

TUULIVOIMAMELUN LEVIÄMISEN MALLINTAMINEN

Tapio Lahti

TL Akustiikka
Hiomotie 19
00380 HELSINKI
Tapio.Lahti@TLakustiikka.fi

Tiivistelmä

Nykyohjeiden mukaan tuulivoimamelun mallilaskennassa pehmeä maanpinta mallinnetaan puolikovana. Tuulivoimamelun vakiolaskentamallin ISO 9613-2 maavaimennus on empiirinen ja se vastaa tilannetta, jossa sekä melulähde että kohdepiste ovat lähellä maanpintaa. Tuulivoimalan melu tulee kuitenkin korkealta alaviistoon, maanpintaheijastus tapahtuu ainoastaan lähellä kuulijaa ja heijastuskulma on jyrkkä. Heijastuksen vaste ei ole samanlainen kuin lähes vaakasuoraan etenevällä melulla. Esitelmässä tutkitaan heijastuksen, maavaimennuksen ja mallinnuskäytännön suhdetta. Tarkempia ennusteita kohteen äänitasosta lasketaan menetelmällä, jossa yhdistyvät sädeakustinen äänen etenemisen ja aaltoakustinen äänikentän laskenta. Laskelmia verrataan myös eräisiin pitkäaikaismittauksiin. Osoittautuu, että mallinnusohjetta on syytä hieman säätää.

1 JOHDANTO

Suomen nykyisen ohjeistuksen [1] mukaan tuulivoimalan melu lasketaan vakiolaskentamallilla ISO 9613-2 [2]. Tavallisen, akustisesti pehmeän maanpinnan tapauksessa käytetään pinnan pehmeuden (*ground factor*) arvona $G = 0,4$, vaikka mallissa pehmeän pinnan arvo on $G = 1$. Lisäksi kohde- eli kuulijapisteen korkeutena käytetään 4 m, vaikka normaali laskentakorkeus on 2 m. Mallin käytännöistä poikkeaminen johtui aikanaan havainnosta, että kun lasketaan käyttäen pehmeää maata ja todellista korkeutta, saadaan pienempi tulos kuin mittauksilla. Tuulivoimamelun mallinnusohjetta laadittaessa ei ilmeisesti tunnettu mallinnuksen taustaa. Poikkeava ohje perustuikin vain siihen, että kokeilemalla etsittiin pehmeydelle ja korkeudelle arvot, joilla vastaavuus mittauksiin saatiin paremmaksi.

Tässä esitelmässä tutkin tarkemmin, mitä tapahtuu, kun tuulivoimamelu heijastuu pehmeästä maanpinnasta eri sääoloissa, erilaisilla äänennopeuden pystygradieniteilla, ja miten vakiolaskentamallia on silloin suositeltavaa käyttää. Vastaavuus on varsin hyvä, kun pehmeä maa mallinnetaan puolikovana, mutta vakiokorkeudesta ei ole syytä poiketa.

Havainnollistan tapahtumia sädeakustisella etenemislaskelmalla sekä aaltoakustisella heijastuksen taajuusvasteen ja äänikentän laskelmalla. Ennusteiden tarkistamiseksi tarkastelen Ruotsissa 2010–2012 tehtyä pitkää tuulivoimamelun mittaussarjaa. Siinä havaittu laskenta- ja mittaustulosten keskinäinen suhde vastaa melko tarkasti tässä laskettuja tuloksia.

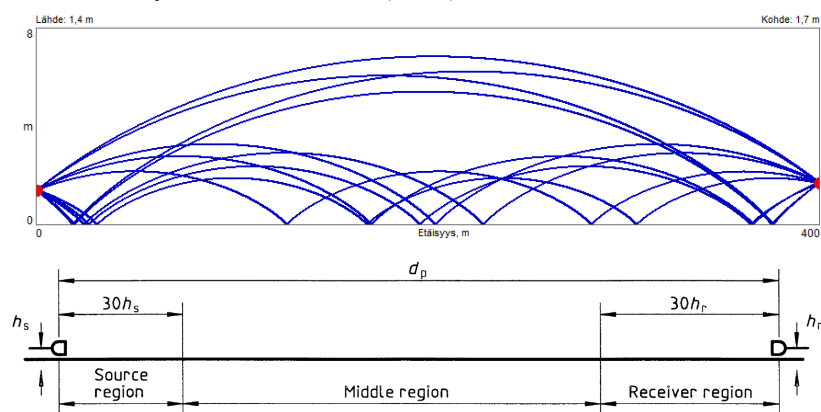
2 LASKENTAMALLIT

Tuulivoimamelun vakiolaskentamalli on ISO 9613-2. Se on yksinkertaistettu klooni yhteis-pohjoismaisesta yleisestä laskentamallista [3] ja sen samanaikaisesta hollantilaisesta sisarmallista [4]. Ne laadittiin aikanaan, noin 35 vuotta sitten vastamaan tilannetta, jossa sekä

melulähde että kohdepiste ovat suhteellisen lähellä maanpintaa. Dutch–Nordic -mallin maavaimennus on empiirinen eli sovitettu Hollannissa tehtyjen mittausten tuloksiin [5]. Osittain otettiin huomioon myös klassiset etenemismittaukset 1960-luvun puolivälistä, mm. [6].

ISO:n malli tehtiin pohjoismaisen mallin pohjalta, sitä kuitenkin harmillisesti hieman yksinkertaistaen. Pohjoismainen malli on etenemiselle suotuisen sääolojen malli (”myötätuuli-malli”), mutta ISO on neutraalin sään malli — paitsi maavaimennuksen osalta, joka on mal-leissa identtinen. Estevaimennukset eroavat sään huomioon ottamisessa, mutta juuri tuulivoimamelun tapauksessa estevaimennuksella ei ole merkitystä. Tuulivoimamelukin olisi yhtä hyvin voitu ohjeistaa laskettavaksi ISO:n sijasta pohjoismaisella mallilla. Kaikki muu ympäristömelu lasketaan Suomessa ja muissakin Pohjoismaissa omalla mallilla. Muualla maailmassa ISO:n malli on hyvin laajalti käytössä.

Mallin maavaimennuksen empiirinen muotoilu perustui seuraavaan oletukseen. Kun ääni etenee suotuisissa sääoloissa (myötätuuli tai lämpötilainversio) *lähellä maanpintaa lähes sen suuntaisesti*, se heijastuu pinnasta useita kertoja useissa eri kohdissa, lähellä lähettä, lähellä kohdetta ja usein vielä keskelläkin (kuva 1).



Kuva 1. Klassinen sädekaavio äänen heijastuksista etenemiselle suotuisassa säässä (myötätuuli 3 m/s) hyvin lähellä maanpintaa ja laskentamallien vastaava maanpinnan jako osiin.

3 VAKIOMALLIN KELPOISUUS

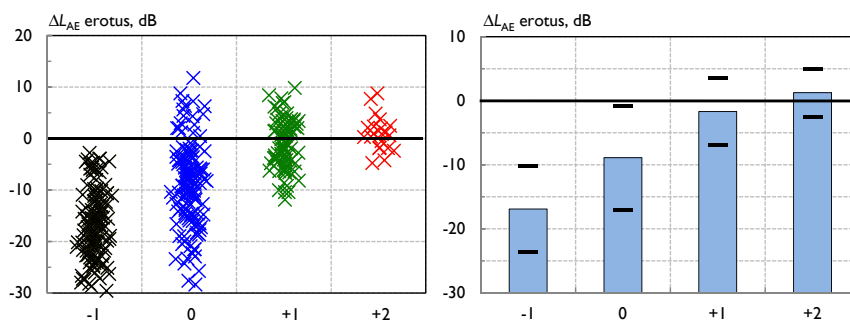
Aika ajoin julkisuudessa esitetään väite, että pohjoismainen (tai ISO:n) malli ei toimi tai kelpaa suurilla, esimerkiksi noin yli 1 km etäisyyksillä. Tämä virheellinen väite perustuu ilmeisesti itse mallissa esitettyihin varmistamattomiin ennakoarvioihin sen tarkkuudesta sekä mainintaan, että mallia ei ole *vielä verrattu* mittauksiin suuremmilla etäisyyksillä.

Mallin etenemisyhtälöt ovat perusakustiikkaa, eikä akustiikassa tapahdu mitään systemaattista muutosta, kun etäisyys kasvaa. Vain useiden eri osatekijöiden vaikutukset kasvavat, kertyvät ja korostuvat, jolloin yksittäisten *mittaustulosten vaihteluväli* kasvaa. Mittaustulosten energiakeskiarvo hyväksyttävissä sääoloissa verrattuna laskentatulokseen ei muutu.

Tässä kohdassa poikkean pääaiheesta ja esitän vakuuttavan verifiointin mallin kelpoisuudesta hyvin suurilla etäisyyksillä.

Puolustusvoimien raskaiden aseiden meluselvityksissä on vuodesta 2005 alkaen käytetty pohjoismaista mallia. (Joka on identtinen ISO-mallin kanssa, jos melu- tai maastoesteitä ei ole.) Äskettäin valmistui toistaiseksi julkaisematon yhteenvetotutkimus selvitysten mallinnusten ja mittausten eroista [7]. Tutkimukseen mukaan otettuja ampuma- ja harjoitusalueita oli 15, asetyyppejä 19 ja yhden melulähteen sekä yhden mittaus- ja laskentapisteen muodostamia pareja peräti **474 kpl**. Keskimääräinen etäisyys lähteen ja kohteen välillä oli n. **4 km** eli olennaisesti suurempi kuin tyyppillisessä tuulivoimamelun mallinnuksessa.

Tutkimuksen keskeiset tulokset on esitetty kuvassa 2. Ns. hyväksyttävissä eli etenemiselle suotuisissa sääoloissa mallinnustuloksen ja mittaustulosten energiakeskiarvon ero oli keskimäärin vain **1,7 dB** (!). Korostan, että ampumamelu etenee pitkiä matkoja lähellä maanpintaa, jolloin siihen vaikuttavat pinnan laadun ohella myös pinnan muodot eli maastoesteet, ja eteneminen on paljon herkempää sääolojen vaihteluille kuin korkeammalla.



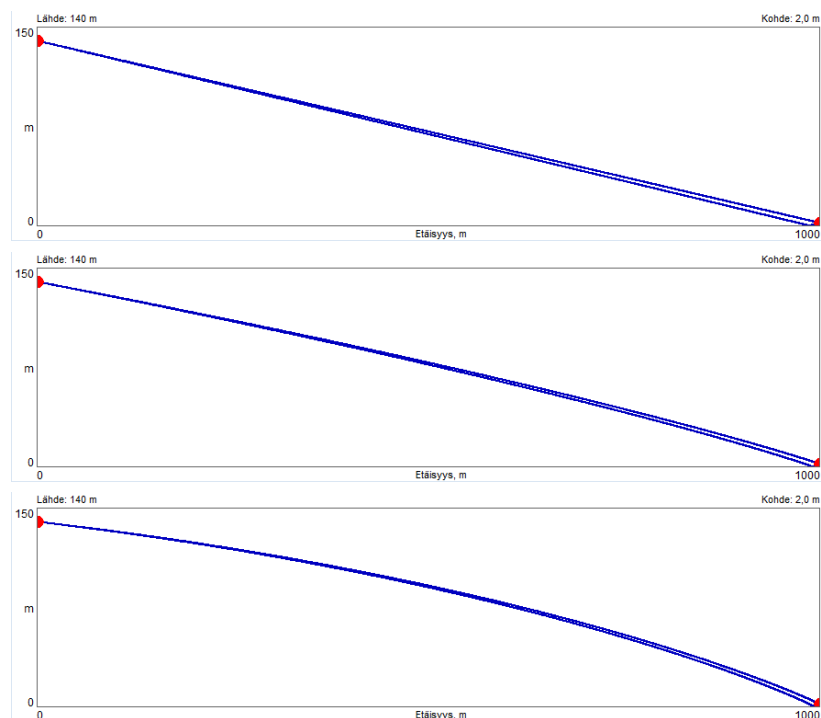
Kuva 2. Raskaiden aseiden meluselvitysten mittaus- ja laskentatulosten erotukset ($N = 474$) sääluokkien funktiona. Luokka +1: etenemiselle suotuisat eli mittaushjeiden hyväksyttävät sääolot; (vasen) kaikki yksittäiset pisteparit, (oikea) erotusten keskiarvot ja -hajonnat [7].

4 TUULIVOIMAMELUN ETENEMINEN

Edellisestä poiketen tuulivoimalan äänilähteet ovat hyvin korkealla. Ääniaalto tulee kaukanakin olevaan kuulijapisteeseen ylhäältä alaviistoon ja maanpintaheijastus tapahtuu vain aivan kohteen luona, vain muutaman metrin päässä. Maanpinta siis vaikuttaa etenemiseen ainoastaan hyvin lähellä kuulijaa. Muu maanpinta ja sen laatu ei vaikuta mitenkään etenemiseen, oli se kovaa tai pehmeää. Etenemiseen vaikuttavia esteitäkään ei käytännössä ole.

Tuulivoimamelun laskentaan käytän tässä ”retroa” mutta edelleen täysin pätevää laskentaohjelmää, jossa etenemisosa lasketaan sädeakustisesti *liikkuvan väliaineen* säde seuranta käyttäen ja heijastus sekä etenemisen taajuusvaste aaltoakustisesti maanpinnan impedanssin ja palloaallon heijastuskertoimen avulla. Ohjelma laadittiin alunperin jo 1979–81 [8, 9] ja sen toimintaperiaatteet kuvasin tiiviisti Akustiikkapäivien 2001 artikkelissani [10].

Kuvissa 3 näkyy melun etenemisen kulkureitit ja maanpintaheijastuksen kohdat kolmessa tapauksessa: neutraali (sivutuuli, pilvinen sää); päivä, epästabili sää, myötätuuli napakorkeudella 8 m/s; sekä yö, stabiili sää, myötätuuli 12 m/s ja voimakas lämpötilainversio (5 °C ero välillä 0,5–10 m). Kuvat eli äänen kulkureitit vaikuttavat olevan lähes identtisiä. Sääolot ovat kuitenkin hyvin erilaiset. Kuvien viesti on, että voimakkaatkin gradientit taivuttavat reittejä vain vähän, kun ääni ei etene vaakasuoraan pitkin maanpintaa vaan alaviistoon.



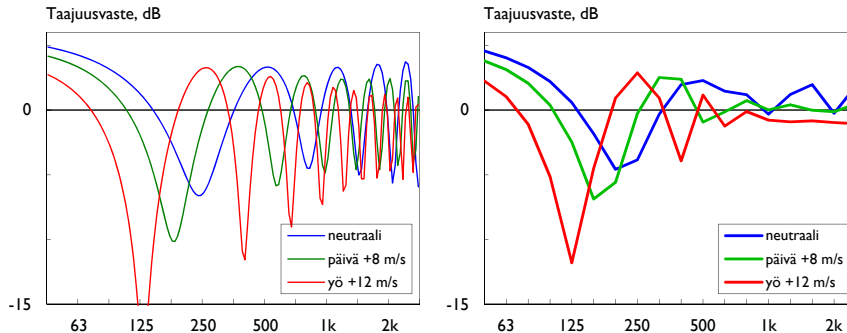
Kuva 3. Esimerkkejä äänen kulkureiteistä voimalalta kohdepisteeseen eri sääoloissa. Etäisyys 1000 m, voimalan napakorkeus 140 m, kohdekorkeus 2 m. Sää: **A** (ylä): neutraali, **B** (keski): päivä, epästabiili, myötätuuli 8 m/s napakorkeudella, **C** (ala): yö, stabiili, myötätuuli 12 m/s napakorkeudella ja lämpötilainversio lähellä maanpintaa $+0,5$ °C/m. Voimakkaista gradientteista huolimatta erot reittien kaarevuudessa ovat varsin pienet. Muita heijastuvia kulkureittejä kuin yksi ei esiinny lainkaan (vrt. kuva 1).

5 MAANPINNAN HEIJASTUS JA MAAVAIMENNUS

Alaviistoon, jyrkässä kulmassa heijastuskohtaan saapuva ääniaalto tuottaa maanpintaheijastuksen vasteen, joka ei ole samanlainen kuin lähes vaakasuoraan etenevällä melulla, mikä on laskentamallissa oletuksena. Lisäksi asiaan vaikuttaa äänennopeuden pystysuuntainen gradientti (myötätuuli + lämpötilainversio). Se vielä jyrkentää aallon saapumiskulmaa.

Kuvissa 4 on pehmeän maanpinnan heijastuksen laskettuja taajuusvasteita. Vasemman kuvan kapeakaistaisten vasteiden (1/24-oktaavikaistoittain) lähdekorkeus on 140 m, mutta terssikaistavasteet on laskettu käyttäen kolmea pistelähdettä eri korkeuksilla.

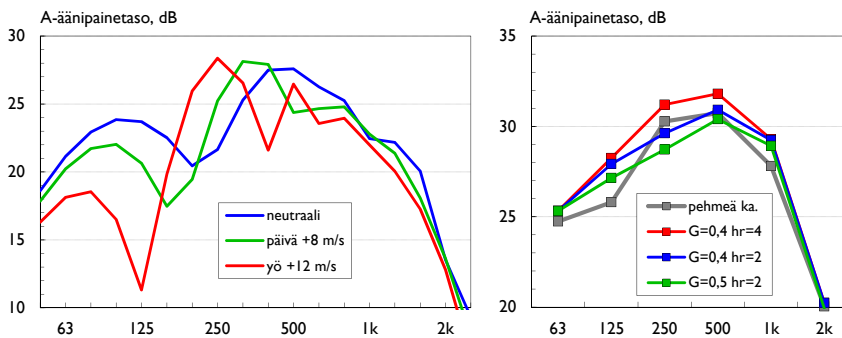
Kun melun emissiota halutaan mallintaa vakiomenetelmiä olennaisesti tarkemmin, on tarpeen sijoittaa äänilähteitä koko roottorin pyörähdyksen pyyhkäisemälle alalle, esim. [11]. Tässä tehdyssä laskennassa eri korkeuksilla olevat äänilähteet tuottavat erilaiset vastekäyrät aivan samaan tapaan kuin erisuuret gradientit kuvassa 4 (vasen).



Kuva 4. Pehmeän maanpinnan heijastuksen taajuusvasteita: etäisyys 1000 m, kohde 2 m; (vasen) 1/24-oktaavikaistoittain, lähdekorkeus 140 m; (oikea) terssikaistoittain, keskiarvo kolmesta eri lähteestä, korkeuksilla 90–190 m. Sääolot samat kuin kuvissa 3: **A:** neutraali, **B:** päivä, tuuli +8 m/s, **C:** yö, tuuli +12 m/s ja lämpötilainversio +0,5 °C/m.

Laskentamallin olettamasta pehmeän maan tavallisesta maavaimennuskuopasta ei juuri näy jälkeä taajuusvälillä 250–500 Hz. Interferenssin kampsuodin on lähes samanlainen kuin kovan maanpinnan tuottama. Mutta mikä saattaa olla vielä selvästi hämmästyttävämpää, ääniaaltoa alaspäin kaartavat gradientit eivät tuota suurempaa vastetta (ja siten äänitasoa) kohdepisteessä. Tämä tulos on ristiriidassa hyvin usein esitettyjen arveluiden kanssa.

Tämän esitelmän keskeiset tulokset ovat kohdepisteen melun spektrit kuvissa 5, jotka täydentävät edellisiä taajuusvastekuvia. Niissä verrataan melutasoja ja spektrejä, jotka on laskettu tässä käytetyllä säde/aalto-laskentaohjelmalla [10] ja ISO-mallilla. Laskentaa varten tarvittiin oletus tuulivoimalan melupäästön kokonaistasosta ja spektristä. Tarkoitukseen sopii hyvin Møller-Pedersenin [12] yleistetty päästö suurelle 5 MW tehoiselle voimalalle. Etäisyys- ja korkeusgeometria sekä sääolot ovat samoja kuin edellä.



Kuva 5. Kohteen melun A-painotettuja spektrejä: (vasen) terssi-, (oikea) oktaavispektri, laskettuina tässä käytetyllä säde/aalto-ohjelmalla ja mallilla ISO 9613-2.

Vasen kuva: pehmeän maanpinnan heijastuksen informaatio kuvasta 4 (oikea), sääolot samat kuin kuvissa 3 ja 4. Oikea kuva: harmaa käyrä on vasemman kuvan terssispektrien energiakeskiarvo oktaavikaistoittain. Muut kolme käyrää laskettu ISO-mallilla käyttäen selitteessä näkyviä maanpinnan pehmeyskäyriä G ja kohdepisteen korkeuksia h_r .

Kohteen A-äänitasoissa oktaavikaistojen 31,5 Hz sekä 2 – 4 kHz osuudet ovat merkityksettömän pieniä. Suurin paino on oktaavikaistoilla 250 ja 500 Hz. Kuva 5 (oikea) osoittaa, että mallinnusohjeen parametrivalinnat liioittelisivat kohteen melun spektriä kaikilla kaistoilla.

Kuvien 5 terssi- ja oktaavispektrejä täydentää A-äänitasojen vertailu taulukossa 1. Täysin kovan ja täysin pehmeän maanpinnan lisäksi ISO-mallilla on laskettu kolme esillä ollutta kompromissia. Maanpinnan pehmeiden ja kohdepisteen korkeuden yhdistelmä [$G = 0,4$ $h_r = 4$ m] on nykyisen ohjeen [1] mukainen. Britanniassa on ohjeistettu [13] käyttämään yhdistelmää [$G = 0,5$ $h_r = 2$ m]. Kiinnostava on myös näiden välimuoto [$G = 0,4$ $h_r = 2$ m].

Nähdään mm., että kun maanpinta on pehmeä ja sää neutraali tai myötäinen, paras vastavuus sääolojen keskiarvon ja ISO-mallin välillä saadaan parametreilla [$G = 0,5$ $h_r = 2$ m].

Taulukko 1. Kuvien 5 spektrejä vastaavat kokonais-A-äänitasot L_{pA} [dB] kohdepisteessä laskettuina tässä käytetyllä säde/aalto-ohjelmalla ja mallilla ISO 9613-2.

*Etäisyys 1000 m, kohdepisteen korkeus h_r yleensä 2 m (paitsi *), säde/aalto-laskennassa kolme lähdepistettä eri korkeuksilla 90–190 m, ISO-mallissa lähdekorkeus 140 m.*

Melupäästö: 5 MW voimala viitteestä [12], A-äänitehotaso $L_{WA} = 108,8$ dB.

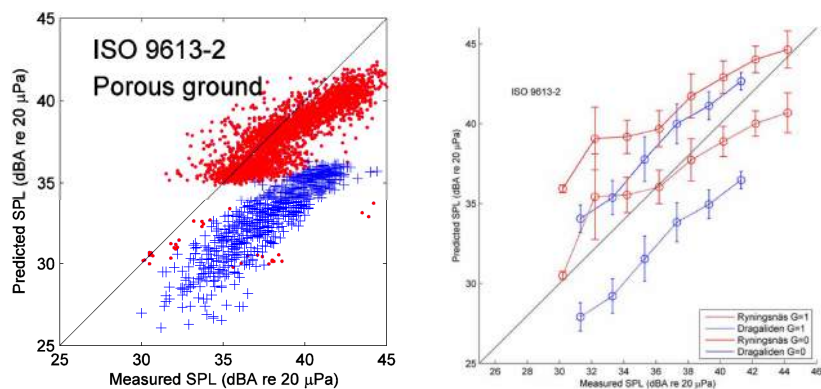
”Säde/aalto”			ISO 9613-2		
maa	sää	L_{pA} , dB	maa	kohde	L_{pA} , dB
kova	neutraali	38,1	$G = 0$	$h_r = 2$	38,4
pehmeä	neutraali	36,0	$G = 0,4$	$h_r = 4$ *	36,8
–”–	+8 m/s, 0 C°/m	35,6	$G = 0,4$	$h_r = 2$	36,1
–”–	+12 m/s, +5 C°/m	35,1	$G = 0,5$	$h_r = 2$	35,6
pehmeä	keskimäärin	35,6	$G = 1$	$h_r = 2$	33,2

6 VERTAILU MITTAUKSIIN

Laskelmien tarkistamiseksi tarkastelen Ruotsissa 2010–2012 tehtyä pitkää tuulivoimamelun mittaussarjaa [14, 15]. Kahdessa kohteessa mitattiin voimalamelua yhtäjaksoisesti peräti kahden vuoden ajan. Toinen kohteista, Dragaliden, on kiinnostavampi, koska siellä etäisyys lähimmästä voimalasta mittauspisteeseen oli selvästi suurempi, noin 1000 m.

Kaikille mittaustuloksille laskettiin vastaava mallinnustulos käyttäen kulloinkin vallinnutta tuulennopeutta vastaavaa melupäästöä ja mm. vakiomallia ISO 9613-2. Mittaus- ja laskentatulosten vertailuja tälle mallille on esitetty kuvassa 6. Kaikissa sääoloissa mittaustulokset olivat keskimäärin noin 5 dB suurempia kuin laskentatulokset. Öhlund ja Larsson toteavat [14], että jos maanpinta olisi laskennassa voitu asettaa pehmeän sijasta kovaksi, mittausten ja laskennan vastavuus olisi hyvä. He eivät kuitenkaan perustelleet, miksi niin voisi tehdä.

Tässä toistan Dragalidenin kohteen laskennan parametrien eri arvoilla. Täysin pehmeän ja täysin kovan maanpinnan laskentatulosten ero on 4,7 dB, mikä vastaa hyvin myös taulukon 1 tuloksia. Kuvassa 6 (vasen) esitetty lasketun ja mitatun melutason systemaattinen ero kumoutuisi tarkalleen, jos maanpinta vaihdetaan pehmeästä kovaksi. Oikeassa kuvassa Dragalidenin mittaussarja- ja laskentakäyrät ovat kuitenkin n. 2 dB ylempänä. Tälle ristiriidalle ei viitteistä löydy selitystä. Mahdollista voisi olla, että laskentatuloksia on korjattu vuoden 2014 loppupuolen aikana. Tällöin Ruotsin tulokset vastaisivatkin erinomaisesti taulukon 1 tuloksia ja sopivin maan pehmeiden arvo olisikin $G = 0,5$.



Kuva 6. Ruotsin mittaustulosten vertailu mallilla ISO 9613-2 saatuihin laskentatuloksiin: (vasen) viite [14], sininen: Dragaliden, maa täysin pehmeä $G = 1$; (oikea) viite [15].

Viitteessä [15] Larsson esittää lisäksi mittaustulosten vertailun Nord2000-laskentamalliin [16] sekä vielä olennaisesti tarkempaan ruotsalaiseen laskentaohjelmaan WRF-NoiseMet. Jälkimmäinen malliohjelma vaikuttaa suppean kuvauksen perusteella olevan hyvin samanlainen kuin tässä käyttämäni säde/aalto-ohjelma. Sen vertailun tulos on oikein hyvä.

Nord2000 olisi moderni, periaatteessa pätevä ja tarkka malli, mutta Larssonin vertailun tulos on selvä pettymys. Nord2000:n käyttökelpoisuutta melun laskentaan rajoittaa lisäksi se, että sitä ei ole luotettavasti sisällytetty kaikkiin yleisimpiin laskentaohjelmiin.

Toisen vertailun suuren mittaussarjan ja ISO-mallin laskennan välillä ovat esittäneet Evans ym. [17]. Siinäkin osoittautui, että ero oli hyvin pieni, kun maan pehmeys oli $G = 0,5$.

7 LOPPUHUOMAUTUKSIA

Tässä esittämäni analyysin perusteella ehdotan, että nykyisiin mallinnusohjeisiin tehdään maavaimennusta koskeva hienosäätö eli että Suomessakin siirrytään käyttämään muualla yleistä maan pehmeiden arvoa $G = 0,5$ ja laskentakorkeus palautetaan vakioarvoonsa 2 m. Muutoksella on noin 1 dB vaikutus mallinnustuloksiin.

Ohjeistettu laskentakorkeus 4 m on ollut epälooginen. Kaikki muu ympäristömelun laskenta tehdään 2 m korkeudelle. Vertailevia mittauksia ei myöskään tehdä tätä korkeutta käyttäen. Ehdottamani muutos palauttaa samalla mahdollisuuden vertailuun mittausten kanssa.

Tutkimuskirjallisuudessa on tapana toistella, että tuulivoimamelun mittaustulosten suuret vaihtelut ovat lähinnä melun leviämisen tuottamia, kuitenkin yleensä ilman perusteluja. Vaihteluiden arvellaan johtuvan sääolojen, erityisesti gradienttien vaihteluista. Tässä artikkelissa olen kuitenkin pyrkinyt osoittamaan, että itse leviämisen vaihtelut eivät olisikaan suuria, ainakaan neutraalissa ja etenemiselle suotuisassa säässä. (Epäsuotuisa sää, vastatuuli ym. äänivarjoineen, on asia erikseen.) Jäljelle jäävä selitys olisi, että vaihtelut aiheutuisivatkin *melupäästön* vaihteluista eri sääoloissa. Päästön ja leviämisen keskinäistä suhdetta vaihteluihin ei ole tutkittu kovinkaan paljon niin, että ne olisi pyritty ja pystytty separoimaan. Aivan viime aikoina on tutkimusta ollut meneillään tähänkin suuntaan [11, 18, 19, 20].

VIITTEET

- [1] Tuulivoimaloiden melun mallintaminen. *Ympäristöhallinnon ohjeita 2:2014*, Ympäristöministeriö, Helsinki 2014.
- [2] **ISO 9613-2:1996**. Acoustics — Attenuation of sound during propagation outdoors — Part 2: General method of calculation. Genève 1996.
- [3] KRAGH J, ANDERSEN B & JAKOBSEN J, Environmental noise from industrial plants. General prediction method. *Danish Acoustical Laboratory, report 32*. Lyngby 1982.
- [4] BRACKENHOFF H E A, BUIS P M & VON MEIER A, Handleiding meten en rekenen industrielaavaai. *Interdepartementale Commissie Geluidhinder, IL-HR-13-01*. Delft 1981.
- [5] BREEUWER R, MOERKERKEN A & WITMAAR G G P, Geluidoverdracht boven water en grasland. *Technisch Fysische Dienst-TNO-TH 822.708/1*. Delft 1979.
- [6] PARKIN P H & SHOLES W E, The horizontal propagation of sound from a jet engine close to the ground, at Radlett. *J Sound Vib* 1(1964)1, 1–13.
- [7] LAHTI T & MARKULA T, Raskaiden aseiden ja räjähteiden melun arviointi. *AKUKON 160018*, Helsinki 2017.
- [8] LAHTI T & TUOMINEN H T, Combined ray and wave calculation of outdoor noise propagation. *NAS-80*, Turku 10–12.6.1980, 233–236.
- [9] LAHTI T & TUOMINEN H T, Calculation of noise propagation with multiple ground reflections in an inhomogeneous atmosphere. *Inter-Noise 81*, Amsterdam 6–8.10.1981, 271–274.
- [10] LAHTI T, Äänen eteneminen ulkona – retrospektio. *Akustiikkapäivät 2001*, Espoo 8–9.10. 2001, 115–118.
- [11] TIAN Y & COTTÉ B, Wind turbine noise modeling based on Amiet’s theory: Effects of wind shear and atmospheric turbulence. *Acta Acust Acustica* 102(2016), 626–639.
- [12] MØLLER H & PEDERSEN C S, Low-frequency noise from large wind turbines. *J Acoust Soc Am* 129(2011)6, 3727–3744.
- [13] A good practice guide to the application of ETSU-R-97 for the assessment and rating of wind turbine noise. *Institute of Acoustics*, St. Albans (Englanti) 2013.
- [14] ÖHLUND O & LARSSON C, Wind turbine sound propagation in the atmospheric boundary layer – comparison between measurements and models. *BNAM 2014*, Tallinna 2–4.6.2014, 319–326.
- [15] LARSSON C, Ljud från vindkraftverk, modell–validering–mätning. Slutrapport Energimyndigheten project 32437-1. *Uppsala Universitet*, Uppsala 2014.
- [16] Proposal for Nordtest Method: Nord2000 – Prediction of outdoor sound propagation. *DELTA AV 1106/07* (rev.), Hørsholm 2014.
- [17] EVANS T, COOPER J & ALAMSHAH V, Analysis of wind turbine low frequency noise prediction accuracy. *Inter-Noise 2014*, Melbourne 16–19.11.2014.
- [18] BERTAGNOLIO F, MADSEN H Å & FISCHER A, Coupled wind turbine noise generation and propagation model: A numerical study. *7th International Conference on Wind Turbine Noise*, Rotterdam 2–5.5.2017.
- [19] BARLAS E, ZHU W J, SHEN W Z, DAG K O & MORIARTY P, Investigation of amplitude modulation noise with a fully coupled noise source and propagation model. *7th International Conference on Wind Turbine Noise*, Rotterdam 2–5.5.2017.
- [20] MCBRIDE S & BURDISSO R, A comprehensive Hamiltonian ray tracing technique for wind turbine noise propagation under arbitrary weather conditions. *7th International Conference on Wind Turbine Noise*, Rotterdam 2–5.5.2017.