

Kajaanin kaupunki/Kaavoitus
PL 133
87101 Kajaani

TUULIVOIMAMELUN

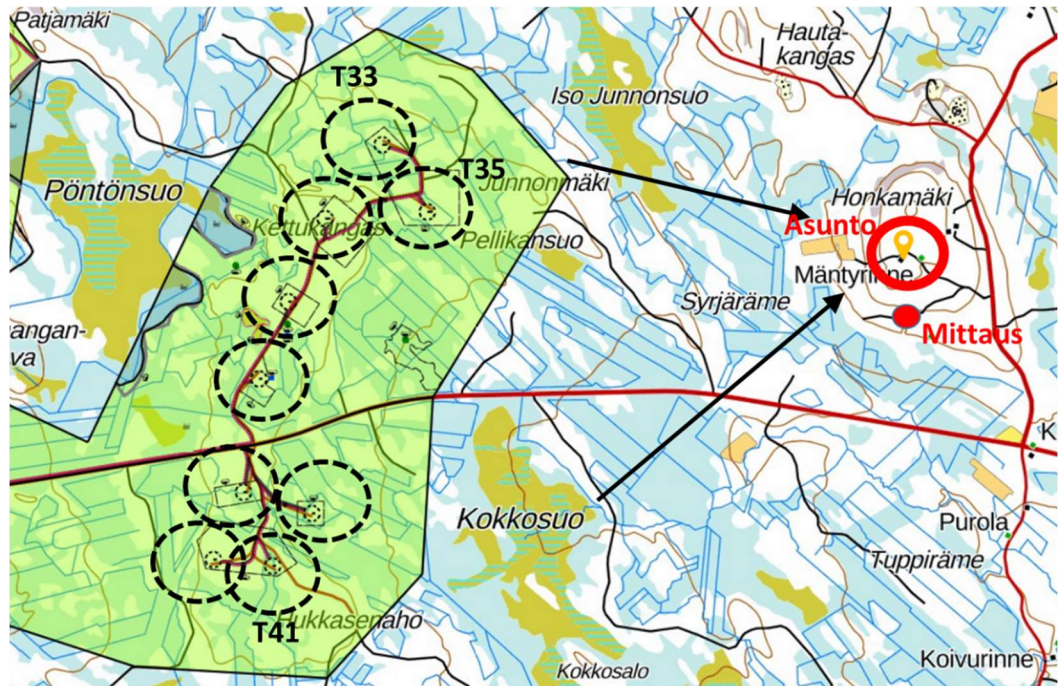
1 TILAAJA

Kajaanin kaupunki, tarjous 17.11.2022, tilaus 12.1.2023.

2 TARKOITUS

Tavoitteena oli selvittää asuinkiinteistön pihamaalla tuulivoimamelun A-taajuuspainotettu äänitason Ympäristöministeriön ohjeen 2014-4 mukaan. Mittaustuloksia verrataan Valtioneuvoston asetuksen 1107/2015 mukaisiin ulkomelutason ohjearvoihin. Tilaajan kanssa oli sovittu, että mittausta ei tehdä pihamaalla vaan jonkin matkan päässä siitä niin, että etäisyys tuulivoima-alueeseen säilyy samana.

3 KOHDE JA YMPÄRISTÖOLOSUHTEET



Kuva 1. Mittauskohde (punainen merkki) ja tuulivoimalat T33 – T41 (Ilmatar Oy). Etäisyys mittauskohteesta lähimpään tuulivoimalaan T35 on 3850 m. Muut tuulivoimalat ovat yli 4100 m etäisyyksillä mittauskohteesta. Etäisyys pihamaalta tuulivoimalaan T35 on 3800 m.

Taulukko 1. Mittauspisteiden koordinaatit (WGS-84 järjestelmä).

| Paikka | Pohjoista leveyttä | Itäistä pituutta |
|------------------------------|--------------------|------------------|
| MP1 (äänepainetason mittaus) | 64.12479 | 26.93752 |
| MP2 (digitaalinen äänitys) | 64.12476 | 26.93758 |

| Local date | Friday, Nov 08 | | | | | | | |
|----------------------|----------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Local time | 02h | 05h | 08h | 11h | 14h | 17h | 20h | 23h |
| Wind direction | ↖ | ↗ | → | → | → | → | → | → |
| Wind speed (m/s) | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 6 | 7 | 6 |
| Wind gusts (m/s) | 5 | 10 | 14 | 16 | 16 | 16 | 15 | 17 |
| Cloud cover | | | | | | | | |
| Precipitation (mm/h) | | | | | | | | |
| Precipitation type | | | | | | | | |
| Air pressure (hPa) | 1007 | 1005 | 1005 | 1005 | 1005 | 1004 | 1003 | 1002 |
| Air temperature (°C) | 2 | 3 | 5 | 7 | 8 | 8 | 7 | 6 |

Kuva 2. Mittauspäivän sääennuste tallennettuna mitausta edeltäneenä iltana (Windfinder.com).

4 AINEISTOT JA MENETELMÄT

4.1 Mittauslaitteisto

Äänenpainetasomittaukset tehtiin mittauspisteessä MP1 äänitasoanalysaattorilla (Norsonic NOR150), johon liitettiin mittausmikrofoni (Norsonic NOR 1225) ja esivahvistin (Norsonic NOR1209). Mittauslaitteisto täyttää IEC 61672 standardin Type 1 -vaatimukset ja on jäljitettävästi kalibroitu akkreditoitussa laboratorioissa.

Mittauspisteessä MP2 tallennettiin äänite digitaalisella tallentimella (RION DA-21), johon liitettiin mittausmikrofoni (G.R.A.S. 46AZ) ja esivahvistin (G.R.A.S. 26CI).

Mittauslaitteiston pienin mitattavissa oleva äänenpainetaso on luokkaa 17 dB L_{Aeq} . Mitattu taajuusalue oli 20 Hz – 10 kHz.

Mittausmikrofoni asennettiin maahan vanerista tehdyn mittauslevyn, jonka halkaisija oli 1000 mm ja paksuus 21 mm, päälle (Kuva 3). Mittauspisteessä MP1 mikrofoni oli varustettu puolipallon muotoisella primäärituulisuojalla, jonka halkaisija oli 90 mm, ja sen lisäksi puolipallon muotoisella sekundäärituulisuojalla (GFM 920.1), jonka halkaisija oli 750 mm. Mittauspisteessä MP2 mikrofoni oli mittauslevyn päällä ja varustettu puolipallon muotoisella primäärituulisuojalla (halkaisija 90 mm). Valmistajan ilmoituksen mukaan tuulisuojiin aiheuttama vaimennus mitattuun äänenpainetasoon on yhteensä alle 1 dB taajuusalueella 20 Hz – 10 kHz.



Kuva 3. Mittausmikrofonit asennettuna mittauslevyjen päälle kohteessa. Mittauspisteen MP1 (oikealla) mikrofonissa käytettiin primääri- ja sekundäärituulisuojia. Mikrofonit oli kytketty suoraan äänitasomittariin. Mittapisteessä MP2 (vasemmalla) mikrofonissa käytettiin vain primäärituulisuojaa ja mikrofonit oli kytketty digitaaliseen tallentimeen. Voimalat ovat metsän takana. Mittauspisteiden koordinaatit ovat taulukossa 1.

4.2 Äänenpainetason mittaukset

Äänenpainetason mittaus tehtiin 3 mittausjaksossa:

- Mittausjakso 1: kokonaismelu, kello 11:50 – 12:51
- Mittausjakso 2: taustamelu, kello 12:55 – 13:52
- Mittausjakso 3: kokonaismelu, kello 13:58 – 15:03

Kokonaismelun äänenpainetason $L_{Aeq,10s,T}$ mittauksen aikana tuulivoimalat T33 – T41 olivat käynnissä. Kokonaismelun äänenpainetaso sisältää tuulivoimaloiden aiheuttamat äänet ja taustamelun.

Taustamelun äänenpainetason $L_{Aeq,10s,B}$ mittauksen aikana tuulivoimalat T33 – T41 olivat pysäytettyinä. Taustamelu sisälsi tieliikenteen aiheuttamaa melua (valtatie 28 noin 850 m päässä) sekä luonnon ääniä, lähinnä tuulen kasvillisuudessa aiheuttamaa suhinaa.

Mittapisteessä MP1 äänenpainetasot määritettiin 10 sekunnin painottamattomina ekvivalenttiäänepainetasoina, $L_{eq,i,10s}$, 1/3-oktaavikaistoilla $i = 20 \text{ Hz} - 10 \text{ kHz}$. Näistä aineistoista määritettiin A-taajuuspainotetut ekvivalenttiäänepainetasot, $L_{Aeq,10s}$, joiden tarkasteluun tulokset pohjautuvat. Sähköntuottoteho, tuulen nopeus ja suunta saatiin tuulivoimaloiden operaattorilta (Ilmatar Oy, Petteri Ollikainen) koskien voimaloita T33 – T41.

Melutapahtumia havainnoitiin lisäksi kuulonvaraisesti mittauksen aikana mittapisteiden välittömässä läheisyydessä. Pisteessä MP2 digitaalisesti tallennetusta äänitteestä on mahdollista tarkistaa yksittäisiä melutapahtumia koskien sekä tausta- että kokonaismelun äänenpainetason mittausjaksoja.

Kokonaismelun äänenpainetasoon, $L_{Aeq,10s,T}$, ja taustamelun äänenpainetasoon, $L_{Aeq,10s,B}$, tehtiin Ympäristöministeriön ohjeen 2014-4 mukainen -6 dB korjaus, koska mittaus tehtiin maan pinnalla mittauslevyn päällä.

4.3 Tuulen nopeuden määrittäminen

Tuulen nopeus ja suunta 155 m korkeudella sekä sähköntuottoteho saatiin tuulivoimaloilta T33 – T41 yhden sekunnin jaksoissa mitattuna. Näistä laskettiin 10 sekunnin keskiarvot, jotka yhdistettiin äänenpainetasodataan. Tuulivoimalan kellonaika ja äänitasoanalyysaattorin kellonaika tarkistettiin vertaamalla Suomen viralliseen aikaan (VTT Mikes Metrologia). Tuulivoimalan data synkronoitiin äänenpainetasojen analysoinnissa ± 1 sekunnin tarkkuudella. Arvioitu aikasyntronointivirhe on siten alle 0,5 sekuntia.

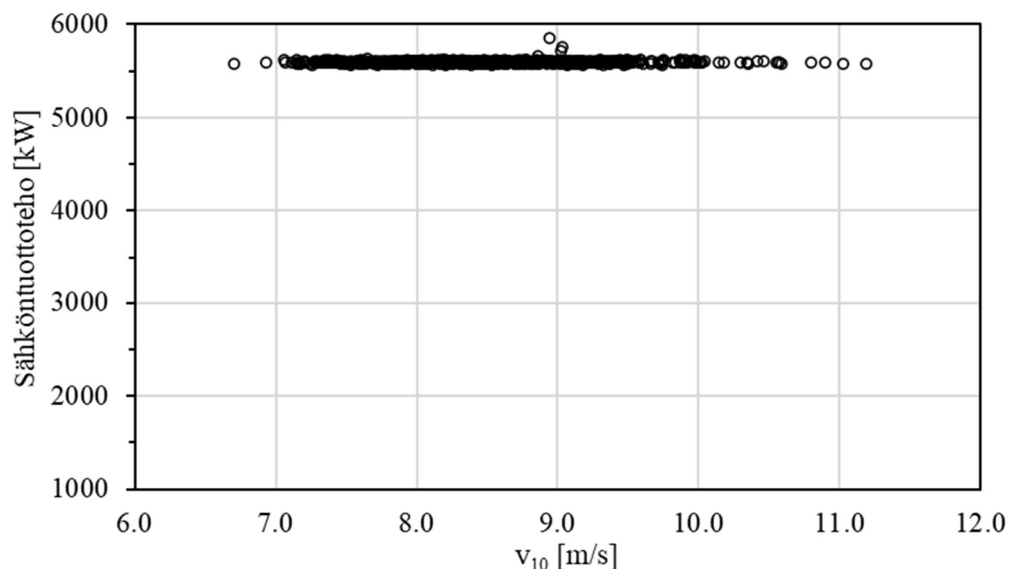
Tuulen nopeus v_h [m/s] tuulivoimalan napakorkeudella 155 m saatiin tuulivoimalan operaattorilta. Normalisoitu tuulen nopeus 10 m korkeudella, v_{10} [m/s], määritettiin yhtälöllä

$$v_{10} = v_h \frac{\ln(z_{ref}/z_0)}{\ln(h/z_0)} \approx 0,65906v_h, \quad (1)$$

missä $z_{ref} = 10$ m, $h = 155$ m ja $z_0 = 0,05$.

Operaattorin toimittama tieto tuulivoimaloiden sähköntuottotehosta ja tuulen nopeudesta napakorkeudella esitetään liitteessä 1. Sähköntuottoteho oli koko mittausajan yli 90 % tasolla, ja tuulivoimalan melupäästö on ollut riittävän korkea, jotta siitä voidaan luotettavasti määrittää äänenpainetaso nopeudella $v_{10}=8$ m/s.

Kuvassa 4 esitetään esimerkkinä tuulivoimalan T33 sähköntuottoteho normalisoidun tuulen nopeuden v_{10} funktiona mittausjakson aikana.



Kuva 4. Tuulivoimalan (T33) sähköntuottoteho normalisoidun tuulen nopeuden v_{10} funktiona mittausjaksojen 1 ja 3 aikana. Kukin ympyrä edustaa 10 sekunnin datapistettä (sähköntuottoteho vs. tuulen nopeus v_{10}) melumittauksen aikaväleillä, jotka kerrottiin kohdassa 4.2. Voimalan T33 maksimaalinen sähköntuottoteho on 5,6 MW.

4.4 Mittausepävarmuus

Mittaustulosten epävarmuuteen vaikuttavat mittauslaitteisto, menetelmät, mittausympäristö, sääolosuhteet ja taustamelun äänenpainetasot. IEC 61400-11 standardin mukaan epävarmuutta tarkastellaan tyyppin A ja B epävarmuuksina.

Tyyppin A epävarmuus u_A arvioidaan tilastollisin menetelmin toistettujen mittausten kautta.

Tyyppin A epävarmuus u_A A-taajuuspainotetulle äänenpainetasolle tuulen nopeusalueella $k = 8$ m/s määritettiin yhtälöllä

$$u_A = \sqrt{\frac{\sum (L_{Aeq,j,k} - \bar{L}_{Aeq,k})^2}{N(N-1)}}, \quad (2)$$

missä N oli 10 sekunnin mittausperiodien j kokonaismäärä.

Tyyppin B epävarmuus u_B määritetään hyödyntäen oleellista informaatiota eri epävarmuuslähteistä IEC 61400-11 Annex C mukaan. Tässä huomioidaan esimerkiksi mittalaitteen ja sen kalibroinnin tarkkuus, mittausjärjestelyn vaikutus ja ympäristöolosuhteiden vaikutus.

Kokonaisepävarmuus u_C A-taajuuspainotetulle äänenpainetasolle tuulen nopeusalueella k määritettiin yhtälöllä

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}, \quad (3)$$

Tyyppin A epävarmuusarvio tuulen nopeusalueella $k = 8$ m/s oli $\pm 4,2$ dB ja tyyppin B epävarmuusarvio $\pm 0,7$ dB.

Kokonaisepävarmuus on siten $\pm 4,3$ dB.

5 OHJEARVOT

Valtioneuvoston asetus 1107/2015 määrittää tuulivoimaloiden melulle taulukon 2 mukaiset enimmäisarvot. Ohjearvot koskevat A-taajuuspainotettua keskiäänitasoa melulle altistuvalla alueella.

Taulukko 2. Ulkomelutason L_{Aeq} enimmäisarvot päivällä klo 7–22 ja yöllä klo 22–7.

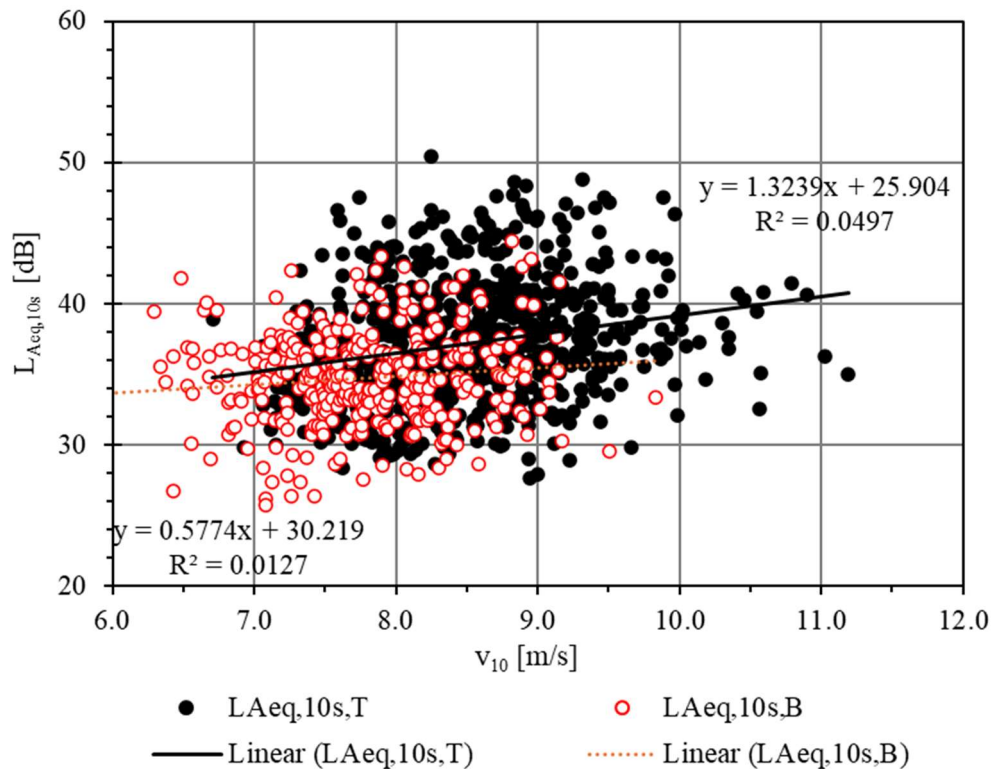
| | L_{Aeq} [dB] päivällä | L_{Aeq} [dB] yöllä |
|------------------|-------------------------|----------------------|
| pysyvä asutus | 45 | 40 |
| loma-asutus | 45 | 40 |
| hoitolaitokset | 45 | 40 |
| oppilaitokset | 45 | – |
| virkestysalueet | 45 | – |
| leirintäalueet | 45 | 40 |
| kansallispuistot | 40 | 40 |

Jos tuulivoimalan melu on impulssimaista tai kapeakaistaista melulle altistuvalla alueella, valvonnan yhteydessä saatuun mittaustulokseen lisätään korjaus +5 dB.

6 MITTAUSTULOKSET

Äänenpainetasot normalisoidun tuulen nopeuden v_{10} funktiona esitetään kuvassa 5. Ohjeen mukaan tarkasteltava tuulen nopeus on $v_{10}=8$ m/s. Kuvan 5 sovituskäyrien mukaan tällä tuulen nopeudella

- Kokonaismelun äänenpainetaso on $L_{Aeq,T} = 36,5$ dB
- Taustamelun äänenpainetaso on $L_{Aeq,B} = 34,8$ dB



Kuva 5. Kokonaismelun äänenpainetaso $L_{Aeq,10s,T}$ ja taustamelun äänenpainetaso $L_{Aeq,10s,B}$ normalisoidun tuulen nopeuden v_{10} funktiona mittauspisteessä MP1 mittausjaksojen aikana. Kukin mittapiste edustaa 10 sekunnin ekvivalenttia A-äänepainetasoa. Molempiin datajoukkoihin on sovitettu suora (katkoviivat Linear), jolta voidaan lukea äänenpainetaso valitulla normalisoidulla tuulen nopeudella.

Kuvan 5 perusteella taustamelun äänenpainetaso oli hyvin lähellä kokonaismelun äänenpainetasoa. Koska äänenpainetasojen ero oli alle 3,0 dB, voi taustamelukorjaus olla enintään 3,0 dB. Tämän nojalla tuulivoimaloiden T33 – T41 tuottama taustamelukorjattu A-taajuuspainotettu ekvivalentti äänenpainetaso piha-alueella oli enintään

$$L_{Aeq,10s,Tc} = L_{Aeq,10s,T} - 3,0 \quad (4)$$

missä $-3,0$ dB on taustamelun äänenpainetasosta johtuva korjaus ja $L_{Aeq,10s,T}$ määritettiin Kuvan 5 sovitetulta suoralta normalisoidun tuulen nopeuden v_{10} kohdasta 8 m/s.

Yhtälön (4) mukaan tuulivoimaloiden T33 – T41 aiheuttama A-taajuuspainotettu ekvivalenttiäänepainetaso piha-alueella on enintään **33,5 dB** L_{Aeq} tuulen nopeusalueella $k = 8$ m/s.

Mittausepävarmuus 4,3 dB huomioiden samassa paikassa ympäristöministeriön ohjeen 4-2014 mukaan tehdyn mittauksen tulos on 95 % todennäköisyydellä välillä 29,2–37,8 dB, jos mittaus uusittaisiin. Mittaustulos alittaa yöajan ohjearvon 40 dB (Taulukko 2).

Tuulivoima-alueen ääni ei erottunut taustamelusta mittauspisteissä, joten kapeakaistaisuuteen tai impulssimaisuuteen ei voida ottaa kantaa.

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tuulivoimaloiden T33 – T41 aiheuttama äänitaso 33,5 dB L_{Aeq} mittauspisteessä MP1 ei ylitä Valtioneuvoston asetuksen 1107/2015 ohjearvoja koskien pysyvän asutuksen kiinteistöjä.

Mittauspiste MP1 sijaitsi 3850 m tuulivoimaloista. Vapaa-ajan asunto sijaitsi 3800 m tuulivoimaloista. Etäisyys on 1 % tarkkuudella sama. Näin pienellä etäisyysrolla ei ole mitattavissa olevaa vaikutusta äänenpainetasoon. Sen vuoksi voidaan arvioida, että mittauspisteessä MP1 saatu johtopäätös pätee myös kiinteistöillä.

8 ALLEKIRJOITUKSET



Valtteri Hongisto
tutkimusryhmän vetäjä



Jukka Keränen
erikoistutkija

Turun ammattikorkeakoulu,
Akustiikkalaboratorio

LIITTEET

1. Tuulivoimaloiden sähköntuottoteho
2. Tuulen nopeus tuulivoimaloiden napakorkeudella

KIRJALLISUUS

- Ympäristöministeriö (2014). Tuulivoimaloiden melutason mittaaminen altistuvassa kohteessa. Ympäristöhallinnon ohjeita 4/2014, Helsinki. <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10138/42939>.
- Valtioneuvoston asetus 1107/2015 tuulivoimaloiden ulkomelutason ohjearvoista. <https://www.edilex.fi/smur/20151107>.
- IEC 61400-11-2012 Wind turbines — Part 11: Acoustic noise measurement techniques
- ISO1996-2-2017 Acoustics — Description, measurement and assessment of environmental noise — Part 2: Determination of sound pressure levels

