2016. <https://www.thl.fi/fi/web/ymparistoterveys/melu>

Tiihinen, J & Hänninen, O. 1997. Meluntorjunnan perusteet. Kuopio: Oy Edita Ab.

U.S Department of Transportation. 2011. Acoustical Considerations. Noise Barrier Basics. [Verkkajulkaisu]. Luettu 11.05.2016. https://www.fhwa.dot.gov/environment/noise/noise_barriers/design_construction/design/design03.cfm

Valtioneuvoston asetus ympäristönsuojelusta. 4.9.2014/713.

Valtioneuvoston periaatepäätöksen ja valtakunnallisen toimintaohjelman toteutumista meluntorjunnassa selvittäneen työryhmän raportti. 2013. Ympäristöministeriö raportti. Ympäristöministeriö:Helsinki.

Valtioneuvoston periaatepäätös meluntorjunnasta. 2007.

Valtioneuvoston päätös melutason ohjearvoista. 29.10.1992/993.

Wang, L., Pereira, N & Hung, Y-T. 2005. Advanced Air and Noise Pollution Control. Yhdysvallat: Humann Press Inc.


Ympäristönsuojelulaki. 27.6.2014/527.


Ympäristöministeriö. 1995. Ympäristömelun mittaaminen. Helsinki: Painatuskeskus Oy.

Ympäristöministeriö. 2016. Ympäristönsuojelulain uudistaminen. [Verkkójulkaisu]. Julkaistu 22.03.2016. Päivitetty 24.05.2016. Luettu 10.06.2016. http://www.ymp.fi/fi-fi/ymparisto/lainsaadanto_ja_ohjeet/ymparistonsuojelun_valmisteilla_oleva_lainsaadanto/Ymparistonsuojelulain_uudistaminen



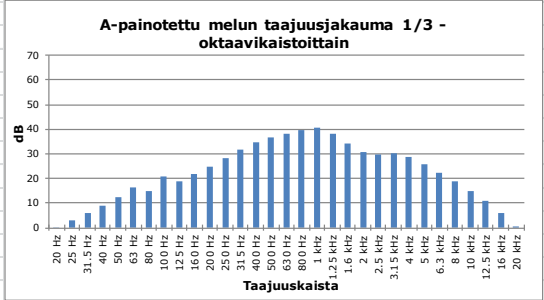
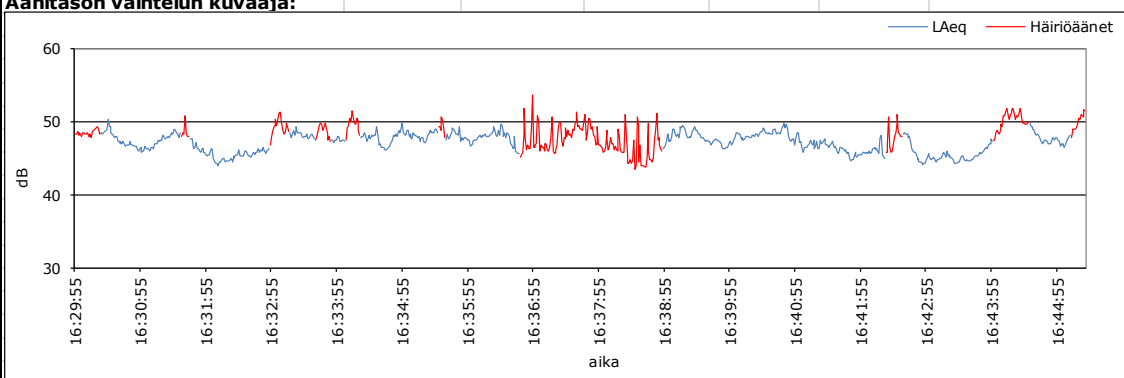
LIIKTEET

Liite 1. Tammervoima Oy:n äänilähteiden äänitehotasot



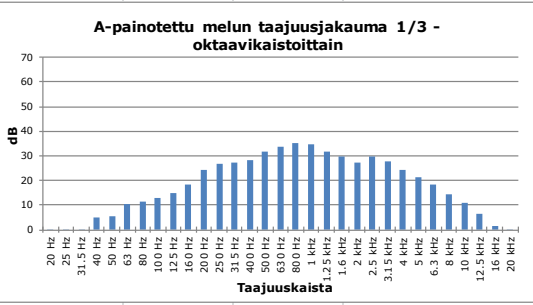
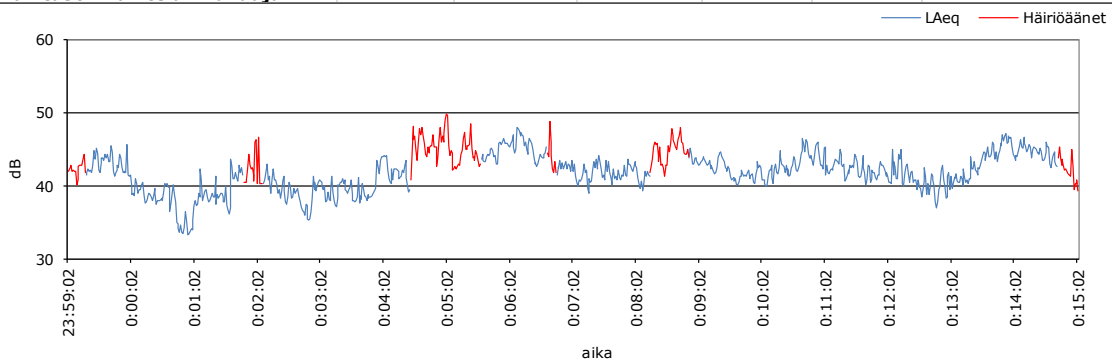
												
ÄÄNILÄHTEIDEN MELUPÄÄSTÖN MÄÄRITYS Asiakas: Tammervoima Oy Päivämäärä: 10.5.2016 Mittaaja: Oskari Mäkelä, Timo Korkee Laitteisto: Norsonic 118 äänenpainetasomittari (1-tarkkuusluokka), Norsonic 1251 kalibraattori (114 dB) Kalibrointi: ennen: 113,9 dB jälkeen: 113,9 dB												
Äänilähde	Äänitehotaso oktaavikaistoittain, $L_{w(A)}$									Oktaavikaistojen yhteenlaskettu äänitaso, $L_{w(A)}$	Mittausmenetelmä	Kapeakaistaisuus/ Impulssimaisuus
	31.5 Hz	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz			
L1	72	87	93	97	99	101	99	93	85	106	NT ACOU 080-box	-
L2	58	85	102	110	113	112	108	103	93	117	NT ACOU 080-sphere	-
L3	61	72	79	86	87	87	85	77	69	93	NT ACOU 080-sphere	-
L4	45	63	75	87	85	82	73	60	40	90	NT ACOU 080-sphere	-
L6	52	65	71	72	71	68	77	65	58	80	NT ACOU 080-sphere	Kapeakaistainen
L8	58	68	74	78	77	74	71	61	49	83	NT ACOU 080-sphere	-
L9	48	58	65	66	63	52	43	32	31	70	NT ACOU 080-sphere	-
L10	48	68	71	76	87	78	71	58	41	88	NT ACOU 080-sphere	Kapeakaistainen





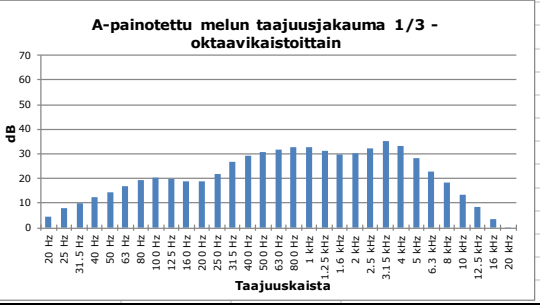
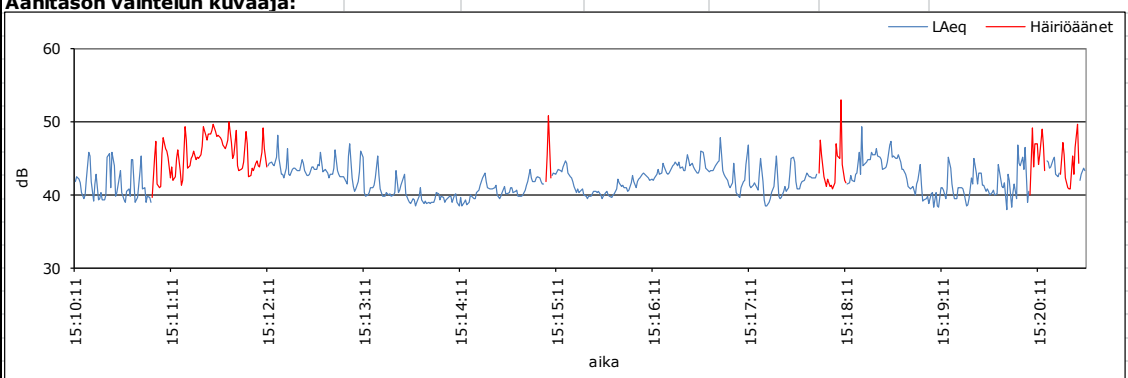
Liite 2. P.1 päiväajan ympäristömelumittauspöytäkirja

RAMBOLL		Tammervoima Oy Tammervoiman meluselitys Melumittauspöytäkirja		LIITE 2 1.8.2016 OSKARI MÄKELÄ																		
Ajankohta:	15.6.2016 klo 16:30 - 16:46	Mittaja:	Oskari Mäkelä																			
Mitattava kohde:	Nurmen kylän suunnan lähimmän asuintalon tontin rajalla	Laiteisto:	Norsonic 118 äänenpainetasomittari, tuulisuoja, jalusta																			
Mittauspaikka:	P.1 Lintukalliontie, asuintalo 60	Kalibrointi:	ennen: 113,9 dB/jälkeen: 113,9 dB/Norsonic 1251 kalibraattori (114 dB)																			
Etäisyys kohteeseen:	900 m	Menettely:	Aikavakio F, S ja I, taajuuspainotus A, terassispektri tallennusväli 1s, mikrofonin korkeus maasta 1,5 m																			
Valokuva mittauspaikalta:		Mittauspiste kartalla:																				
																						
Mittausympäristö ja havaitut melulähteet: Mittauspiste sijaitsi Nurmen kylän suunnan hyötyvoimalaitosta lähimmän asuinrakennuksen tontin rajalla. Linnunlaulua ja tuulenpuuskia ajoittain. Läheisen tien äänet kuuluvat selkeästi. Liikenne vähäistä. Hyötyvoimalaitos tai jätteenkäsittelykeskus eivät kuulu mittauspisteessä.		Impulssimaisuus ja kapeakaistaisuus: <input type="checkbox"/> Impulssimaista <input type="checkbox"/> Kapeakaistaista																				
Säätä:		<input checked="" type="checkbox"/> Mittausohjeen mukaiset sääolot																				
		<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="3">Ilma</th> <th colspan="2">Tuuli</th> <th rowspan="2">Piivisyys</th> </tr> <tr> <th>Lämpötila [°C]</th> <th>Ilmanpaine [hPa]</th> <th>Ilmankosteus [%]</th> <th>Suunta [°]</th> <th>Nopeus [m/s]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>24</td> <td>1006</td> <td>33</td> <td>-</td> <td>0</td> <td>48</td> </tr> </tbody> </table>		Ilma			Tuuli		Piivisyys	Lämpötila [°C]	Ilmanpaine [hPa]	Ilmankosteus [%]	Suunta [°]	Nopeus [m/s]	24	1006	33	-	0	48		
Ilma			Tuuli		Piivisyys																	
Lämpötila [°C]	Ilmanpaine [hPa]	Ilmankosteus [%]	Suunta [°]	Nopeus [m/s]																		
24	1006	33	-	0	48																	
Mittaustulokset:		A-painotettu melun taajuusjakauma 1/3 - oktaavikaistoittain																				
Koko mittausjakson L_{Aeq} (sisältää kaiken mittausjakson äänen): 48 dB																						
Mittausjakson L_{Aeq} kun häiriöäänät poistettu 47 dB																						
Mittauksen epävarmuustaso \pm dB 7 dB																						
Äänitason vaihtelun kuvaaja:																						
																						



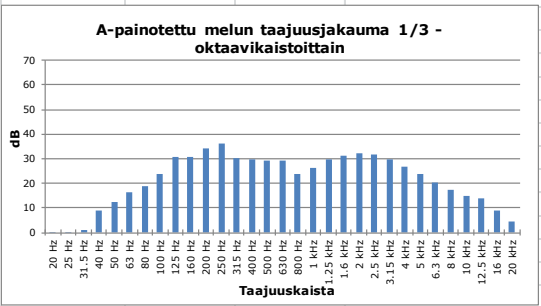
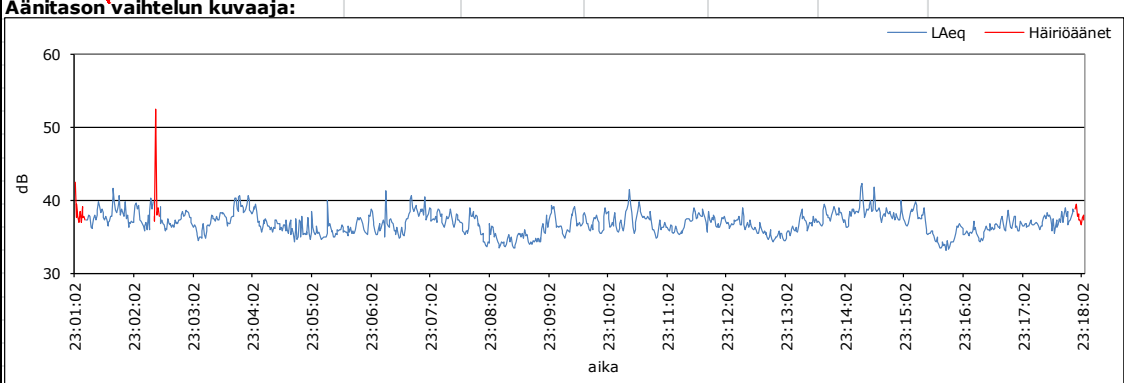
Liite 3. P.1 yöajan ympäristömelumittauspöytäkirja

RAMBOLL		Tammervoima Oy Tammervoiman meluselvitys Melumittauspöytäkirja		LIITE 3 1.8.2016 OSKARI MÄKELÄ	
Ajankohta:	30.6.2016 - 17.2016 klo 23:59 - 00:15	Mittaja:	Oskari Mäkelä		
Mitattava kohde:	Nurmen kylän suunnan lähimmän asuintalon tontin rajalla	Laiteisto:	Norsonic 118 äänenpainetasomittari, tuulisuojaa, jalusta		
Mittauspaikka:	P.1 Lintukalliontie, asuintalo 60	Kalibrointi:	ennen: 113,9 dB/jälkeen: 113,9 dB/Norsonic 1251 kalibraattori (114 dB)		
Etäisyys kohteeseen:	900 m	Menettely:	Aikavakio F, S ja I, taajuuspainotus A, terssi-spektri tallennusväli 1s, mikrofonin korkeus maasta 1,5 m		
Valokuva mittauspaikalta:		Mittauspiste kartalla:			
					
Mittausympäristö ja havaitut melulähteet:		Impulssimaisuus ja kapeakaistaisuus:			
Mittauspiste sijaitsi Nurmen kylän suunnan hyötyvoimalaitosta lähimmän asuinrakennuksen tontin rajalla. Linnunlaulua ja liikenteen ääniä kuuluu jatkuvasti. Läheisen tien äänet kuuluvat selkeästi. Hyötyvoimalaitos tai jätteenkäsittelykeskus eivät kuulu mittauspisteessä.		<input type="checkbox"/> Impulssimaista <input type="checkbox"/> Kapeakaistaista			
Säättilä:		<input checked="" type="checkbox"/> Mittausohjeen mukaiset sääolot			
		Ilma		Tuuli	
	Lämpötila	Ilmanpaine	Ilmankosteus	Suunta	Nopeus
	[°C]	[hPa]	[%]	[°]	[m/s]
	16	1012	85	-	0
				Pilvisuus	
				78	
Mittau tulokset:		A-painotettu melun taajuusjakauma 1/3 - oktaavikaistoittain			
Koko mittausjakson L_{Aeq} (sisältää kaiken mittausjakson äänen):					
43 dB					
Mittausjakson L_{Aeq} kun häiriöäänät poistettu					
42 dB					
Mittauksen epävarmuustaso ± dB					
7 dB					
Äänitason vaihtelun kuvaaja:					
					



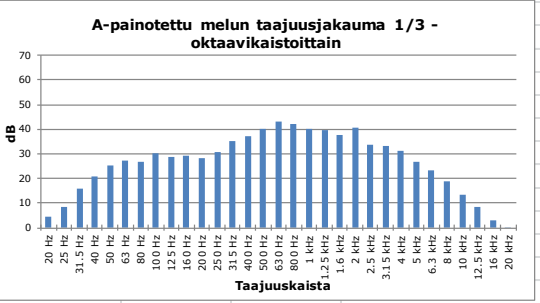
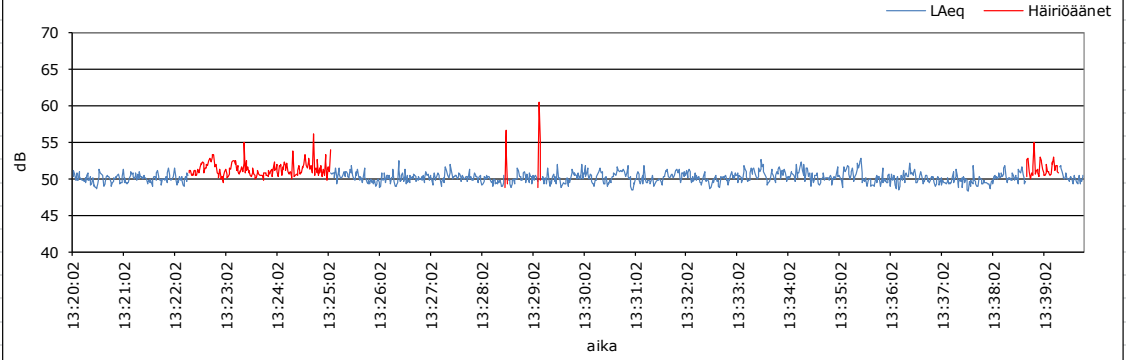
Liite 4. P.2 päiväajan ympäristömelumittauspöytäkirja

RAMBOLL		Tammervoima Oy Tammervoiman meluselitys Melumittauspöytäkirja		LIITE 4 1.8.2016 OSKARI MÄKELÄ	
Ajankohta:	15.6.2016 klo 15:10 - 15:31	Mittaja:	Oskari Mäkelä		
Mitattava kohde:	Palon kylän suunnan lähimmän asuintalon tontin rajalla.	Laiteisto:	Norsonic 118 äänenpainetasomittari, tuulisuoja, jalusta		
Mittauspaikka:	P.2 Kantapartolantie, Asuintalo numero 136	Kalibrointi:	ennen: 113,9 dB/jälkeen: 113,8 dB/Norsonic 1251 kalibraattori (14 dB)		
Etäisyys kohteeseen:	1000 m	Menettely:	Aikavakio F, S ja I, taajuuspainotus A, terssi-spektri tallennusväli 1s, mikrofonin korkeus maasta 1,5 m		
Valokuva mittauspaikalta:		Mittauspiste kartalla:			
					
Mittausympäristö ja havaitut melulähteet: Mittauspiste sijaitsi laitokselta tarkasteltuna Palon kylän suunnassa lähimmän asuinrakennuksen tontin rajalla. Linnunlaulua jatkuvasti. Läheisen tien äänet kuuluivat ajoittain, mutta vain juuri ja juuri. Läheisen asuinrakennuksen asukas tuli juttelemaan mittauksen aikana, josta johtuvat häiriöäänet on poistettu mittausdatasta. Hyötyvoimalaitos tai jätteenkäsittelykeskus eivät kuulu mittauspisteessä.		Impulssimaisuus ja kapeakaistaisuus: <input type="checkbox"/> Impulssimaista <input type="checkbox"/> Kapeakaistaista			
Säättilä:					
		Ilma		Tuuli	
Lämpötila	Ilmanpaine	Ilmankosteus	Suunta	Nopeus	Pilvisuus
[°C]	[hPa]	[%]	[°]	[m/s]	
23	1006	36	-	0	3
<input checked="" type="checkbox"/> Mittausohjeen mukaiset sääolot					
Mittaustulokset:					
Koko mittausjakson L_{Aeq} (sisältää kaiken mittausjakson äänen):					
49 dB					
Mittausjakson L_{Aeq} kun häiriöäänet poistettu					
43 dB					
Mittauksen epävarmuustaso \pm dB					
8 dB					
A-painotettu melun taajuusjakauma 1/3 -oktaavikaistoittain					
					
Äänitason vaihtelun kuvaaja:					
					



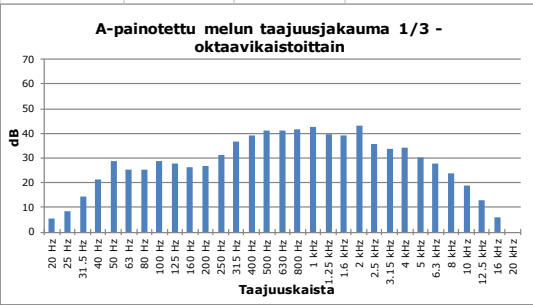
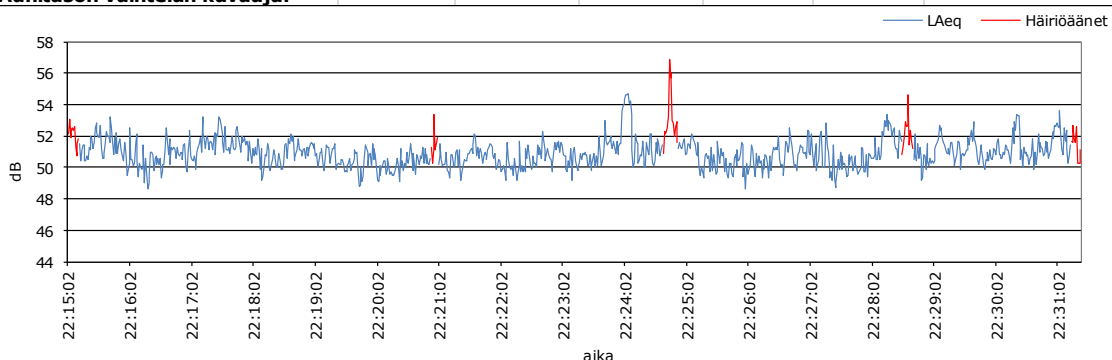
Liite 5. P.2 yöajan ympäristömelumittauspöytäkirja

RAMBOLL		Tammervoima Oy Tammervoiman meluselitys Melumittauspöytäkirja		LIITE 5 1.8.2016 OSKARI MÄKELÄ	
Ajankohta:	30.6.2016 klo 23:01 - 23:18	Mittaja:	Oskari Mäkelä		
Mitattava kohde:	Palon kylän suunnan lähimmän asuintalon tontin rajalta	Laiteisto:	Norsonic 118 äänenpainetasomittari, tuulisuoja, jalusta		
Mittauspaikka:	P.2 Kantapartolantie, Asuintalo numero 136	Kalibrointi:	ennen: 113,9 dB/jälkeen: 113,8 dB/Norsonic 1251 kalibraattori (114 dB)		
Etäisyys kohteeseen:	1000 m	Menettely:	Aikavakio F, S ja I, taajuuspainotus A, terssi-spektri tallennusväli 1s, mikrofonin korkeus maasta 1,5 m		
Valokuva mittauspaikalta:		Mittauspiste kartalla:			
					
Mittausympäristö ja havaitut melulähteet: Mittauspiste sijaitsi laitokselta tarkasteltuna Palon kylän suunnassa lähimmän asuinrakennuksen tontin rajalla. Linnunlaulua ajoittain. Läheisen tien äänet kuuluvat ajoittain, mutta vain juuri ja juuri. Läheisen tien aiheuttamat häiriöäänet koostuvat ajoneuvojen nopeista kiihdytyksistä. Hyötyvoimalaitos kuuluu mittauspisteessä juuri ja juuri tasaisena huminana. Häiriöäänet on poistettu mittausdatasta		Impulssimaisuus ja kapeakaistaisuus: <input type="checkbox"/> Impulssimaisista <input type="checkbox"/> Kapeakaistaista			
Säätötila:		<input checked="" type="checkbox"/> Mittausohjeen mukaiset sääolot			
		Ilma		Tuuli	
	Lämpötila	Ilmanpaine	Ilmankosteus	Suunta	Nopeus
	[°C]	[hPa]	[%]	[°]	[m/s]
	16	1012	80	353	3
				Pilvisuus	
					6/8
Mittaus tulokset:					
Koko mittausjakson L_{Aeq} (sisältää kaiken mittausjakson äänen):					
37 dB					
Mittausjakson L_{Aeq} , kun häiriöäänet poistettu					
37 dB					
Mittauksen epävarmuustaso \pm dB					
8 dB					
Äänitason vaihtelun kuvaaja:					
					

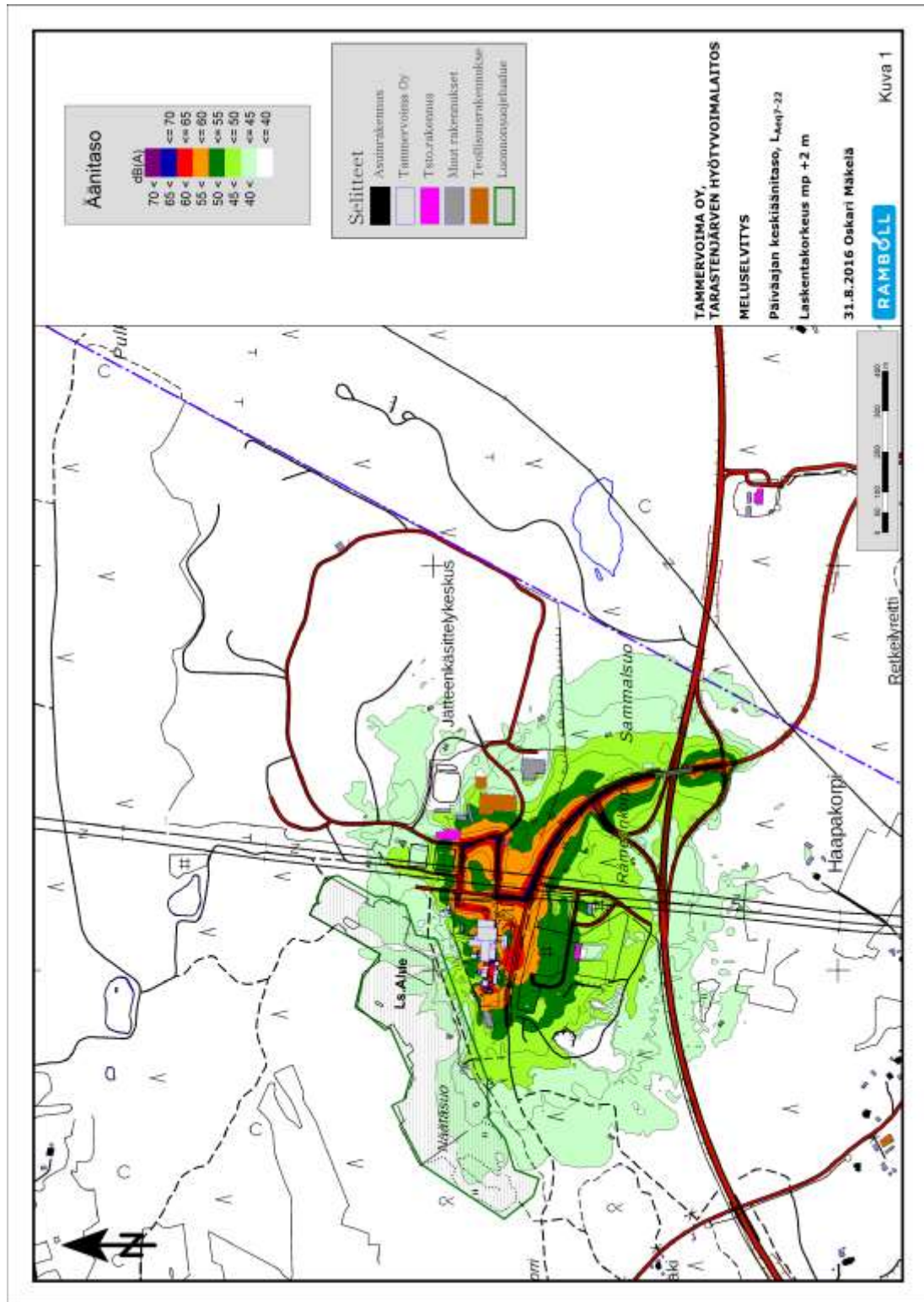
Liite 6. P.3 päiväajan ympäristömelumittauspöytäkirja

RAMBOLL		Tammervoima Oy Tammervoiman meluselvitys Melumittauspöytäkirja		LIITE 6 1.8.2016 OSKARI MÄKELÄ	
Ajankohta:	15.6.2016 klo 13:20 - 13:40	Mittaja:	Oskari Mäkelä		
Mittattava kohde:	Laitoksen pohjoispuolella sijaitseva luonnonsuojelualue	Laiteisto:	Norsonic 118 äänenpainetasomittari, tuulisuoja, jalusta		
Mittauspaikka:	P.3 Luonnonsuojelualueen reuna (Näätäsuu)	Kalibrointi:	ennen: 113,9 dB/jälkeen: 113,9 dB/Norsonic 1251 kalibraattori (114 dB)		
Etäisyys kohteeseen:	100 m	Menettely:	Aikavakio F, S ja I, taajuuspainotus A, terassispektri tallennusväli 1s, mikrofonin korkeus maasta 1,5 m		
Valokuva mittauspaikalta:		Mittauspiste kartalla:			
					
Mittausympäristö ja havaitut melulähteet: Mittauspiste sijaitsi Näätäsuon luonnonsuojelualueen rajalla. Selkeimmin mittauspisteessä kuuluu lentotuhkan kuljetushissin (=L6) kitisevä ääni ja tasainen humiseva teollisuusmelu. Linnunlaulu vähäistä, mutta aiheutti ajoittain häiriöääniä. Kaikki häiriöäänit poistettu mittausdatasta.		Impulssimaisuus ja kapeakaistaisuus: <input type="checkbox"/> Impulssimaista <input type="checkbox"/> Kapeakaistaista			
Säätötila:		Ilma		Tuuli	
	Lämpötila [°C]	Ilmanpaine [hPa]	Ilmankosteus [%]	Suunta [°]	Nopeus [m/s]
	24	1006	39	340	0-1
					Pilvisuus
					2
		<input checked="" type="checkbox"/> Mittausohjeen mukaiset sääolot			
Mittaustulokset:					
Koko mittausjakson L_{Aeq} (sisältää kaiken mittausjakson äänen):					
50 dB					
Mittausjakson L_{Aeq} , kun häiriöäänit poistettu					
50 dB					
Mittauksen epävarmuustaso \pm dB					
3 dB					
					
Äänitason vaihtelun kuvaaja:					
					

Liite 7. P.3 yöajan ympäristömelumittauspöytäkirja

RAMBOLL		Tammervoima Oy Tammervoiman meluselvitys Melumittauspöytäkirja		LIITE 7 1.8.2016 OSKARI MÄKELÄ	
Ajankohta:	30.6.2016 klo 22:15 - 22:31	Mittaja:	Oskari Mäkelä		
Mitattava kohde:	Laitoksen pohjoispuolella sijaitseva luonnonsuojelualue	Laitteisto:	Norsonic 118 äänenpainetasomittari, tuulisuoja, jalusta		
Mittauspaikka:	P.3 Luonnonsuojelualueen reuna (Näätäsuo)	Kalibrointi:	ennen: 113,9 dB/jälkeen: 113,9 dB/Norsonic 1251 kalibraattori (114 dB)		
Etäisyys kohteeseen:	100 m	Menettely:	Aikavakio F, S ja I, taajuuspainotus A, terssispektri tallennusväli 1s, mikrofonin korkeus maasta 1,5 m		
Valokuva mittauspaikalta:		Mittauspiste kartalla:			
					
Mittausympäristö ja havaitut melulähteet: Mittauspiste sijaitsi Näätäsuon luonnonsuojelualueen rajalla. Selkeimmin mittauspisteessä kuuluu lentotuhkan kuljetushissin (=L6) kitisevä ääni ja tasainen humiseva teollisuusmelu. Tien ääni kuului mittauksen aikana muutaman kerran, josta muodostuivat merkittävimmät häiriöäänät. Kaikki häiriöäänät poistettu mittausdatasta.		Impulssimaisuus ja kapeakaistaisuus: <input type="checkbox"/> Impulssimaista <input type="checkbox"/> Kapeakaistaista			
Säätila:		<input checked="" type="checkbox"/> Mittausohjeen mukaiset sääolot			
		Ilma		Tuuli	
	Lämpötila	Ilmanpaine	Ilmankosteus	Suunta	Nopeus
	[°C]	[hPa]	[%]	[°]	[m/s]
	17	1012	76	7	3
				Pilvisuus	
					68
Mittaustulokset:		A-painotettu melun taajuusjakauma 1/3 - oktaavikaistoittain			
Koko mittausjakson L_{Aeq} (sisältää kaiken mittausjakson äänen): 51 dB					
Mittausjakson L_{Aeq} , kun häiriöäänät poistettu 51 dB					
Mittauksen epävarmuustaso ± dB 3 dB					
Äänitason vaihtelun kuvaaja:					
					

Liite 8. Tammervoima Oy:n päiväajan melunleviämismalli



Liite 9. Tammervoima Oy:n yöajan melunleviämismalli

