RAPORTTI

16ERE0080.20.Q070.002
10.1.2012

FORTUM POWER AND HEAT OY

Kalajoen tuulivoimahankkeen melulaskenta

PÖYRY
Engineering balanced sustainability™

Yhteystiedot

Pöyry Finland Oy Energia
Carlo Di Napoli
PL 2 (Tekniikantie 4 D)
02151 Espoo
Kotipaikka Espoo
Y-tunnus 0625905-6
Puh. 010 3311
Faksi 010 33 24981
www.poyry.fi

Kaikki oikeudet pidätetään Tätä asiakirjaa tai osaa siitä ei saa kopioida tai jäljentää missään muodossa ilman Pöyry Finland Oy:n antamaa kirjallista lupaa.

Copyright © Pöyry Finland Oy

Pöyry Finland Oy
PL 2 (Tekniikantie 4 D)
02151 Espoo
Kotipaikka Espoo
Y-tunnus 0625905-6
Puh. 010 3311
Faksi 010 33 24981
www.poyry.fi

Raportti

Fortum Power and Heat Oy

Päiväys 10.1.2012

Viite 16ERE0080.20.Q070.002

Yhteyshlö Carlo Di Napoli
Tehokkuus- ja mittauspalvelut
Puh. 010 33 24587
Faksi 010 33 24239
carlo.dinapoli@poyry.com

KALAJOEN TUULIVOIMAHANKKEEN MELULASKELMAT

Sisältö

1 YLEISTÄ
2 TUULIVOIMALAITOSTEN MELU
3 LASKENNAN LÄHTÖTIEDOT
3.1 Digitaalikartta-aineisto
3.2 Mallinnetut turbiinityypit
3.3 Melumallinnus ja laskentaparametrit
3.4 Lyhyt tuulisuusanalyysi
3.5 Sovellettavat vertailuohjearvot
4 LASKENTATULOKSET
4.1 VE1
4.2 VE2
4.3 VE3
4.4 Meluoptimointi
4.5 Pientaajuinen melu
5 LASKENNAN EPÄVARMUUS
6 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET
Kirjallisuusviitteet

Liitteet

Liite 1 Digitaalikartta-alue ja reseptoripisteet
Liite 2 Reseptoripistetulokset
Liite 3 Melumallinnuskartat
Liite 4 Pientaajuisen melun laskentatulokset
Liite 5 Kalajoen alueen tuulisuustietoja, Suomen tuuliatlas
Liite 6 Ääniaallon mittayksiköt ja ympäristömelu

Lyhenteet

L_{Aeq} A-taajuuspainotettu ekvivalenttinen äänitaso
L_{WA} A-taajuuspainotettu äänilähteen äänitehotaso
L_{AFmax} A-taajuuspainotettu äänenpaineen maksimitaso mittauksen aikana F-aikapainotuksella
L_{AFmin} A-taajuuspainotettu äänenpaineen minimitaso mittauksen aikana F-aikapainotuksella
K_I Impulssimaisen äänen haitallisuuskorjaus L_{Aeq} –tasoon ohjeen NT ACOU 112 mukaan

1 YLEISTÄ

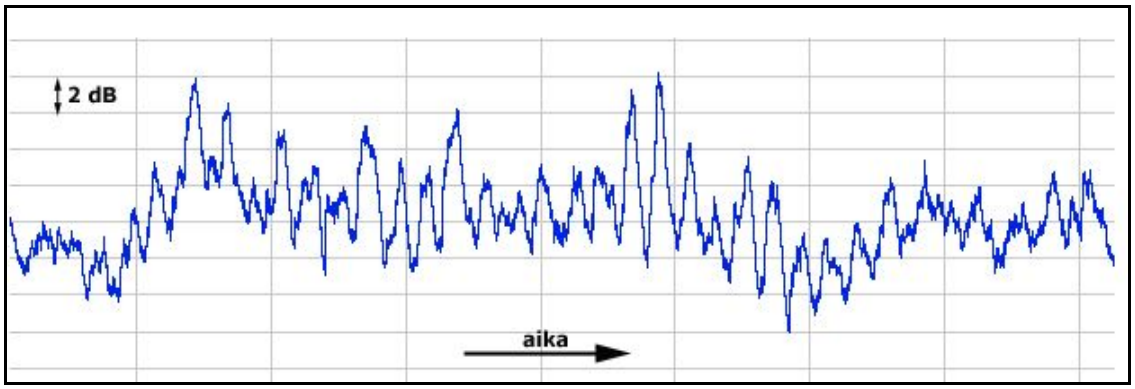
Fortum Power and Heat Oy suunnittelee tuulivoimapuistoa Kalajoen Pohjankylän ja Vasankarin väliselle alueelle.

Tässä raportissa käsitellään kahden hankevaihtoehdon melun laskennallista leviämistä alueen ympäristöön. Vertailuarvoina käytetään ympäristöministeriön tuulivoima suunnittelun oppaan ohjearvoja SY 19-2011./1/

2 TUULIVOIMALAITOSTEN MELU

Tuulivoimalaitosten käyntiääni koostuu laajakaistaisesta (noin 100 - 2000 Hz) lapojen aerodynaamisesta melusta ja sitä hieman kapeakaistaisemmista sähköntuotanto-koneiston yksittäisten osien meluista (mm. vaihteisto, generaattori sekä jäähdytys-järjestelmät). Aerodynaaminen melu on hallitsevin lapojen suuren vaikutuspinta-alan ja jaksollisen ns. amplitudimoduloituneen äänen vuoksi. Äänen voimakkuus vaihtelee ajallisesti lapojen pyörimistaajuuden mukaan (n. 1 Hz) (kuva 1).

Amplitudimodulaatiota (myöhemmin ”AM”) havaitaan sekä aerodynaamiselle virtausmelulle että koneiston kapeakaistaisille komponenteille. Yleisesti tuuli-voimalan melun taajuusjakauma on painottunut pientaajuisen meluun 50-300 Hz. A-taajuuspainotus suodattaa tehokkaasti pientaajuista melua laskennallisesta äänestä ja on huono indikaattori melun todellisen pientaajuisen osuuden ja sen ajallisen vaihtelun mittarina./2/



Kuva 1. Kolmen 1.5 MW:n tuulivoimalaitoksen yöajan käyntiääntä nauhoitettuna 800 m päästä laitoksista. Kuvassa näkyy amplitudimodulaation vaihtelua.

Aerodynaaminen melu kuullaan usein kohinamaisena äänenä, jossa on jaksollinen rytmi. Likainen lavanpinta lisää rosoisuutta, mistä seuraa turbulenssin ja äänitason nousua. Pientaajuisen melun osuutta aerodynaamisessa melussa lisäävät tulo-virtauksen turbulenssi-ilmiöt, siipivirtauksen irtoamistilanteet (sakkaus) sekä ilmakehän äänen leviämisilmiöt (ilmamassan impedanssi etäisyyden kasvaessa). Aerodynaaminen melu voi aiheuttaa viheltävää ääntä esim. siipien vaurioituessa.

Modernit kolmilapaiset tuulivoimalaitokset ovat nykyisin ylävirtalaitoksia, joissa siivistö sijaitsee tuulen etupuolella suhteessa voimalan torniin. Pyörivän siivistön äänitaso on ylä- ja alatuulen puolilla suurempi kuin sivusta katsottuna samalla etäisyydellä /3/. Voimalan lähtöäänitaso on suoraan tuulennopeudesta riippuvainen siten, että alhaisilla tuulilla ja lähellä käyntiinlähdön nopeutta äänitaso on usein noin

10–15 dB alhaisempi kuin nimellisteholla (esim. kuva 2). Maksimi äänitehotaso (Lw) saavutetaan nimellistehon tuulinopeuksilla (yleisesti nopeus napakorkeudella > 9 m/s) ennen siipikulmasäädön käynnistymistä, mikä yleensä tasoittaa äänitehotason nousun tuulen nopeuden edelleen kasvaessa. Kärkinopeus on moderneissa voimaloissa maksimissaan noin 85 m/s. Tulovirtauksen turbulenssi sekä viereisten tuulivoimalaitosten virtausvana voivat lisätä aerodynaamista melua epäedullisen tulovirtauksen kohtauskulman vuoksi.

Ajoittainen melun jaksollisuus on tässä selvityksessä huomioitu melun leviämislaskennassa käyttäen subjektiivista haitallisuuskorjausta K_I./4/ Se on määritelty todellisten mittauskokemuksen perusteella yhteispohjoismaisen impulssimeluohjeen Nordtest NT ACOU 112 perusteella yhdelle amplitudipulssille. /4/ Yhdelle turbiinille voidaan havaita noin + 4 dB:n nousu alimmalta äänenpainetasolta ylimmälle./5/ Siten logaritmisen peruslaskennan mukaan kahden turbiinin tapauksessa amplitudimodulaatio voi olla + 3 dB yhden turbiinin lähtöarvosta ja kolmen turbiinin tapauksessa + 5 dB. Mittauksissa havaittu tasovaihtelun on suurimmillaan noin 8-9 dB ulkona. /6/

Toinen mahdollisuus määrittää amplitudimodulaatio (AM) on käyttää siihen sovellettua psykoakustista estimointimenetelmää, jossa huomioidaan modulaation suuruus, L(Z) äänitaso sekä modulaation taajuus (= siiven pyörimisnopeus) /7/. Tällöin arvioidaan vain AM:n voimakkuus *vacil* –asteikolla, mutta Suomessa ei ole erikseen korjausta ko. äänenluonteelle. Täten tässä selvityksessä käytetään ACOU 112 korjausta, joka soveltuu suoraan ISO 1996 standardin mukaiseksi impulssikorjaukseksi K_{2I} suurimmalle havaitulle pulssille.

Taustamelu ja tuulen aiheuttama aallokko- ja puustokohina peittävät tuulivoimaloiden melua, mutta peittoäänet vaihtelevat ajallisesti. Niiden voimakkuus on sitä parempi, mitä lähempänä peittoäänen taajuusjakauma on vastaavaa tuuliturbiinin äänijakaumaa /8/. Vastaavasti tuulivoimamelun amplitudimodulaatio voi heikentää taustamelun peittovaikutusta ja kuulua myös taustakohinan läpi. Näin erityisesti tapahtuu erityisesti alailmakehän stabiilisuuden kasvaessa, mikä osaltaan vähentää kasvillisuuden ja aallokon kohinaa./9/

Moderneissa tuulivoimalaitoksissa melun lähtöäänitasoa kontrolloidaan erillisellä optimointisäädöllä, jossa kellonajan, tuulensuunnan ja tuulennopeuden mukaan säädetään lapakulmaa haluttuun pyörimisnopeuteen ja melutasoon. Tällä säädöllä on kuitenkin vaikutuksia voimalan sen hetkiseen tuotantotehoon.

3 LASKENNAN LÄHTÖTIEDOT

Laskennan lähtötiedot on koottu asiakkaan lähettämästä datasta, digitaaliaineistosta, kirjallisuudesta sekä Pöyryn omasta aineistosta.

3.1 Digitaalikartta-aineisto

Melumallinnus on suoritettu digitaalikartalle, jonka topografian korkeusväli on 2.5 m. Kartassa on kuvattu tuulivoimaloiden lisäksi maaston muodot, rakennusten ja teiden paikkatiedot sekä vesiraja. Mallinnetut reseptoripisteet (yksittäislaskentapisteet) ja digitaaliaineiston perusesitys ovat liitteessä 1.

3.2 Mallinnetut turbiinityypit

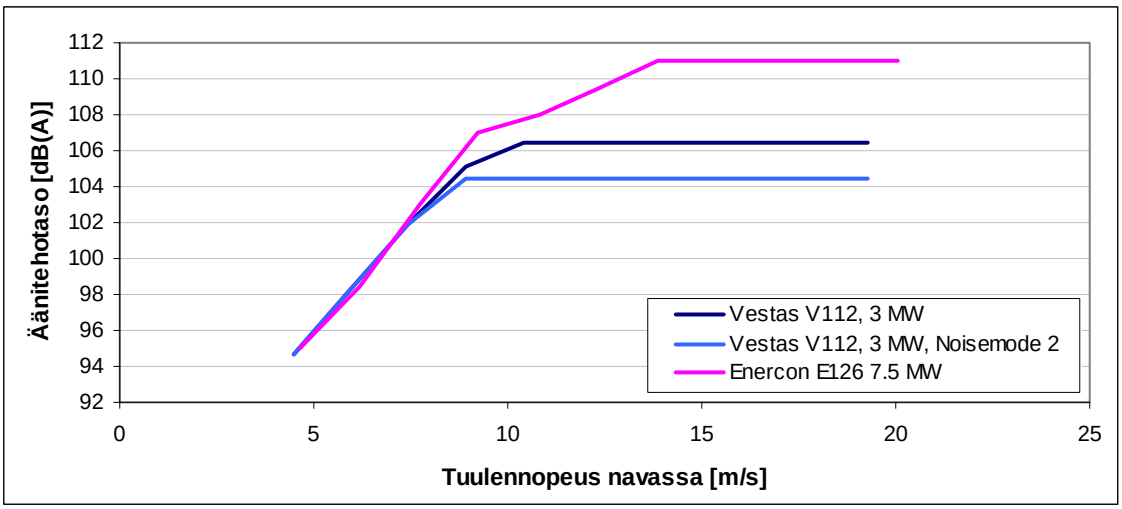
Mallinnuksessa käytettiin kahta eri turbiinityyppiä, joista pienempi on 3 MW (esim. Vestas 112) vaihtoehdossa 1 (VE1, 30 x 3 MW, tornikorkeus 119 m) ja suurempi 7.5 MW (esim. Enercon E-126) vaihtoehdossa 2 (VE2, 19 x 7.5MW). Lisäksi laskettiin hankevaihtoehto 3 (VE3, hankevaihtoehto 1:n voimaloilla ja samalla sijoittelulla) 140 m mastolla ja 120 m siiven kärkivälillä.

Turbiinien äänispektri terssikaistalla on saatu useiden valmistajien keskimääräisistä arvoista, takuutodistuksista sekä kirjallisuudesta./10/ Taulukossa 1 on annettu DAL32 mallinnuksessa käytetty oktaavikaistan painottamaton spektriarvo sekä A-taajuus-painotettu kokonaisarvo 95 % nimellisteholla.

Taulukko 1. Mallinnettujen tuulivoimalaitosten äänitehotasot, L_W

	Oktaavikaistat, Hz									
Voimalatyyppi	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	YHT
3 MW	116.0	113.1	110.4	106.2	104.0	102.6	96.2	84.5	82.1	**106.5**
7.5 MW	120.0	117.5	114.8	110.6	108.4	107.0	100.6	88.9	86.5	**111.0**

Alla kuvassa on esitetty lisäksi äänitehotason muutos kahden laitevalmistajan tuotespesifikaatioista tuulennopeuden funktiona, kun tuulennopeus mitataan voimalan navan korkeudelta. Äänitehotason nousee huomattavasti (noin 4 dB / (m/s)) alhaisilla tuulennopeuksilla ja tasoittuu kovilla nopeuksilla.



Kuva 2. Kahden laitevalmistajan äänitehotasoja taattuna (Vestas) sekä estimoituna arvona suurelle turbiinimallille (Enercon), ilmakehän stabiilisuusarvo m =0.16

3.3 Melumallinnus ja laskentaparametrit

Melun leviäminen maastoon on havainnollistettu tietokoneavusteisella laskenta-ohjelmistolla CadnaA 4.1, missä äänilähteestä lähtevä ääniaalto lasketaan digitaaliseen karttapohjaan äänenpaineeksi immissio- eli vastaanottopisteessä ray-tracing –menetelmällä. Mallissa otetaan huomioon äänen geometrinen leviämisvaimentuminen, maaston korkeuserot, rakennukset ja muut heijastavat pinnat sekä maanpinnan ja ilmakehän vaimennusvaikutukset. Melulähteitä voidaan määritellä piste, viiva tai pintalähteiksi. Melumallin leviämiskartta piirtää keskiäänitasokäyrät 5 dB:n välein valituilla lähtöarvoparametreilla.

Laskentaparametrit on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Laskentamallien parametrit

Lähtötieto	
Mallinnusalgoritmit	Peruslaskennat: Tuulisuusjakaumakorjattu pohjoismainen teollisuuslaskentamalli, DAL32 Pientaajuinen melulaskenta: Mukautettu ruotsalainen tuulivoimalaitosmelun numeerinen laskentamalli (Pöyry Finland Oy / 2011)
Sääolosuhteet	Ilman lämpötila 10 °C, ilmanpaine 101,325 kPa, ilman suhteellinen kosteus 70 %. Vuotuinen tuulisuusjakauma, ks. liite 5.
Laskentaverkko	Laskentapiste 5 x 5 metrin välein laskentaverkolla 2 metrin korkeudella seuraten maanpintaa
Maanpinnan kovuus	DAL 32: 0 kaikille alueille, kova maanpinta
Objektien heijastuvuus	Reseptorilaskennat: arvolla 0 (ei heijastusta)
Jaksollisuus, amplitudimodulaatio	Haitallisuuskorjauksella K_I + 0-3 dB vain yöajan melumalleihin melulähteen suuntaavuuden mukaan. Keskimäärin vaikutus on +2 dB.

Amplitudimodulaation häiritsevyys huomioidaan keinotekoisesti DAL 32 perusmallissa yhdessä sääkorjauksen kanssa. Mallissa verrataan yöajan myötätuulen puolen äänitasoa vastaavaan pohjoismaisen mallin tuloksiin. Korjaustermi kasvattaa äänitasoa etenkin sillä puolella, johon tuulisuusanalyysi antaa suurimmat frekvenssi-arvot vastakkaisessa suunnassa. Pohjoismainen ja ruotsalainen yleinen ja yksinkertaistettu tuulivoimaloiden laskentamalli antavat kohtalaisen tarkkoja tuloksia noin kilometriin asti. Tulosten tarkkuus voi heiketä yöllä tilanteessa, jossa vallitsee stabiili ilmakehä ja tuulen nopeusero tai lämpötilaprofiili siiven eri vaihekorkeuksien ja referenssikorkeuden (10 m) välillä kasvaa. /11/

3.4 Lyhyt tuulisuusanalyysi

Kalajoen tuulisuustiedot on saatu Suomen tuuliatlaksesta (www.tuuliatlas.fi) käyttäen 150 m korkeutta keskikorkeudesta. Liitteen 5 kuvissa on esitetty stabiilin ilmakehän frekvenssiarvoja tuulennopeuksille vuotuisesti sekä heinäkuulta (oletettu loma-kuukausi), jotka vastaavat tyypillistä taattua äänitehotason tuulennopeutta napakorkeudella. Kuvista nähdään, että päätuulensuunta on 180 - 210° (etelän ja lounaan välinen) ja frekvenssiltään pienin suunta on 300° (luoteesta). Aineiston mukaan keskimääräinen laskettu vuotuinen virtausprofiili 100 m korkeudessa eroaa merkittävästi logaritmisesta tuulisuusprofiilista kohti jyrkempää profiilia.

3.5 Sovellettavat vertailuohjearvot

Ympäristöministeriö on esittänyt tuulivoiman suunnitteludokumentissa (SY 19/2011) tuulivoimapuistoja koskeviksi suositusohjearvoiksi 45 dB(A) klo 7-22 ja 40 dB(A) klo 22–7. Jälkimmäinen on määräävä vertailuarvo yöajan tyypillisesti päivää korkeamman tuulisuuden vuoksi (mm. usein esiintyvä stabiili ilmakehä). Lisäksi ohjeessa annetaan Leq, 1 h ohjearvorajat pientaajuisen melun ohjearvoista sisätiloissa terssikaistoittain taajuuksilla 16–160 Hz.

Koska loma-asutusalueilla vietetään paljon aikaa ulkona tai ikkunat auki lämpimänä kautena, pientaajuisen melun laskenta on suoritettu vain lähimmän rakennuksen eteen ulos. Yleisiä ilmaäänen eristävyysarvoja lomarakennuksille ei ole ohjeessa erikseen lueteltu. Ohjeessa todetaan myös seuraavasti: ”Mikäli tuulivoimalan äänen spektri sisältää melulle häiriintyvässä kohteessa tonaalisia tai kapeakaistaisia taajuus-komponentteja tai ääni on impulssimaista tai selvästi amplitudimoduloitua (äänen voimakkuus vaihtelee ajallisesti), lisätään laskenta- tai mittaustulokseen 5 dB ennen suunnitteluohjearvoon vertaamista.”

4 LASKENTATULOKSET

Topografiakartalle laskettu melun leviäminen (korjattu DAL32) esitetään värikuvina liitteen 3 kartoissa. Meluherkiksi katsottujen kohteiden eteen 10 m etäisyydellä rakennuksen seinästä on asetettu reseptoripiste (immissiopiste, ks. liite 1), jonka tulokset ovat esitetty liitteessä 2. Reseptorilaskennassa rakennusten heijastukset on jätetty huomioimatta.

4.1 VE1

Hankevaihtoehdossa 1 mallinnettiin 30 x 3 MW:n voimalaa esisuunnitelman mukaisille paikoille. Melun leviämiskartat ovat esitetty liitteessä 3 (VE1) ja reseptoripistelaskennan tulokset liitteessä 2. Laskennan mukaan 40 dB(A) vyöhyke leviää 1000 – 1200 m:n päähän lähimmästä tuulivoimalasta 95 % nimellis-tehon tuulennopeudella. Melu leviää erityisesti pohjoiseen ja koilliseen, joka on myötätuulen puolella alueen päätuulensuuntaan nähden. Värikartan ja reseptoripistelaskennan perusteella kohteissa R01-R02 ja R18-R19 melutaso LAeq voi ylittää 40 dB(A). Laskentaepävarmuuden sisällä ovat lisäksi monet reseptoripisteistä lukuun ottamatta pistettä R03.

Amplitudimodulaatio on huomioitu DAL32 laskennassa keskimääräisesti. Alustavan suunnitelman mukaiset voimalat ovat ryhmitelty riviin siten, että reseptoripisteiden R17-R21 kannalta lapojen pyörimisen synkronisuustilanteita (3 tuulivoimalaa) voi esiintyä erityisesti myötätuulen vallitessa.

4.2 VE2

Hankevaihtoehdossa 2 mallinnettiin 19 x 7.5 MW voimalaa hankkeen esisuunnitelman mukaisille paikoille. Laskennan mukaan 40 dB(A) vyöhyke leviää 1500 – 1900 m päähän lähimmästä tuulivoimalasta 95 % nimellistehon nopeudella. Värikartan ja reseptoripistelaskennan perusteella kohteissa R01-R02, R10-R12 sekä R17-R21 melutaso voi ylittää 40 dB(A). Laskentaepävarmuuden sisällä ovat lisäksi kaikki muut reseptoripisteet.

7.5MW voimaloiden amplitudimodulaatiosta ei ole toistaiseksi mittaustuloksia. Suurten laitosten siipien pyörimisnopeus on selkeästi hitaampi (11.8 rpm) verrattuna 2-3 MW voimalaan (17-22 rpm), joten modulaation impulssimaisuus voidaan olettaa hieman pienemmäksi. Korjatussa DAL32 laskennassa on käytetty kuitenkin samoja äänitahotason korjausarvoja kuin vaihtoehdossa 1.

4.3 VE3

Hankevaihtoehdossa 3 mallinnettiin 30 x 3 MW voimalaa esisuunnitelman mukaisille paikoille. Melun leviämiskartat ovat esitetty liitteessä 3 (VE3) ja reseptoripiste-laskennan tulokset liitteessä 2. Laskennan mukaan 40 dB(A) meluvyöhyke leviää 1000 – 1200 m päähän lähimmästä tuulivoimalasta 95 % nimellistehon nopeudella. Melu leviää erityisesti pohjoiseen ja koilliseen, joka on myötätuulen puolella alueen päätuulensuuntaan nähden. Värikartan sekä reseptorilaskennan perusteella kohteissa

R01-R02 sekä R18-R19 melutaso LAeq voi ylittää 40 dB(A). Laskentaepävarmuuden sisällä ovat lisäksi monet reseptoripisteistä lukuun ottamatta pistettä R03.

Amplitudimodulaatio on huomioitu DAL32 laskennassa keskimääräisesti. Alustavan suunnitelman mukaiset voimalat ovat ryhmitelty riviin siten, että reseptoripisteiden R17-R21 kannalta lapojen pyörimisen synkronisuustilanteita (3 tuulivoimalaa) esiintyy erityisesti myötätuulella. Kaikkiaan eroa VE1:een nähden oli vain noin -0,1 dB lisääntyneen tornikorkeuden vuoksi. Maston korottaminen lisää kuitenkin keskimääräistä tilastollista tuulennopeutta napakorkeudella ja sitä kautta melun tilastollista esiintyvyyttä jokaisessa ilmansuunnassa. Tulokset ovat kuitenkin laskettu jo valmiiksi maksimitakuun mukaisella äänitehotasolla LAeq -tasoksi.

4.4 Meluoptimointi

Mallinnustulosten perusteella suunnitteluohjearvo voi ylittyä kaikissa hankevaihtoehdoissa. Tuulivoimalaitoksia on mahdollisuus ajaa meluoptimoidusti erityisesti korkeiden tuulennopeuksien aikana. Meluoptimointi vähentää korkeinta taattua äänitasoa 2 dB VE1:ssa (Vestas), mutta vastaavaa optimointikäyrää ei ole saatavilla VE 2 Enerconin tuulivoimaloille. Ko. vaihtoehto on laskettu siten, että pääosa tuloksista alittaa 40 dB(A) suunnitteluarvon meluherkissä pisteissä.

Hankevaihtoehdossa VE1 on optimoituina yht. 15 tuulivoimalaa arvolla -2 dB ja hankevaihtoehdossa VE 2 on optimoituina yht. 13 tuulivoimalaa arvoilla -2 – -6 dB.

4.5 Pientaajuinen melu

Voimalaitosten pientaajuinen melu laskettiin käyttäen painottamattomia äänitehotason 1/3 oktaavikaistatietoja, jotka on saatu kattavasta kirjallisuusanalyysistä /10/. Laskenta suoritettiin Pöyryn kehittämällä ohjelmalla, joka antaa varsin samansuuntaisia tuloksia DAL32 mallin kanssa dB(A) kokonaisäänenpaineilla.

Kuvaajat meluista kunkin vaihtoehdon lähimmässä loma-asuinkohteessa on esitetty liitteessä 4. Tulokset viittaavat siihen, että > 50 Hz:n taajuuksilla pientaajuinen tuulivoimamelu ylittää loma-asuinkohteen ulkopuolella sisätilan ohjearvon. Näin tapahtuu erityisesti vaihtoehdossa VE2, jossa pientaajuisen melun osuus on merkittävästi suurempi alkaen jo taajuudelta 40 Hz.

Optimointiajo suoritettiin myös pientaajuisen melulle. Melutasot ulkona ylittävät edelleen suunnitteluohjearvon sisällä. Vaimennusvaatimus äänieristykselle on kuitenkin enää n. 5-6 dB suunnitteluarvon alittamiseksi sisätiloissa. Laskenta ei huomioi maavaimennusta, jonka tyypillinen maksimi on n. 160–250 Hz kohdalla etäisyydestä ja maatyypistä riippuen. /13/

5 LASKENNAN EPÄVARMUUS

Melulaskennan epävarmuudet liittyvät erityisesti emissiolähteen, sään ja amplitudimodulaation arvioinnin epävarmuuksiin. Laskennassa käytettyjen turbiinien taattu/oletettu äänitehotaso ei välttämättä vastaa esitettyä tilannetta kovilla tuulilla.

7.5 MW emissiolähteen äänitehotasoa ei tunneta, sillä laitevalmistaja on vain arvioinut sen eikä taannut sitä. Äänitehotason määritys- ja mittausstandardi IEC 61400-11 sisältää epävarmuuksia. Se ei huomioi lainkaan usean turbiinin synkronisuustilanteiden amplitudimodulaatiota kauempana laitoksista, pientaajuista melua (< 50 Hz) tai infraääniä./12/ Säätekijöiden epävarmuuden vaikutus on suuri pitkissä etäisyyksissä.

Arvioimme kokonaisepävarmuudeksi noin ± 5 dB 1000 metrissä IEC standardin tuulisuusluokassa 8 m/s 10 m korkeudella. Tästä perusmallin osuus on noin ± 3 dB.

6 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Pöyry Energia mallinsi Fortum Power and Heat Oy:n Kalajoen suunnitellun tuulivoimapuiston melun leviämisen tietokoneavusteisesti digitaalikartalle. Mallinnuksissa laskettiin sekä tuulisuuskorjattu melun keskiäänitaso L_{Aeq} 95 % nimellistehon tuulennopeudella että pientaajuisen melun osuus samalla äänitehotasolla kahdelle vaihtoehdolle.

Tulosten perusteella hankevaihtoehdoissa 1 ja 3 (VE1, VE3) osissa meluherkistä kohteista keskiäänitaso (L_{Aeq}) voi ylittää suositusohjearvon 40 dB(A). Vaihtoehdossa 2 (VE2) ylityksiä oli useita, mutta kaikki tulokset ovat laskentavirhemarginaalin sisällä. Vaihtoehdoissa VE1 ja VE3 aerodynaamisen melun amplitudimodulaatio voi kasvaa merkittäväksi reseptoripisteissä R17-R21 voimaloiden ryhmittelyn vuoksi (+ 5 dB /1/). Vaihtoehdon VE2 laitostyyppien amplitudimodulaatiota ei tunneta tarkasti suurten voimaloiden roottorin hitaan pyörimisnopeuden vuoksi (max 12 rpm).

Hankevaihtoehdot laskettiin myös meluoptimointikäyrien avulla. Vaihtoehdossa VE1 15 tuulivoimalan optimointi 2 dB alemmaksi alensi melutason alle 40 dB(A) suunnitteluohjearvon kaikissa meluherkissä pisteissä. Vaihtoehdossa VE 2 laitevalmistajalla ei ole käytössä optimointikäyrää, mutta laskennan mukaan 40 dB(A) suunnitteluohjearvo alittuu pääosissa tarkastelupisteistä. Vaimennus oli kuitenkin paikoin jopa -6 dB, mikä tarkoitta selvää tehotason rajoittamista kovilla tuulen nopeuksilla.

Pientaajuisen melun suunnitteluohjearvo sisätiloissa ylittyy molemmissa vaihtoehdoissa lähimmän loma-asuinkohteen ulkopuolella. Vaihtoehdoissa VE 1 ja VE 3 ylitys alkaa taajuudelta 50 Hz ja vaihtoehdossa VE 2 taajuudelta 40 Hz. Tässä selvityksessä ei ole mahdollista antaa yksiselitteistä ilmaäänieritysarvoa loma-asunnoille, joten pientaajuisen melun lopullinen vertaaminen ohjearvoon jää vajaaksi. Meluoptimointilaskennassa ilmaäänieristävyyden vaatimukseksi saatiin noin 5-6 dB ilman maavaimennustekijöiden huomioimista.

Oili Tikka
Johtaja, mittauspalvelut
Pöyry Finland Oy Energia

Carlo Di Napoli
Konsultti, teollisuusmeluselvitykset
Pöyry Finland Oy Energia

KIRJALLISUUSVIITTEET

/1/ Tuulivoimarakentamisen suunnittelu, ympäristöministeriön raportteja 19/2011. Helsinki, 2011.

/2/ Noise Annoyance of Wind Turbines. VTT Research Report VTT-R-00951-11, 2011.

/3/ Oerlemans, S. Schepers, J.G. "Prediction of wind turbine noise directivity and swish", *Proc. 3rd Int. conference on wind turbine noise*, Aalborg, Denmark, (2009)

/4/ Acoustics: Prominence of Impulsive Sounds and for Adjustment of $L_{Aeq.}$ Nordtest Method NT ACOU 112, Nordtest, Finland (2002)

/5/ Di Napoli, C. Wind turbine noise in a small and quiet community if Finland. Noise Control Engineering Journal, NCEJ, USA, 2011.

/6/ G.P. van den Berg, "The sound of high winds: the effect of atmospheric stability on wind turbine sound and microphone noise", Doctoral Thesis, University of Groningen, Netherlands (2007)

/7/ Lenchine, V. Amplitude modulation in wind turbine noise. Proceedings of Acoustics 2009, Adeleine, Australia.

/8/ Nelson, D.A. Perceived loudness of wind turbine noise in the presence of ambient sound

/9/ Uosukainen, S. Tuulivoimaloiden melun synty, eteneminen ja häiritsevyys. VTT tiedotteita 2529, Helsinki 2010

/10/ Moller, C. Pedersen, C.S. Low frequency noise from large wind turbines. Acoustical Society of America Vol 129, No 6, June 2010

/11/ Forssel, J. Wind turbine noise propagation over flat ground: Measurements and Predictions. Acta Acustica united with Acustica. Vol 96 (2010), pages 753-760.

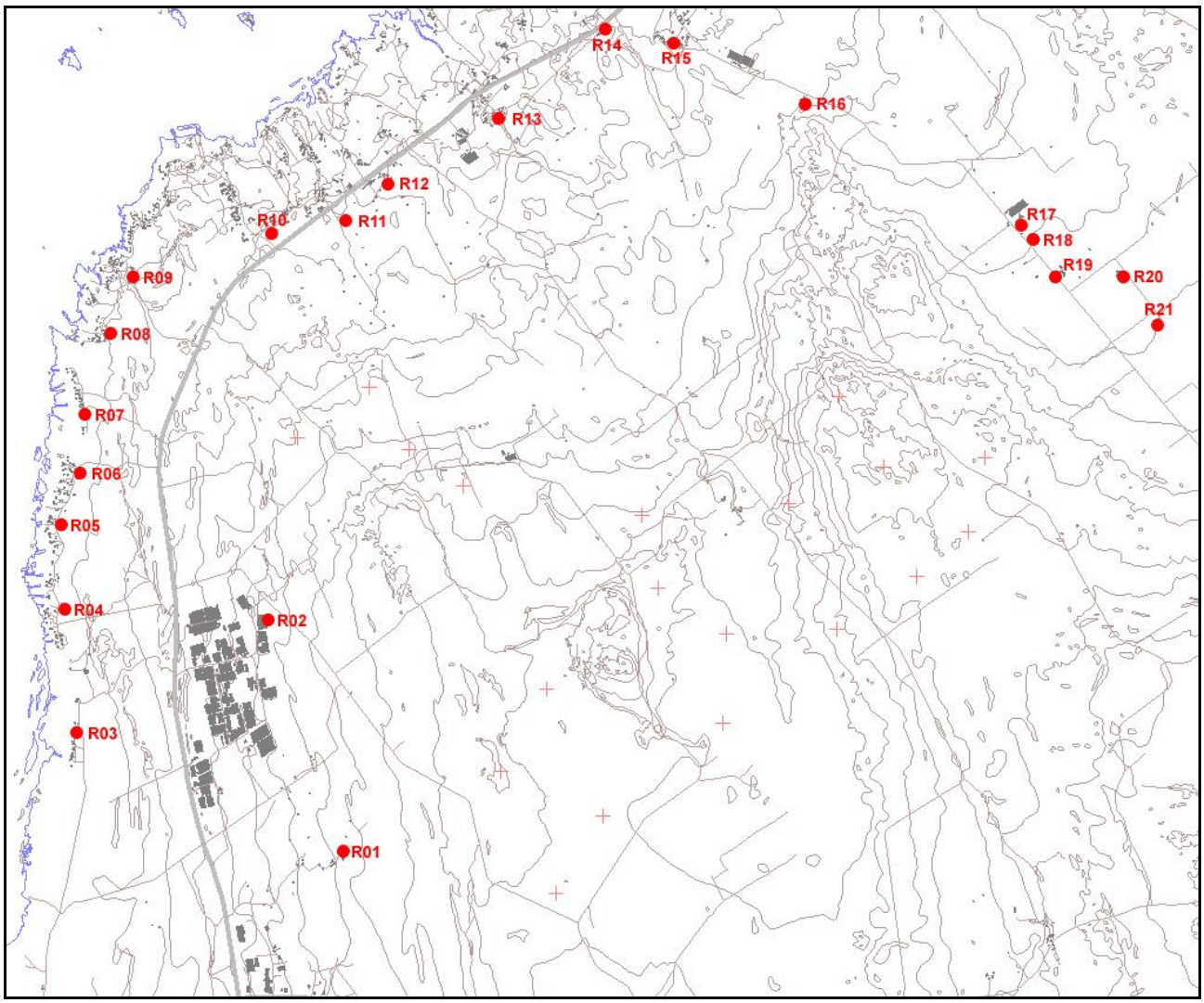
/12/ IEC 61400-11. Wind turbine generator systems, Part 11: Acoustic noise measurement techniques.

/13/ Björk, E. Ääntä vahvistavat olosuhdetekijät. Kuopion Yliopisto, 2005.

LIITE 1

MELUMALLINNUKSEN KARTTA-ALUE

Liite 1. Melumallinnusalue sekä reseptoripisteet R01-R21



Copyright © Pöyry Finland Oy

LIITE 2

RESEPTORIPISTEIDEN TULOKSET

Liite 2. Yksittäiset reseptoripistetulokset

VE 1	Sovellettava Ohjearvo		Laskentatulos		Ohjearvoylitys
30 x 3 MW	Päivä	Yö	Päivä	Yö	Yö
Laskentapiste	dB(A)	dB(A)	dB(A)	dB(A)	dB(A)
R01	45	40	40.4	40.4	0.4
R02	45	40	40.9	40.9	0.9
R03	45	40	34.4	34.4	-
R04	45	40	35.4	35.4	-
R05	45	40	36.3	36.3	-
R06	45	40	37.3	37.3	-
R07	45	40	37.4	37.4	-
R08	45	40	37.1	37.1	-
R09	45	40	36.0	36.0	-
R10	45	40	39.7	39.7	-
R11	45	40	40.0	40.0	-
R12	45	40	38.5	38.5	-
R13	45	40	36.8	36.8	-
R14	45	40	35.3	35.3	-
R15	45	40	35.9	35.9	-
R16	45	40	38.2	38.2	-
R17	45	40	38.9	38.9	-
R18	45	40	40.3	40.3	0.3
R19	45	40	40.7	40.7	0.7
R20	45	40	38.4	38.4	-
R21	45	40	38.1	38.1	-

Copyright © Pöyry Finland Oy

VE2	Sovellettava Ohjearvo		Laskentatulos		Ohjearvoylitys
19 x 7.5MW	Päivä	Yö	Päivä	Yö	Yö
Laskentapiste	dB(A)	dB(A)	dB(A)	dB(A)	dB(A)
R01	45	40	42.7	42.7	2.7
R02	45	40	43.3	43.3	3.3
R03	45	40	36.8	36.8	-
R04	45	40	37.7	37.7	-
R05	45	40	38.5	38.5	-
R06	45	40	39.4	39.4	-
R07	45	40	39.6	39.6	-
R08	45	40	39.5	39.5	-
R09	45	40	39.2	39.2	-
R10	45	40	42.6	42.6	2.6
R11	45	40	43.4	43.4	3.4
R12	45	40	42.0	42.0	2
R13	45	40	39.8	39.8	-
R14	45	40	37.8	37.8	-
R15	45	40	38.2	38.2	-
R16	45	40	39.8	39.8	-
R17	45	40	40.8	40.8	0.8
R18	45	40	41.9	41.9	1.9
R19	45	40	42.5	42.5	2.5
R20	45	40	40.6	40.6	0.6
R21	45	40	40.4	40.4	0.4

Copyright © Pöyry Finland Oy

VE3	Sovellettava Ohjearvo		Laskentatulos		Ohjearvoylitys
30 x 3 MW	Päivä	Yö	Päivä	Yö	Yö
Laskentapiste	dB(A)	dB(A)	dB(A)	dB(A)	dB(A)
R01	45	40	40.3	40.3	0.3
R02	45	40	40.8	40.8	0.8
R03	45	40	34.3	34.3	-
R04	45	40	35.3	35.3	-
R05	45	40	36.2	36.2	-
R06	45	40	37.2	37.2	-
R07	45	40	37.3	37.3	-
R08	45	40	37.0	37.0	-
R09	45	40	36.8	36.8	-
R10	45	40	39.6	39.6	-
R11	45	40	40.0	40.0	-
R12	45	40	38.4	38.4	-
R13	45	40	36.7	36.7	-
R14	45	40	35.2	35.2	-
R15	45	40	35.8	35.8	-
R16	45	40	38.1	38.1	-
R17	45	40	38.8	38.8	-
R18	45	40	40.3	40.3	0.3
R19	45	40	40.6	40.6	0.6
R20	45	40	38.4	38.4	-
R21	45	40	38.0	38.0	-

Copyright © Pöyry Finland Oy

VE 1 - Meluoptimointi	Sovellettava Ohjearvo		Laskentatulos		Ohjearvoylitys
30 x 3 MW	Päivä	Yö	Päivä	Yö	Yö
Laskentapiste	dB(A)	dB(A)	dB(A)	dB(A)	dB(A)
R01	45	40	39.0	39.0	-
R02	45	40	39.8	39.8	-
R03	45	40	33.4	33.4	-
R04	45	40	34.3	34.3	-
R05	45	40	35.1	35.1	-
R06	45	40	36.0	36.0	-
R07	45	40	36.1	36.1	-
R08	45	40	36.0	36.0	-
R09	45	40	35.1	35.1	-
R10	45	40	38.8	38.8	-
R11	45	40	39.4	39.4	-
R12	45	40	38.0	38.0	-
R13	45	40	36.1	36.1	-
R14	45	40	34.5	34.5	-
R15	45	40	35.0	35.0	-
R16	45	40	36.9	36.9	-
R17	45	40	37.4	37.4	-
R18	45	40	38.9	38.9	-
R19	45	40	39.2	39.2	-
R20	45	40	37.0	37.0	-
R21	45	40	36.7	36.7	-

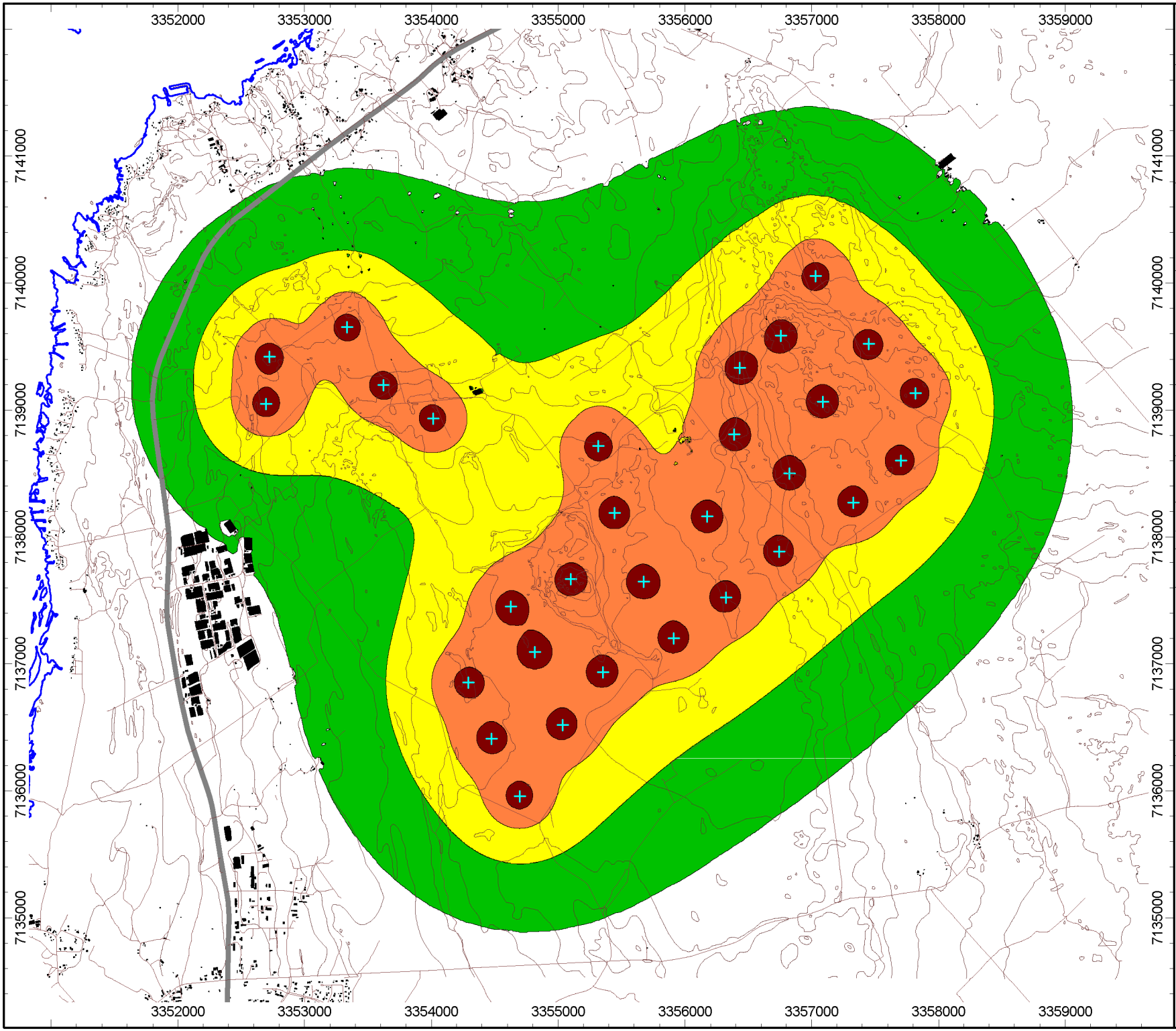
Copyright © Pöyry Finland Oy

VE 2 - Meluoptimointi 19 x 7.5 MW	Sovellettava Ohjearvo		Laskentatulos		Ohjearvoylitys
	Päivä	Yö	Päivä	Yö	Yö
Laskentapiste	dB(A)	dB(A)	dB(A)	dB(A)	dB(A)
R01	45	40	39.8	39.8	-
R02	45	40	40.6	40.6	0.6
R03	45	40	34.4	34.4	-
R04	45	40	35.0	35.0	-
R05	45	40	35.6	35.6	-
R06	45	40	36.4	36.4	-
R07	45	40	36.4	36.4	-
R08	45	40	36.3	36.3	-
R09	45	40	36.0	36.0	-
R10	45	40	39.0	39.0	-
R11	45	40	39.9	39.9	-
R12	45	40	38.9	38.9	-
R13	45	40	37.5	37.5	-
R14	45	40	35.9	35.9	-
R15	45	40	36.2	36.2	-
R16	45	40	37.6	37.6	-
R17	45	40	38.0	38.0	-
R18	45	40	39.1	39.1	-
R19	45	40	39.6	39.6	-
R20	45	40	37.8	37.8	-
R21	45	40	37.6	37.6	-

Copyright © Pöyry Finland Oy

LIITE 3

MELUMALLINNUSKARTAT



PÖYRY FINLAND OY

Fortum Power and Heat Oy

Kalajoen tuulivoimahanke YVA

MELUMALLINNUS
Yhteispohjoismainen mallinnusalgoritmi DAL 32

VE 1

30 x 3 MW

Mittaskaala 1 : 33000

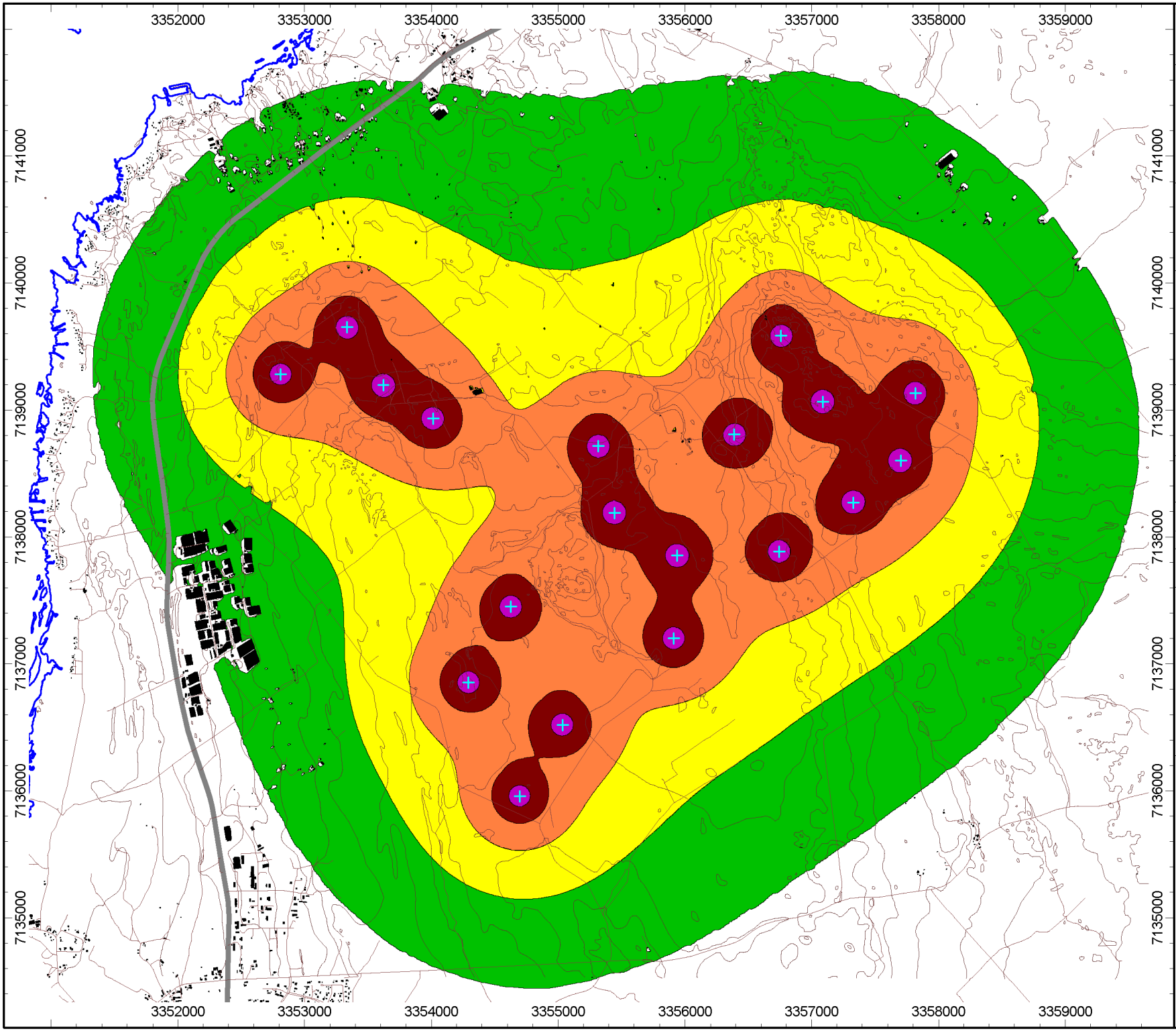
	PVM
Alustava	18.08.2011
Lopullinen	

Keskiäänitason tulos LAeq [dB(A)]

Laskentaverkon korkeus: 2 m maanpinnasta seuraten maanpinnan korkeutta

Laskentaverkon tiheys: 5 x 5 m

- > 40.0 dB(A)
- > 45.0 dB(A)
- > 50.0 dB(A)
- > 55.0 dB(A)
- > 60.0 dB(A)
- > 65.0 dB(A)



PÖYRY FINLAND OY

Fortum Power and Heat Oy

Kalajoen tuulivoimahanke YVA

MELUMALLINNUS
Yhteispohjoismainen mallinnusalgoritmi DAL 32

VE 2

19 x 7.5 MW

Mittaskaala 1 : 33000

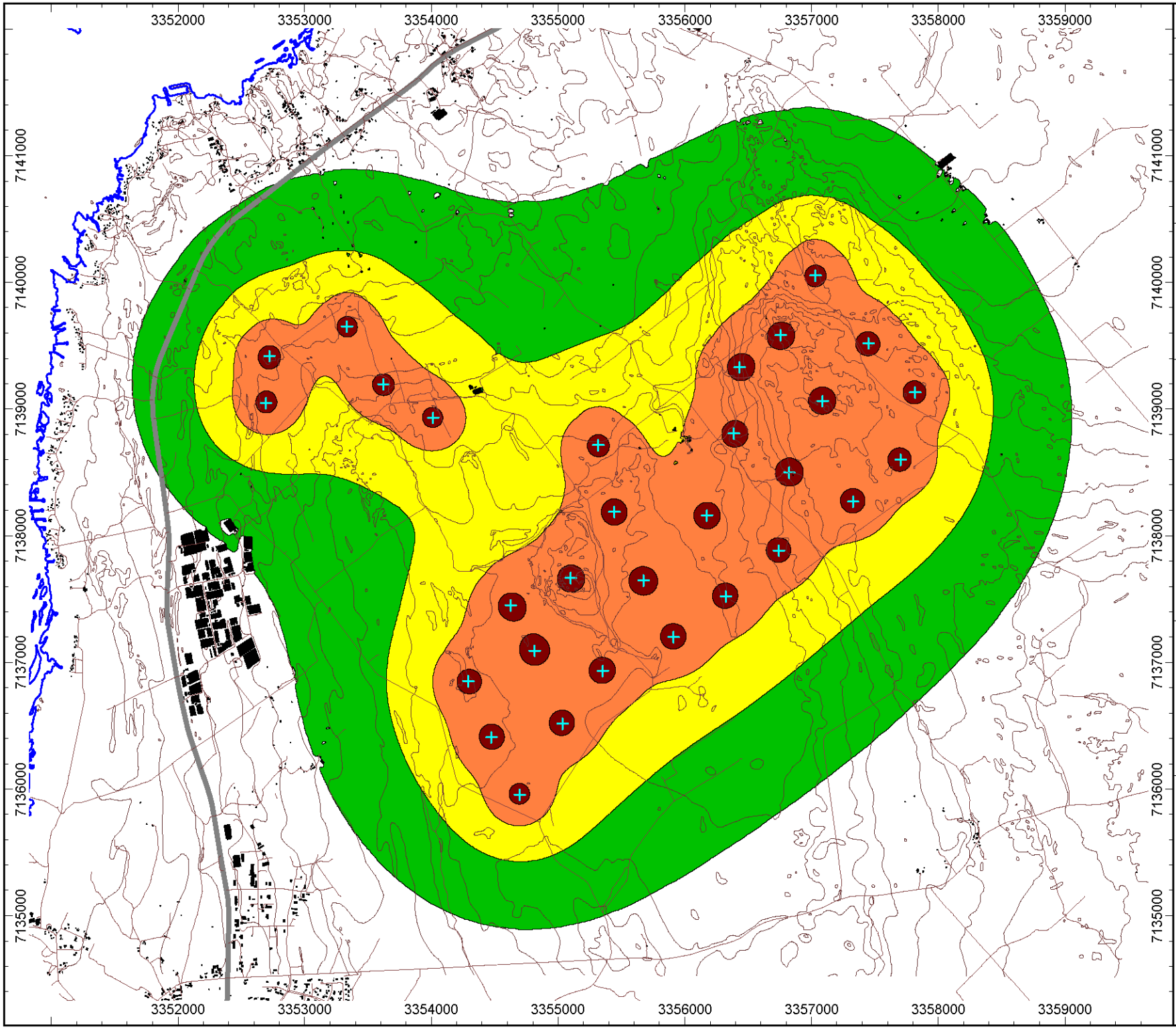
	PVM
Alustava	18.08.2011
Lopullinen	

Keskiäänitason tulos LAeq [dB(A)]

Laskentaverkon korkeus: 2 m maanpinnasta seuraten maanpinnan korkeutta

Laskentaverkon tiheys: 5 x 5 m

- > 40.0 dB(A)
- > 45.0 dB(A)
- > 50.0 dB(A)
- > 55.0 dB(A)
- > 60.0 dB(A)
- > 65.0 dB(A)



PÖYRY FINLAND OY

Fortum Power and Heat Oy

Kalajoen tuulivoimahanke YVA

MELUMALLINNUS
Yhteispohjoismainen mallinnusalgoritmi DAL 32

VE 3

30 x 3 MW

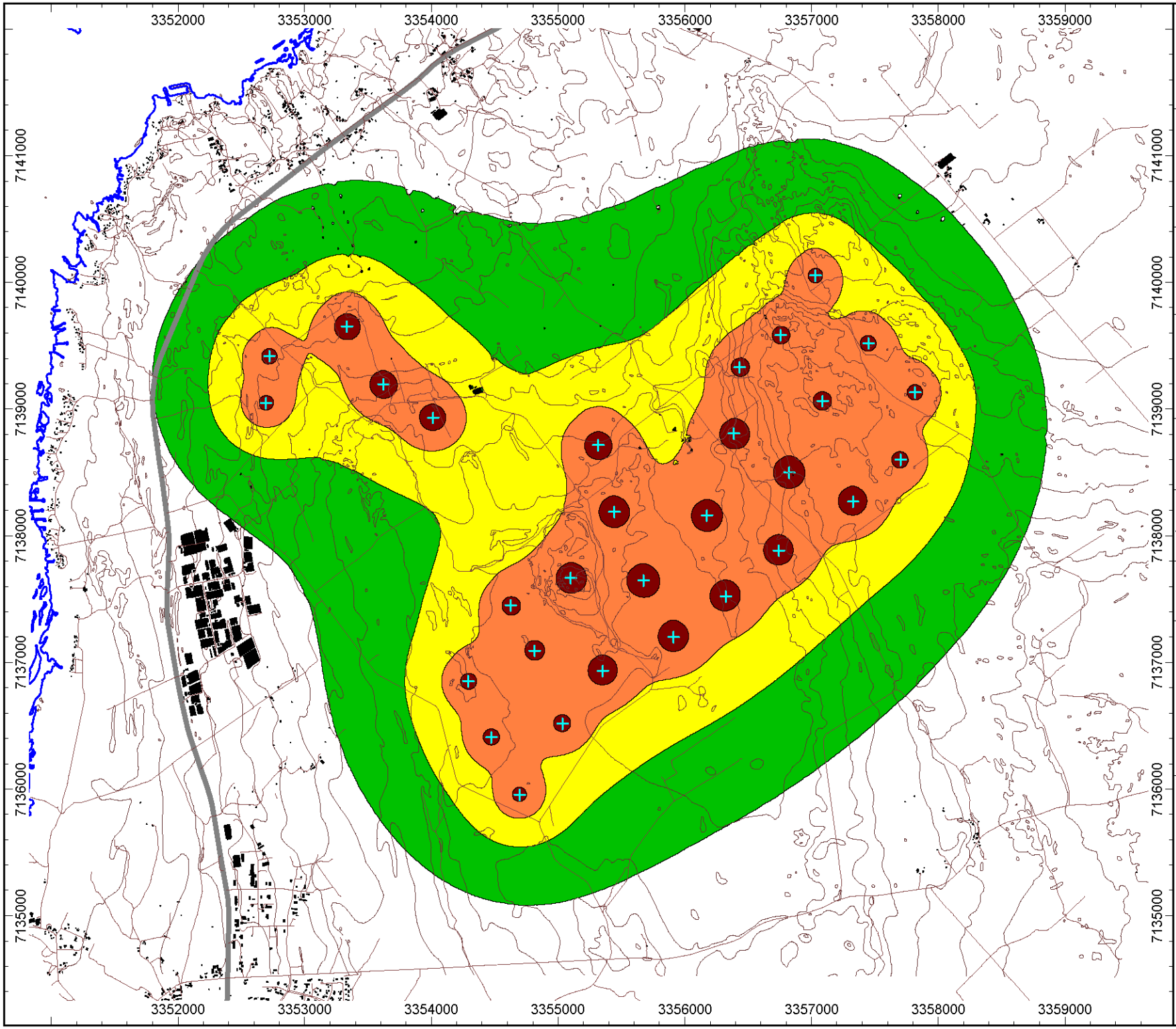
Tornikorkeus 140 m
Siipien kärkiväli 120 m

Keskiäänitason tulos LAeq [dB(A)]

Laskentaverkon korkeus: 2 m maanpinnasta seuraten maanpinnan korkeutta

Laskentaverkon tiheys: 5 x 5 m

- > 40.0 dB(A)
- > 45.0 dB(A)
- > 50.0 dB(A)
- > 55.0 dB(A)
- > 60.0 dB(A)
- > 65.0 dB(A)



PÖYRY FINLAND OY

Fortum Power and Heat Oy

Kalajoen tuulivoimahanke YVA

MELUMALLINNUS
Yhteispohjoismainen mallinnusalgoritmi DAL 32

VE 1 - Meluoptimointi

30 x 3.0 MW

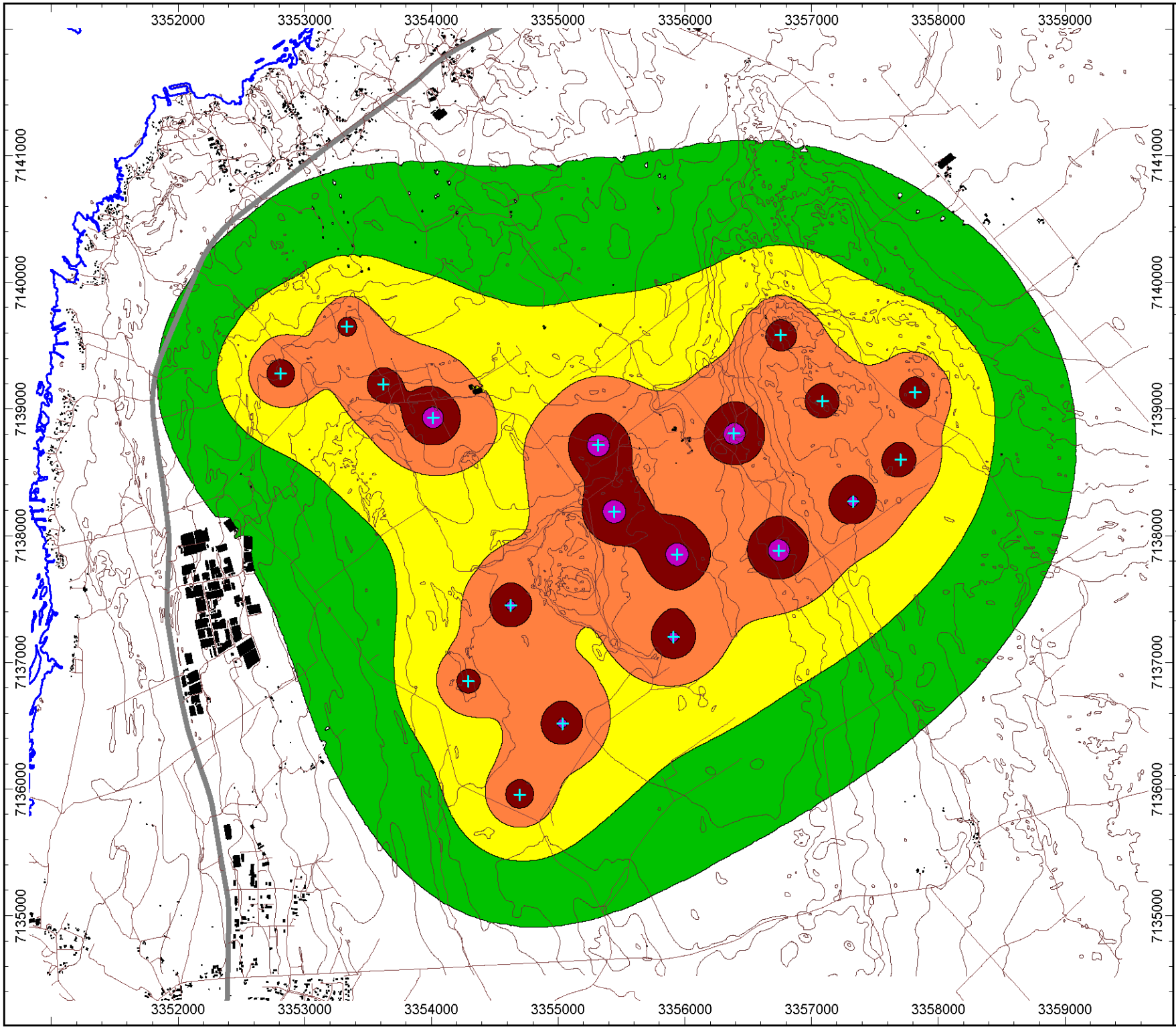
	PVM
Alustava	
Lopullinen	11.10.2011

Keskiäänitason tulos LAeq [dB(A)]

Laskentaverkon korkeus: 2 m maanpinnasta seuraten maanpinnan korkeutta

Laskentaverkon tiheys: 5 x 5 m

- > 40.0 dB(A)
- > 45.0 dB(A)
- > 50.0 dB(A)
- > 55.0 dB(A)
- > 60.0 dB(A)
- > 65.0 dB(A)



PÖYRY FINLAND OY

Fortum Power and Heat Oy

Kalajoen tuulivoimahanke YVA

MELUMALLINNUS
Yhteispohjoismainen mallinnusalgoritmi DAL 32

VE 2 - Meluoptimointi

19 x 7.5 MW

	PVM
Alustava	
Lopullinen	11.10.2011

Keskiäänitason tulos LAeq [dB(A)]

Laskentaverkon korkeus: 2 m maanpinnasta seuraten maanpinnan korkeutta

Laskentaverkon tiheys: 5 x 5 m

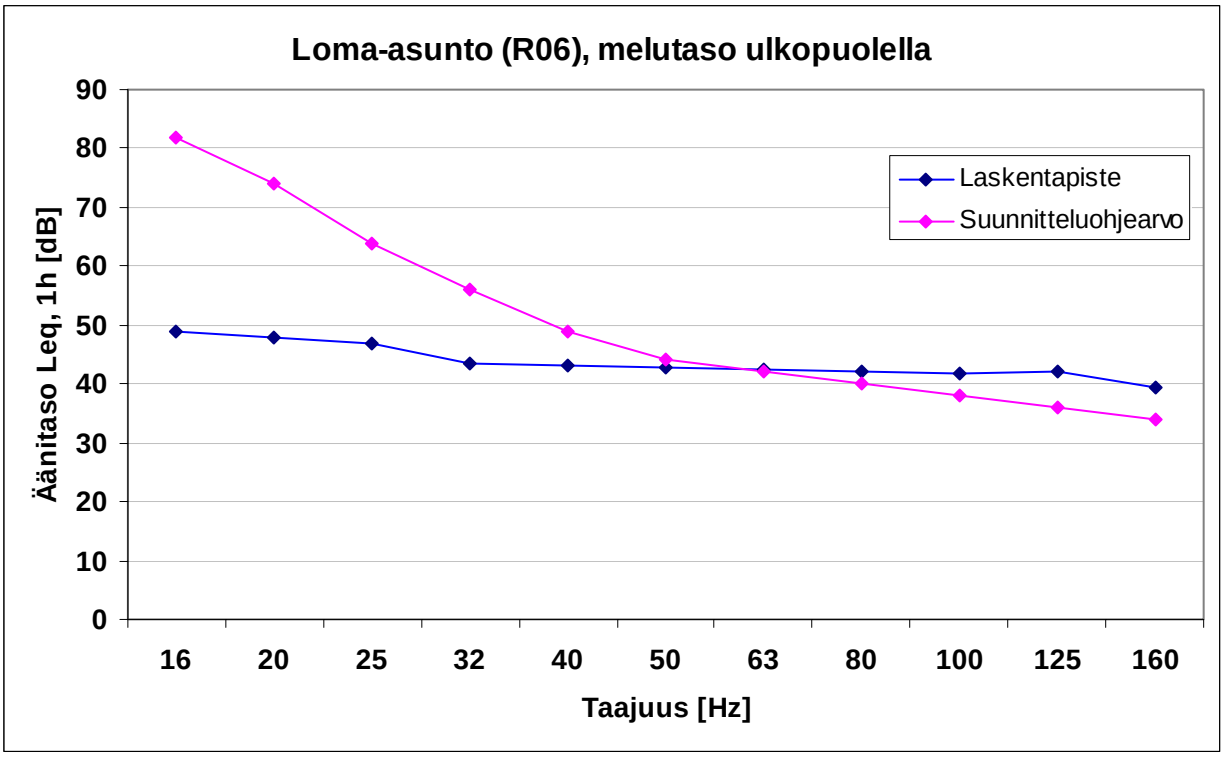
- > 40.0 dB(A)
- > 45.0 dB(A)
- > 50.0 dB(A)
- > 55.0 dB(A)
- > 60.0 dB(A)
- > 65.0 dB(A)

LIITE 4

PIENTAAJUISEN MELUN LASKENTATULOKSET

Liite 4. Pientaajuisen melun osuus lähimmässä reseptoripisteessä

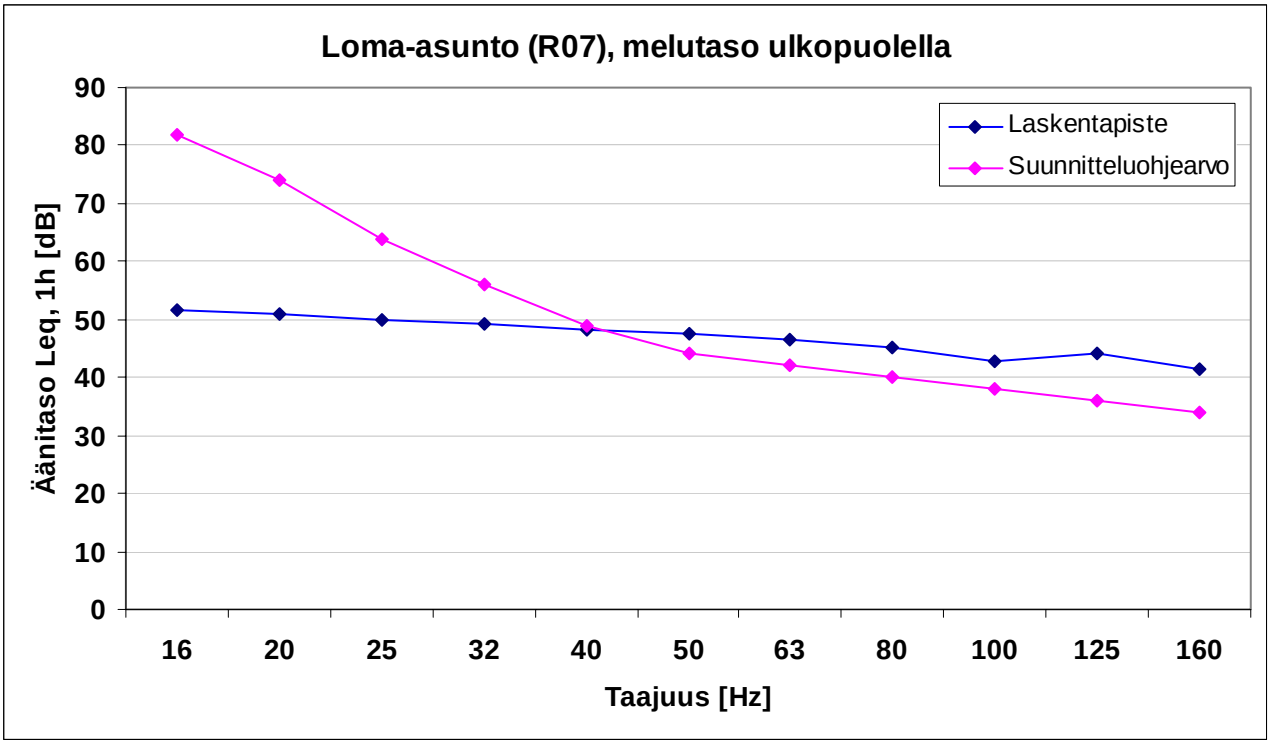
Hankevaihtoehto 1 (VE 1)



	Taajuus [Hz]										
	20	**25**	**32**	**40**	**50**	**63**	**80**	**100**	**125**	**160**	**200**
Tulos, dB	48.8	47.8	46.7	43.4	43.0	42.9	42.3	42.0	41.9	42.0	39.5
Ohjearvo, dB	82	74	64	56	49	44	42	40	38	36	34
Erotus, dB	**33.2**	**26.2**	**17.3**	**12.6**	**6.0**	**1.1**	**-0.3**	**-2.0**	**-3.9**	**-6.0**	**-5.5**

Copyright © Pöyry Finland Oy

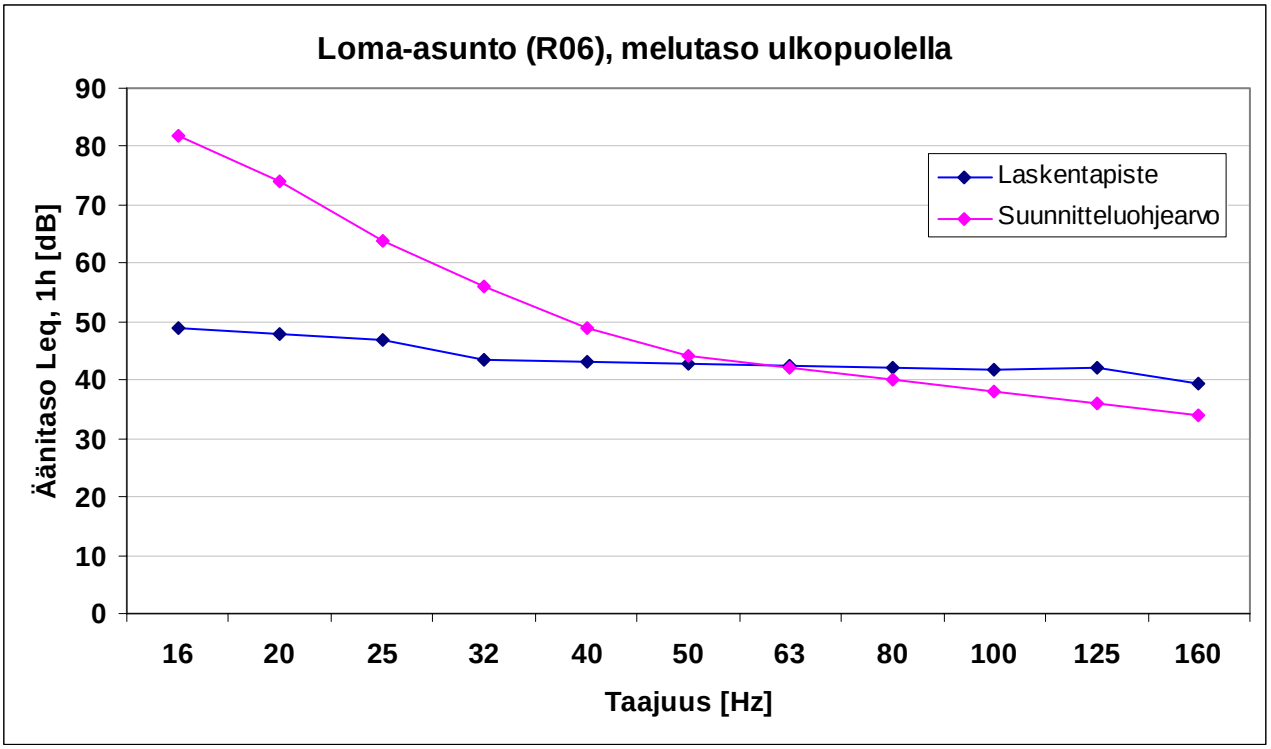
Hankevaihtoehto 2 (VE2)



	Taajuus [Hz]										
	16	**20**	**25**	**32**	**40**	**50**	**63**	**80**	**100**	**125**	**160**
Tulos, dB	51.6	50.8	50.0	49.1	48.3	47.4	46.5	45.0	42.8	44.3	41.6
Ohjearvo, dB	82	74	64	56	49	44	42	40	38	36	34
Erotus, dB	**30.4**	**23.2**	**14.0**	**6.9**	**0.7**	**-3.4**	**-4.5**	**-5.0**	**-4.8**	**-8.3**	**-7.6**

Copyright © Pöyry Finland Oy

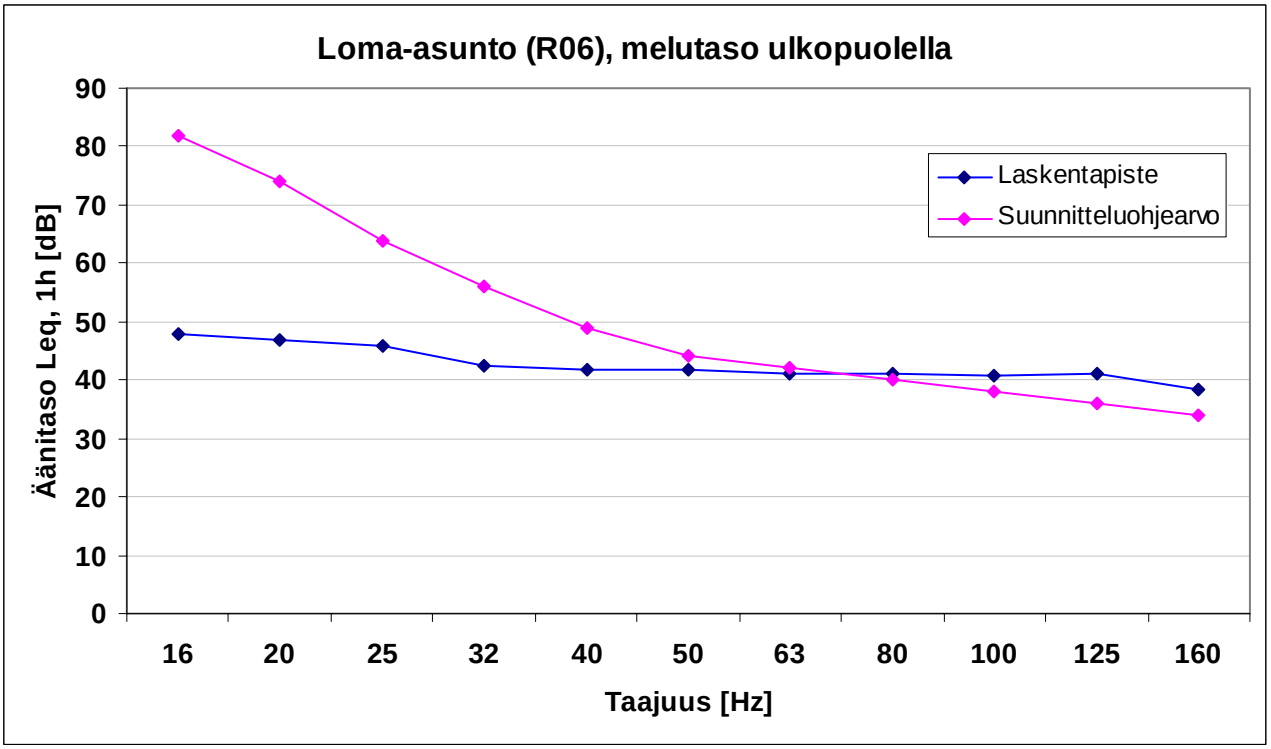
Hankevaihtoehto 3 (VE3)



	Taajuus [Hz]										
	20	**25**	**32**	**40**	**50**	**63**	**80**	**100**	**125**	**160**	**200**
Tulos, dB	48.8	47.8	46.7	43.4	43.0	42.9	42.3	42.0	41.9	42.0	39.5
Ohjearvo, dB	82	74	64	56	49	44	42	40	38	36	34
Erotus, dB	**33.2**	**26.2**	**17.3**	**12.6**	**6.0**	**1.1**	**-0.3**	**-2.0**	**-3.9**	**-6.0**	**-5.5**

Copyright © Pöyry Finland Oy

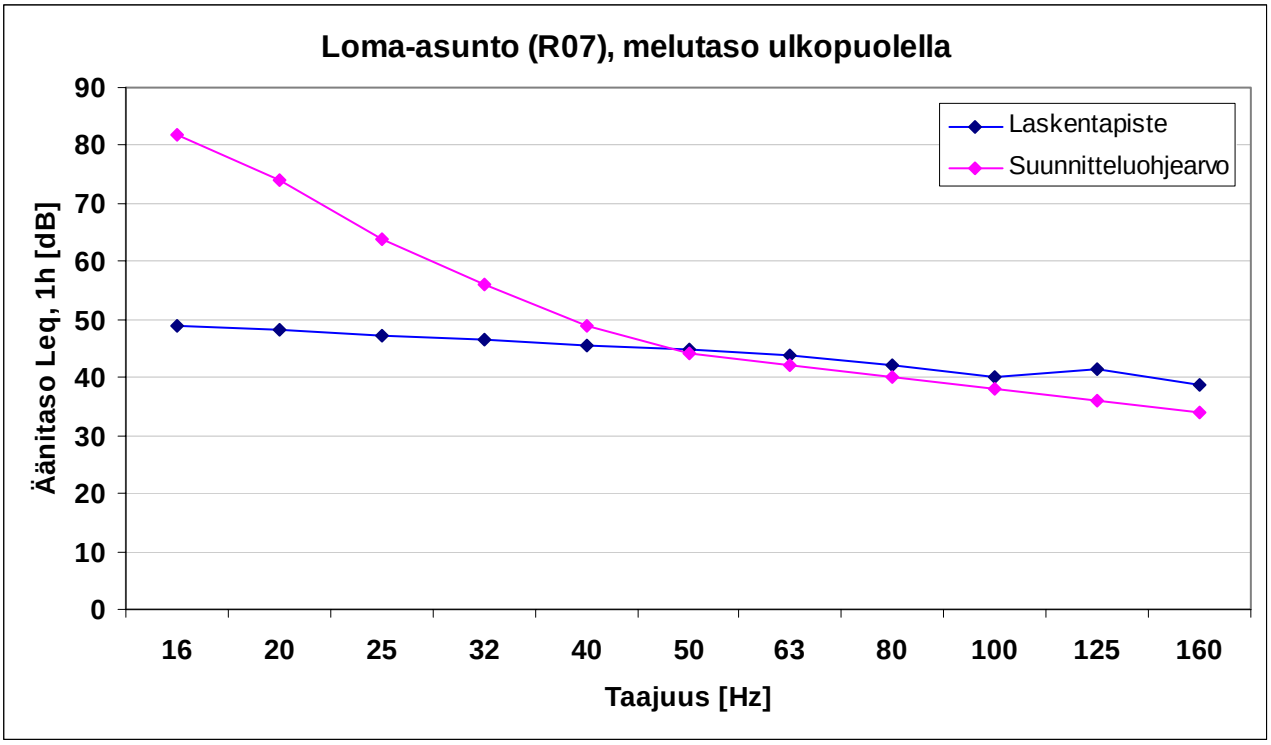
Hankevaihtoehto 1 (VE 1), Meluoptimointi



	Taajuus [Hz]										
	20	**25**	**32**	**40**	**50**	**63**	**80**	**100**	**125**	**160**	**200**
Tulos, dB	47.7	46.7	45.7	42.4	41.9	41.8	41.2	41.0	40.8	41.0	38.4
Ohjearvo, dB	82	74	64	56	49	44	42	40	38	36	34
Erotus, dB	**34.3**	**27.3**	**18.3**	**13.6**	**7.1**	**2.2**	**0.8**	**-1.0**	**-2.8**	**-5.0**	**-4.4**

Copyright © Pöyry Finland Oy

Hankevaihtoehto 2 (VE2), Meluoptimointi



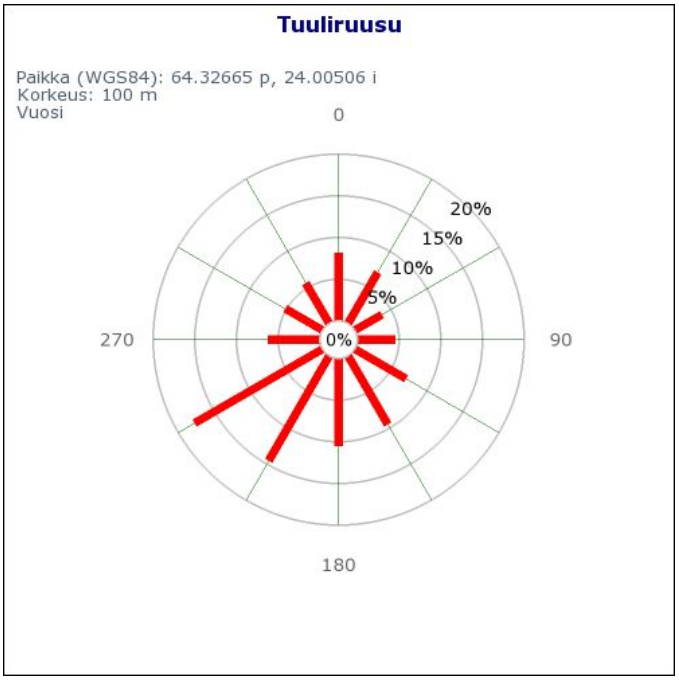
	Taajuus [Hz]										
	16	**20**	**25**	**32**	**40**	**50**	**63**	**80**	**100**	**125**	**160**
Tulos, dB	48.9	48.1	47.2	46.4	45.6	44.7	43.8	42.3	40.0	41.4	38.7
Ohjearvo, dB	82	74	64	56	49	44	42	40	38	36	34
Erotus, dB	**33.1**	**25.9**	**16.8**	**9.6**	**3.4**	**-0.7**	**-1.8**	**-2.3**	**-2.0**	**-5.4**	**-4.7**

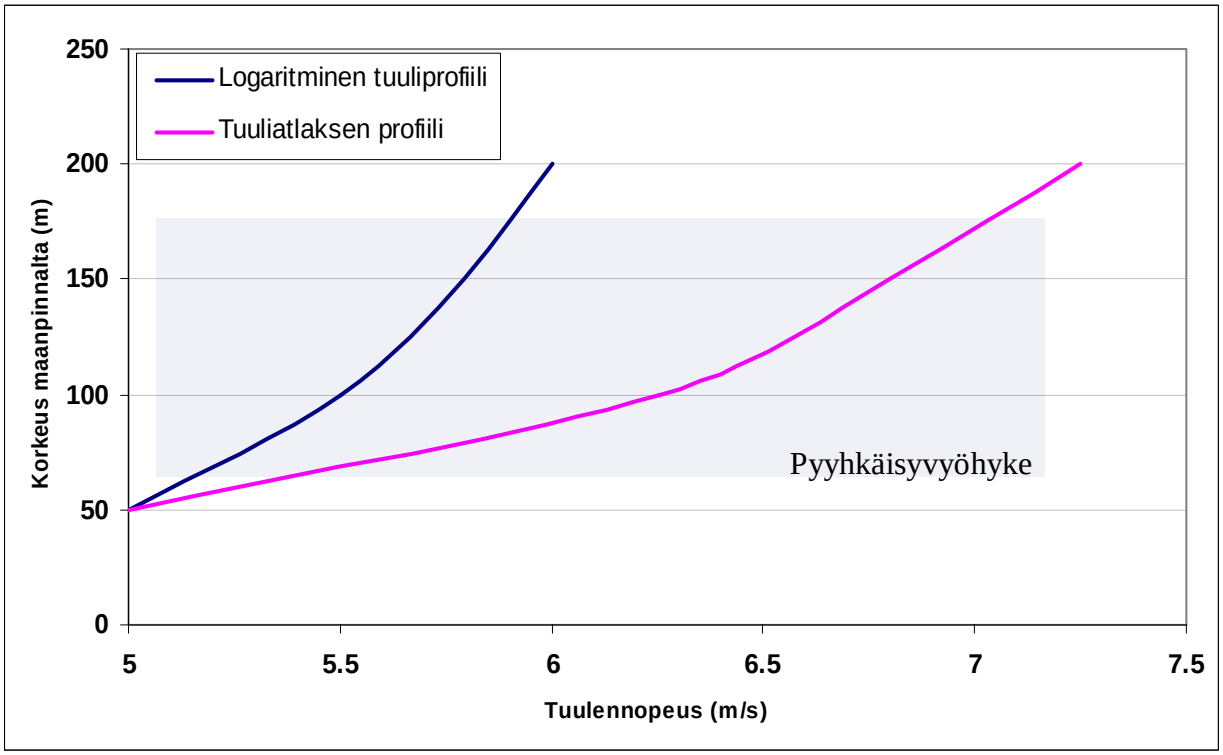
Copyright © Pöyry Finland Oy

LIITE 5

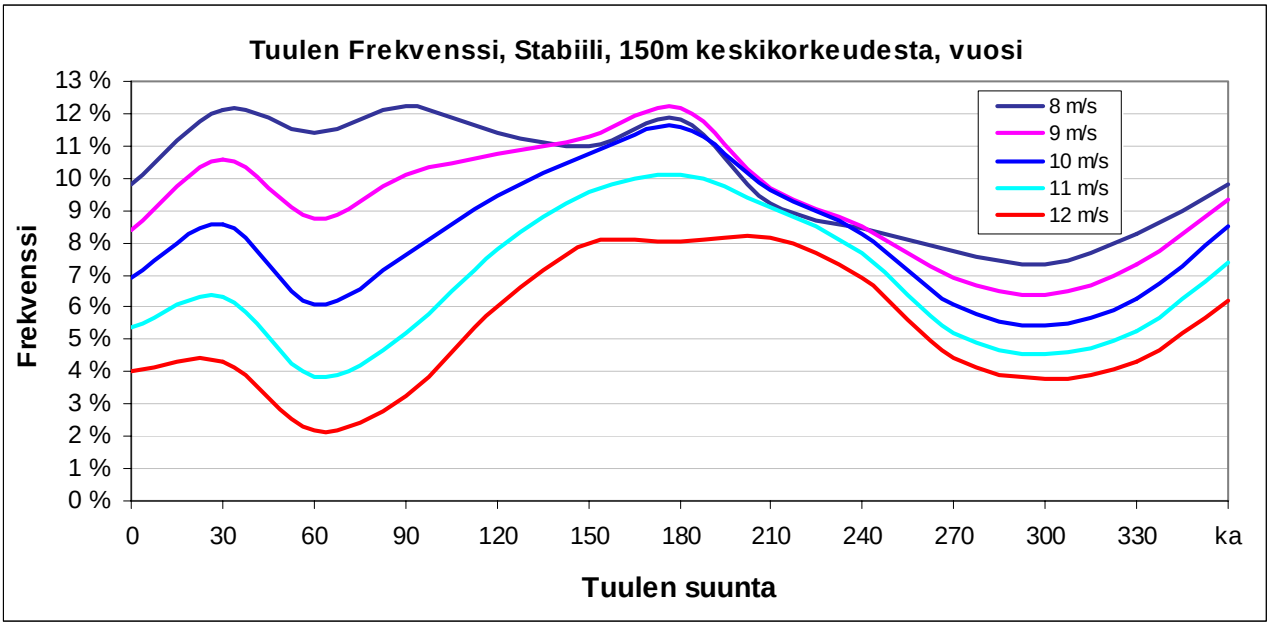
MELULASKENNASSA HÖYDYNNETTYJÄ ALUEEN TUULISUUSTIETOJA

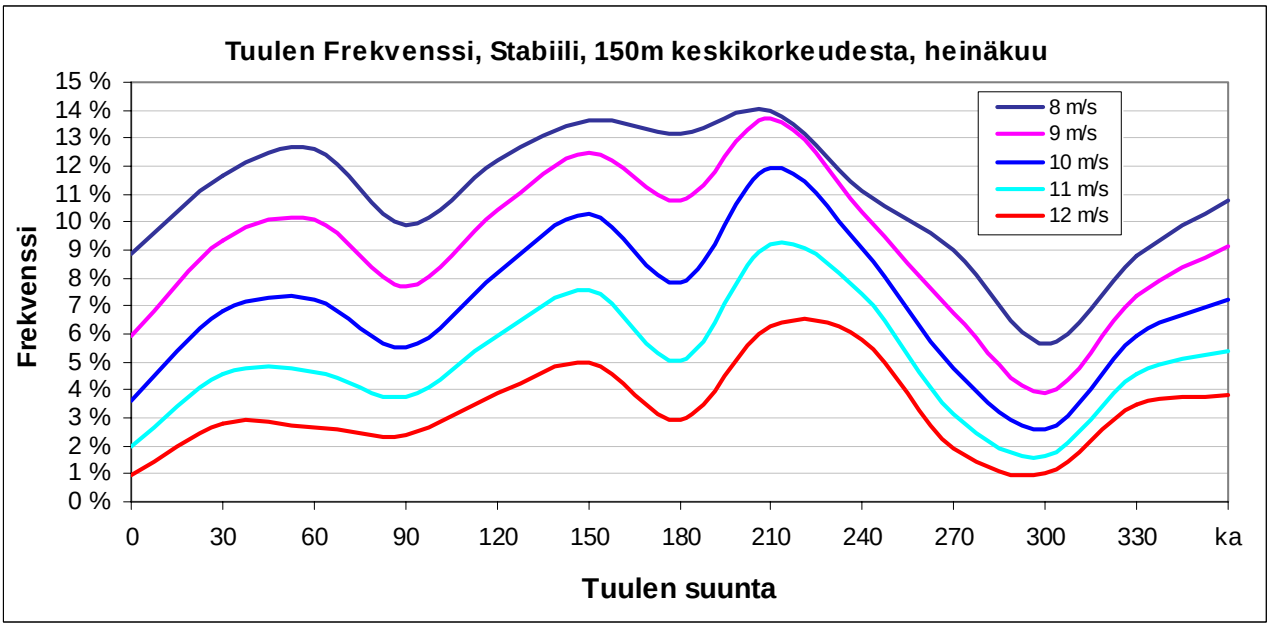
Liite 5. Melulaskennassa käytettyjä alueen tuulisuustietoja





Copyright © Pöyry Finland Oy





Copyright © Pöyry Finland Oy

LIITE 6

ÄÄNIAALLON MITTAYKSIKÖT JA YMPÄRISTÖMELU

Liite 6. Ääniaallon mittausyksiköt ja ympäristömelu

Äänen voimakkuutta mitataan käyttäen logaritmista desibeliasteikkoa (dB), jossa äänenpaineelle (eli hyvin pienelle paineenmuutokselle) käytetään referenssipainetta 20 µPa ilmalle sekä 1 µPa muille aineille.

Äänen voimakkuutta voidaan havainnollistaa seuraavalla taulukolla, jossa on esitetty kunkin äänenpainetason muutosta vastaava desibelitaso tyypillisen äänilähteen luona mitattuna.

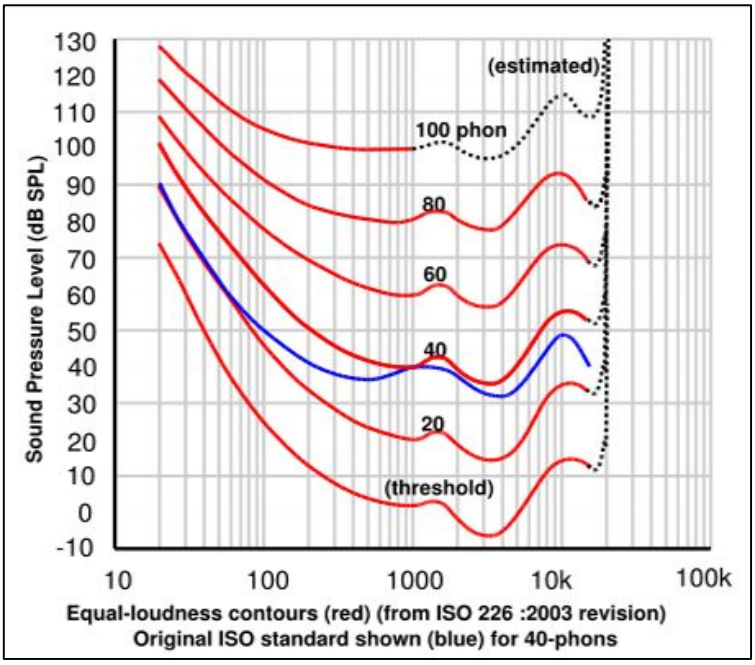
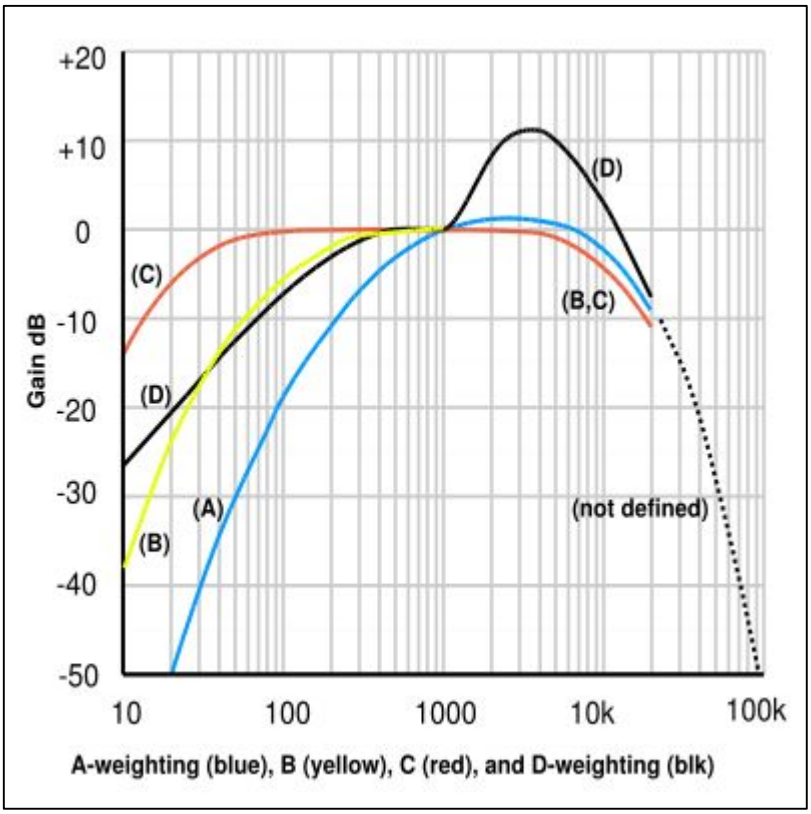
Äänenpaine, µPa	Tyypillinen äänilähde	Äänenpainetaso, dB
1 00 000 000	Suihkumoottori	134
10 000 000	Rock-konsertti	114
1 000 000	Suuri teollisuusmoottori	94
100 000	Yleistä toimistomelua	74
10 000	Toimistohuone	54
1 000	Hiljainen luontoalue	34
100	Erittäin hiljainen huone	14
20	Kuulokynnys	0

Ääni on aaltoliikettä, joka välittyäkseen eteenpäin tarvitsee aina väliaineen. Ilmassa äänellä on nopeus joka on riippuvainen ilman lämpötilasta. Eri väliaineissa ääniaalto kulkee eri nopeuksilla väliaineen ominaisuuksien mukaan. Normaali ympäristömelu sisältää useiden kohteiden yhtäaikaista ääntä, jossa äänen taajuudet ja aallonpituudet ovat jatkuvassa muutoksessa. Mittauksin voidaan kuitenkin erotella melun hetkelliset komponentit esim. taajuustarkastelulla.

Melu on sen sijaan käsite, jolla ymmärretään äänen negatiivisia vaikutuksia, ei-toivottua ääntä josta seuraa ihmisille haittaa. Melu on siis fysikaalisten mittareiden lisäksi myös hyvin pitkälti subjektiivinen käsite, jossa kuulijan omilla tuntemuksilla ja äänenerotuskyvyllä on ratkaiseva merkitys.

Kuuloaistin herkkyys vaihtelee eri taajuisille äänille, jolloin vaihtelevat myös melun haitallisuus, häiritsevyys sekä kiusallisuus. Nämä tekijät on otettu huomioon äänen taajuuskomponentteja painottamalla. Yleisin käytetty taajuuspainotus on A-painotus, joka perustuu kuuloaistin taajuusvasteen mallintamiseen ja ilmaistaan usein A-kirjaimella dimension perässä, esimerkiksi dB(A).

Liite 6_1. Vakioäänekkyyskäyriä sekä ihmisen keskimääräinen kuulokynnyskäyrä (engl. ”treshold”) ISO 226:2003 mukaan



Äänen taajuuspainotuksia. Sininen viiva vastaa A-painotusta, oranssi viiva C-painotusta.