

AKKREDITOIDUT RUNKOMELU- JA TÄRINÄMITTAUKSET

Sakari Tervo¹, Jukka Pätynen, Henri Penttinen, Timo Peltonen

¹ Akukon Oy
Hiomotie 19, 00380 Helsinki
sakari.tervo@akukon.com

Tiivistelmä

Akkreditoituidut mittaukset mahdollistavat tulosten luotettavan vertailun ja arvioinnin. Akkreditoitun toimijan tulee osoittaa muun muassa, että mittauksia suorittavat pätevät henkilöt, joita koulutetaan, laitteet on kalibroitu, mittausmenetelmä perustuu standardeihin ja toiminta on dokumentoitu. Suomessa rakennusakustisia mittauksia on tehty akkreditoitusti 2010 alkaen. Ihmisten viihtyvyyteen vaikuttavaan ja tärinäherkkien laitteiden tärinään ja runkomeluun liittyviä mittauksia ei ole aiemmin tehty akkreditoitusti. Tässä artikkelissa käsitellään akkreditoituja tärinän ja runkomelun mittauksia, jotka liittyvät värähtelyn vaikutuksiin ihmisten viihtyvyyteen rakennuksissa ja tärinäherkkiin laitteisiin. Kun käytettävä mittauskalusto, mittaajat ja menetelmien pätevyys on todettu, myös pienien värähtelytasojen mittaaminen voidaan tehdä luotettavasti.

1 JOHDANTO

Runkomelun ja tärinän mittaamiseen, eristykseen ja ohjearvoihin on kiinnitetty huomiota ympäristöministeriön julkaisemassa rakennuksen ääniympäristöasetuksen 796/2017 soveltamisohjeessa [1]. Runkomelun ja tärinän mittaaminen sekä torjuntatoimet ovat lisääntyneet viimeisinä vuosikymmeninä kun rakentaminen on lisääntynyt raideliikenteen lähistöllä ja rakentaminen on tiivistynyt.

Runkomelun ja tärinän mittaus on edelleen tarkin ja paras tapa arvioida rakennukseen siirtyvän värähtelyherätteen suuruutta. Mallinnuksen epävarmuudet ovat selvästi suuremmat kuin mittauksen. Silti värähtely- tai äänimittauksiin perustuva arvio on erittäin haastavaa. Sen vuoksi on suositeltavaa, että mittaukset tehdään huolellisesti ja dokumentoidusti ja että niiden sisältämät epävarmuudet tiedostetaan.

Tässä artikkelissa esitellään akkreditoituihin runkomelun ja tärinän mittauksiin liittyviä termejä, määritteitä, dokumentointia sekä epävarmuuslaskentaa.

1.1 Tunnusluvut

Raideliikenteen tapauksessa **runkomelun** tunnusluku L_{prn} on kaikkien raideliikenteestä aiheutuvien runkomelutapahtumien 95. persentiili. Yksittäisen runkomelutapahtuman arvo on A-taajuuspainotetun ja S-aikapainotetun signaalin enimmäisarvo L_{ASmax} . Normaalijakautuneelle datalle tunnuslukua L_{prn} voidaan arvioida keskiarvo- ja varianssiestimaattien avulla [2].

Tärinän tunnuslukuna käytetään 15 merkittävimmän herätteen aiheuttaman herätteen 95. persentiiliä $v_{w,95}$. Tämä voidaan laskea normaalijakautuneelle datalle keskiarvo- ja varianssiestimaattien kautta [3]. Standardissa ISO 2631-2 [4] on kuvailtu eri tapauksissa käytettävät taajuuspainotukset. Kuten runkomelulle, myös maaliikenteen aiheuttamalle tärinälle käytetään S-aikapainotusta.

Taustavärähtelyn osalta tarkastellaan värähtelynopeuden keskiarvoa v_{rms} tai enimmäisarvoa v_{peak} . Tyypillisesti kyseessä on taajuuspainottamaton terssikohtainen värähtelynopeus.

2 SUOSITUKSET JA OHJEARVOT

Sekä runkomelulle että tärinälle on määritelty ohjearvot, jotka perustuvat tutkimuksiin siitä kuinka häiritsevänä kutakin melu- tai tärinätaapahtumaa pidetään. Häiritsevyys on subjektiivista ja ohjearvot näin ollen ohjaavat maankäytön tai rakennusten tarkempaa suunnittelua. Toiset ihmiset voivat olla melulle tai tärinälle selkeästi herkeämpiä kuin mitä ohjearvot olettavat ja toiset taas eivät häiriinny vaikka ohjearvot ylittyisivätkin.

2.1 Maaperäinen runkomelu

Rakennuksen ääniympäristöasetuksen soveltamisohjeessa annetaan asuntojen runkomelutasolle L_{prn} ohjearvo 30 dB ja avoradoilla 35 dB. Samoja arvoja suositellaan majoitus-tiloille hoito- ja sosiaalialalla. Kokoontumis- ja opetustilojen suositeltu runkomelutaso on 40 dB ja toimistoille, liiketiloille sekä esimerkiksi näyttelytiloille suositellaan runkomelutasoa 40 dB ja avoradoilla 45 dB [2].

2.2 Liikennetärinä

Ympäristöministeriön asetuksen rakennuksen ääniympäristössä (706/2017) ohjeessa annetaan asuntojen tärinätasolle $v_{w,95}$ ohjearvo 0,3 mm/s. Liiketiloille suositusarvo on 0,6 mm/s [3].

2.3 Taustavärähtely

Taustavärähtelyn mittaus tulee kyseeseen kun suunnitellaan tärinälle herkkien laitteiden tai rakennusten sijoittelua. Taustavärähtelyn suositus- ja suunnitteluarvoina käytetään tyypillisimmin värähtelykriteerien (VC) luokkia (A,B,...E) [5]. Laittevalmistajat voivat esimerkiksi ilmoittaa, että laite toimii sille suunnitellulla tavalla kun värähtelyluokka asennuspinnassa on VC-C. Muitakin kriteerejä käytetään, mutta VC-luokat ovat enenevissä määrin yleistymässä.

Värähtelyluokista VC-A sallii enimmillään 50 $\mu\text{m/s}$ terssikaistaisen tehollisen värähtelynopeuden taajuusalueella 8...80 Hz. Kussakin seuraavissa luokissa värähtelynopeuden raja-arvo puolittuu.

3 MENETELMÄT JA STANDARDIT

Värähtelymittauksissa käytettävän laitteiston tulisi täyttää standardin ISO 8041 vaatimukset, äänitasomittareiden ja kalibraattoreiden standardien IEC 60942 ja IEC 61672 vaatimukset.

Runkomelun ja tärinän mittaamisesta on annettu ohjeita standardissa ISO 14387-1 [6]. Ohje on hyvin seikkaperäinen ja siinä suositellaan dokumentoitavaksi muunmuassa olosuhteet, mittauspisteet, junatyytit ja arvio värähtelyn etenemisreitistä ja aaltotyyppistä. Tärinän osalta standardit ISO 2631-1 ja 2631-2 [4, 7] käsittelevät yleisiä vaatimuksia tärinän mittaamiselle ja taajuuspainotuksia. Taajuuspainotuksissa otetaan huomioon ihmisen herkkyyks tärinälle eri taajuuskomponenteille ja eri suunnissa.

3.1 Tunnuslukuihin ja mittauksiin liittyvä pohdinta

Runkomelun osalta standardissa ISO 14837 todetaan, että runkomelua voidaan mitata myös kiihtyvyyssanturien avulla mikrofonien sijaan. Äänitasona runkomelun mittaaminen sisältää suuria epävarmuuksia johtuen huoneakustiikasta, mahdollisista julkisivun läpikantautuvista junan äänistä, sekä runkomelun pienestä äänitasosta. Kuitenkin tarkastelualueena L_{prn} viittaa ilmaäänä mitattuun tasoon, joten kiihtyvyyssantureilla suoritettavat mittaukset edellyttävät vähintäänkin arvion siitä kuinka värähtelyheräte kytkeytyy ilmaääneksi kussakin huonetilassa. Muunnos rakenteellisen värähtelyn ja sen tuottaman äänitason välillä on monimutkainen ja voi itsessään sisältää suurempia epävarmuuksia kuin suoraan ilmaäänä mitattava runkomelu. Suositeltavinta lieneekin mitata runkomelua sekä kiihtyvyyssantureilla että mikrofoneilla yhtäaikaaisesti.

VTT:n tiedotteessa [2] on käsitelty runkomelun arviointia ISO 14387-1 standardin pohjalta. Standardissa todetaan, että mikäli keskihajonta viiden saman tyyppin junan kohdalla on yli 2 dB tulisi junien aiheuttaman runkomelun otoskoon olla suurempi. Standardissa tai VTT:n ohjeessa ei kuitenkaan todeta, mikä on riittävä määrä junia. Viiden junan luonnollinen, esimerkiksi pyöristä, nopeudesta ja etäisyydestä johtuva hajonta on todellisessa mittaustilanteessa poikkeuksetta yli 2 dB mikäli kyseessä ei ole sama junayksilö joka ajaa lähes samalla nopeudella, samalla raiteella ja samaan suuntaan. Tällaista tilannetta ei tiheästi liikennöidyillä väylillä Suomessa ole. Tilanne on ainoastaan mahdollinen harvoin liikennöidyillä väylillä, joissa yksi ja sama juna kulkee yhtä reittiä päivästä toiseen.

Tilastollisesti voidaan perustellusti määrittellä, että L_{prn} on rataosuudella kulkevien kaikkien junien aiheuttaman runkomelun enimmäistason L_{ASmax} 95. persentiili. Tästä lähtökohdasta tarkasteltuna havaitaan heti, että mikäli otoskoko on pienempi kuin koko perusjoukko, tarkastelujoukon rajallinen lukumäärä aiheuttaa 95. persentiilin arvioinnissa epävarmuuden. Mikäli mittaussuureilla L_{ASmax} on jokin tunnettu jakauma, voidaan osajoukon aiheuttama epävarmuus suureeseen L_{prn} todeta laskennallisesti. Toteamista varten mittaaja joutuu arvioimaan esimerkiksi mittausten avulla olosuhteiden vaikutuksen mittaussajanjaksolla, jossa kaikki junat kulkevat rataosuuden. Esimerkiksi, tiedetään, että junan nopeudella ja junan pyörien kunnolla on suuri vaikutus L_{ASmax} -tasoihin.

Tärinän mittaamisessa VTT:n tiedotteessa 2278 ehdotetaan [3], että tärinää tarkastellaan viikon pituisissa jaksoissa ja viikon sisällä esiintyvistä junista valitaan 15 merkittävimmän herätteen aiheuttanutta junaa, joista lasketaan edelleen tärinän tunnusluku. Tämä menettely ei määrittele mittaussjakson pituutta. Optimitilanteessa mittaussjakso tulisi siis valita niin, että se sisältää kaikki 15 merkittävintä junaa koko perusjoukosta. Käytännössä tässä voidaan soveltaa samaa menettelyä kuin runkomelun tapauksessa ja arvioida otoksen vaikutus tunnusluvun $v_{w,95}$ epävarmuuteen.

3.2 Mittaus

Värähtely- tai melumittauksen suorittaminen on vaativa tehtävä, joka vaatii huolellista valmistautumista. Mittausohjeet ja perehdytys laitteiden toimintaan ja erityispiirteisiin on oleellista, jotta mittaus voidaan suorittaa halutulla tavalla.

Akkreditoidussa mittauksessa vaaditaan, että mittaustapa ja tapahtuma dokumentoidaan järjestelmällisesti. Standardin ISO 14837-1 [6] mukaisesti tehdyissä mittauksesta dokumentoidaan mm. mittausajankohta- ja mittauspisteet, sääolosuhteet, mitatut junat sekä niiden nopeus- ja kokoonpano.

Henkilökunta koulutetaan käyttämään laitteistoa ja perehdytyksessä käytetään kolmipor- taista menettelyä. Ensimmäisessä portaassa koulutettava henkilö avustaa mittauksissa, toisessa portaassa koulutettava suunnittelee ja toteuttaa mittaukset ohjauksen alaisena ja kolmannessa portaassa koulutettava toteuttaa mittaukset itsenäisesti. Kolmannen por- taan kynnyksellä koulutettava suorittaa vertailumittauksen kontrolloidussa ympäristössä kuvitteellisella tehtävänannolla.

Mittauksen aluksi ja lopuksi kalibroidaan laitteet. Huomionarvoista on, että mittarin kalibrointi ei viittaa mittarin säätöön vaan kalibroinnilla tarkastetaan mittarin ja laitteiden muodostaman signaaliketjun toimivuus.

Hyvin toteutettu mittaussuunnitelma ohjaa mittaajaa mittauksen alusta loppuun. Mittaus- suunnitelma sisältää vähintään alustavat mittauspisteet, mittauksen keston ja laitteiston, jota mittauksissa tullaan käyttämään. Mittauspisteiden valinnan avulla voidaan määrittää laitteiston kiinnitystapa ja siihen tarvittavat apuvälineet, kuten jalustat tai liimaustarvik- keet.

On huomiota, että värähtely- tai runkomelumittaukset eivät ota kantaa muuhun kuin vallitsevaan tilanteeseen. Mikäli olosuhteet muuttuvat, esimerkiksi uuden junakaluston myötä, on mittaukset todennäköisesti suoritettava uudestaan. Pätevät henkilöt voivat toki arvioida olosuhteiden muutosten vaikutusta mittauksiin, mutta tämä arviointi ei enää edusta mittaustulosta eikä ole akkreditoinnin piirissä.

3.3 Epävarmuus

Kaikkeen mittaamisen liittyy epävarmuuksia, jotka on huomioitava laskennallisesti. Täs- sä esitellään esimerkki junaliikenteen runkomelumittauksesta ja sen epävarmuuslasken- nasta.

Mittaus suoritetaan äänitasomittarilla tai mikrofoniin ja kiihtyvyyssanturilla yhdessä huonetilassa. Huonetila on makuuhuone, jonka dimensiot ovat 3 m x 5 m x 2.7 m ja mikrofoni on pisteessä [1.5 m, 2.5 m, 1.5 m]. Yksinkertaisuuden vuoksi, oletetaan, että runkomelun aiheuttava juna kulkee tunnelissa, joten runkoääni ei kytkeydy ilmaäänenä rakennuksen runkoon tai muuhun rakenteisiin ja kantaudu sitä kautta huonetilaan. Mit- tauksissa mitataan junaliikennettä, joka kulkee kahdella raiteella ja koostuu ainoastaan yhdentyppisistä junista.

Oletetaan, että junien pyöristä, junan nopeudesta ja radan kunnosta johtuva runkomelun hajonta noudattaa normaalijakaumien konvoluutiota, joiden yhteisjakauma on esitetty

	Epävarmuus	Jakauma/oletus
Aänitasomittari, IEC 61672, Class I	± 1 dB	\mathcal{N}
Otoskoko $N = 100$	± 2 dB	χ_{N-1}^2
Huoneakustiikka	± 2 dB	\mathcal{U}
Kokonaisepävarmuus	± 5 dB	\mathcal{N}

Taulukko 1: Esimerkin epävarmuustekijät

normaalijakaumana:

$$L_{\text{juna}} \sim \mathcal{N}(0, \sigma_{\text{juna}}), \quad (1)$$

jossa $\sigma_{\text{juna}} = 5$ dB on tässä esimerkissä käytetty keskihajonta. Käytännössä keskihajonta arvioidaa mittauskohtaisesti esimerkiksi kiihtyvyyssanturista laskettavasta värähtelynopeudesta.

Mittauspaikan valinnasta ei ole VTT:n tai muissa ohjeissa yksiselitteistä kuvausta. ISO 1996-2 standardissa, jota voidaan tässä kohtaa soveltaa, on kuvailtu mikrofonin paikan valintaa seuraavasti. Mikrofonin tulisi sisätiloissa olla yli 0.5 m päässä kaikista seinistä ja vähintään 1.0 m päässä merkittävistä säteilevistä pinnoista [8]. Runkomelun tapauksessa kaikki seinä- ja lattiapinnat voivat toimia merkittävänä säteilijänä. Näiden periaatteiden pohjalta mittauspisteen tulisi siis sijaita 1.0 m metrin etäisyydellä kaikista huonepinnoista.

Huoneakustiikka ja mittauspiste vaikuttavat oleellisesti mitattuun runkomeluun, sillä pienillä taajuuksilla huonemoodit muuttavat äänitasoa huomattavasti huoneen eri pisteissä. Valitaan huoneen absorptioksi 0.1 runkomelutaajuuksilla 16...500 Hz. Tällöin huoneen vaihteluväli saadaan runkomelun ja huoneakustiikan yhteisvaikutuksesta. Käytännön tilanteessa huoneen keskimääräisen absorption voi mitata jälkikäiunta-ajan mittauksella tai muulla impulssivastemittauksella. Huoneakustiikan vaikutus voidaan arvioida Rindellin mukaan [9].

Oletetaan, että mitattu 95. persentiilin runkomeluspektri on seuraava:

$$L_p = [-20, -10, -5, 0, 5, 10, 15, 20, 20, 25, 20, 20, 15, 10, 10, 10],$$

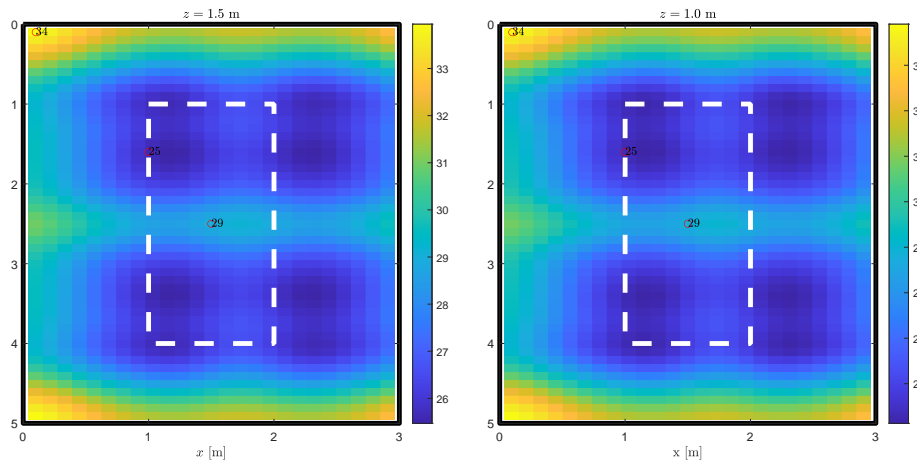
terssikaistoilla $f_c = 16, \dots, 500$ Hz.

Kaikkien termien summa on havaittu runkomelutaso huonetilassa

$$L_p = L_{\text{juna}} + L_{\text{huone}} \quad (2)$$

Taulukossa 1 on esitetty epävarmuus laskelmat annetuilla oletuksilla kun junien lukumäärä on $N = 100$. Kuvassa 1 on esitetty 1.0 m ja 1.5 m korkeudessa esiintyvän huoneakustiikan vaikutus tyypispektriin.

Suurimmat epävarmuudet siis liittyvät huonetilaan ja junien lukumäärään. Epävarmuutta voidaan pienentää mittaamalla useasta pisteestä yhdenaikaisesti tai kasvattamalla junien otoskokoa.



Kuva 1: Huoneakustiikan vaikutus runkomeluun esimerkkilaskennassa. ISO 1996-2 standardia soveltava mittausalue on rajattu valkoisella katkoviivalla.

4 YHTEENVETO

Tässä artikkelissa esiteltiin runkomelu- ja värähtelymittausten standardin mukaista akreditoitua mittauksia. Lisäksi esiteltiin esimerkki mittauksista ja epävarmuuslaskennasta runkomelun tapauksessa.

VIITTEET

- [1] Ympäristöministeriö. *Ääniympäristö - Ympäristöministeriön ohje rakennuksen ääniympäristöstä*. 2018.
- [2] Asko Talja and Ari Saarinen. *Maaliikenteen aiheuttaman runkomelun arviointi - VTT Tiedotteita 2468*. ISBN 9789513872700.
- [3] Asko Talja. *Suositus liikennetärintän mittaamisesta ja luokituksesta - VTT Tiedotteita 2278*. 2004.
- [4] ISO 2631-2:2003(E). ISO 2631-2 Mechanical vibration and shock — Evaluation of human exposure to whole-body vibration — Part 2: Vibration in buildings (1 Hz to 80 Hz). Standard, International Organization for Standardization, Geneva, CH, April 2003.
- [5] Colin G Gordon. Generic vibration criteria for vibration-sensitive equipment. In *Optomechanical Engineering and Vibration Control*, volume 3786, pages 22–33. International Society for Optics and Photonics, 1999.
- [6] ISO 14837-1:2005(E). Ground-borne noise and vibration arising from rail systems - General guidance. Standard, International Organization for Standardization, Geneva, CH, March 2005.
- [7] ISO 2631-1:1997(E). Mechanical vibration and shock — Evaluation of human exposure to whole-body vibration — Part 1: General requirements. Standard, International Organization for Standardization, Geneva, CH, July 1997.
- [8] ISO 1996-2:2007(E). ISO 1996-2 Acoustics - Description, measurement and assesment of environmental - Part 2: Determination of environmental noise levels. Standard, International Organization for Standardization, Geneva, CH, March 2007.
- [9] Jens-Holger Rindell. *Sound insulation in buildings*. CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 2018.