

HUONEAKUSTIIKAN MALLINNUKSEN TEOLLISUUSTILOISSA - NETTITYÖKALU

Jukka Keränen, Valtteri Hongisto

Työterveyslaitos
Lemminkäisenkatu 14-18 B, 20520 TURKU
jukka.keranen@ttl.fi

1 JOHDANTO

Vuonna 2004 otettiin käyttöön standardi SFS 5907 Rakennusten akustinen luokitus, jossa esitetään teollisuustyöpaikoille luokkien A, B, C ja D mukaiset enimmäisarvot jälkikaiunta-ajalle *RT* ja tuotannon aiheuttamalle yleismelutasolle. Jälkikaiunta-aika ei kuitenkaan sovellu äänenvaimennuksen arviointiin tiloissa, joissa äänikenttä ei ole diffuusi. Tarkastelussa tulisi mieluummin käyttää leviämismuunnosastetta *DL₂*, jonka mittaaminen on kuvattu standardissa SFS-EN-ISO 14257. Leviämismuunnosasteelle on esitetty ohjearvoja standardissa ISO 11690-2. Mittaustapaa vastaavaa tarkastelua voidaan soveltaa myös tilan huoneakustiseen mallintamiseen. Meluntorjuntatoimenpiteet voidaan mallintaa ja ennustaa niiden vaikutus tilan melutasoon suhteellisen tarkasti [1]. Mallin muokkaus ja ennusteiden laskenta on usein aikaa vievää ja liian työlästä akustisen ratkaisun vaikutukseen nähden. Meluntorjunnan, kuten akustiikkalevyjen asentaminen, vaikutuksen karkeaan arviointiin voisi riittää hyvin yksinkertaisempikin malli, jolla eri vaihtoehtojen tarkastelu tapahtuisi joutuisasti. Kirjallisuudessa on esitetty useita malleja sekä jälkikaiunta-ajan että äänenpainetaso laskemiseen. Mallien sovellettuudesta erilaisten teollisuustilojen mallintamiseen yleisesti ei kuitenkaan ole ollut varmuutta.

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli vertailla yksinkertaisten laskentamallien ennustetarkkuutta. Tämän pohjalta kehitettiin teollisuustilan huoneakustiikan mallinnustyökalu, jossa hyödynnetään vertailututkimuksessa tarkasteltujen ennustetarkkuuksien ja yleisen sovellettavuuden kannalta parhaita äänitaso ja jälkikaiunta-ajan ennustemalleja.

2 MATERIAALI JA MENETELMÄT

Tutkimuksessa vertailtiin 11 jälkikaiunta-ajan ja 14 äänitaso ennustemallia 4 kohteessa, joissa suoritettiin mittaukset ennen meluntorjuntatoimenpiteitä ja niiden jälkeen.

2.1 Tutkitut kohteet

Kohteina oli neljä erilaista teollisuustilaa, joissa toteutettiin huoneakustisen mallinnuksen perusteella valitut, meluntorjuntatoimenpiteet. Kohteissa toteutetut meluntorjuntatoimenpiteet on kuvattu lyhyesti alla ja esitetty kuvassa 1.

Kohde 1. 72 x 27 x 25 m koneistushallissa melua aiheuttavan pesutyöpisteen ympärille rakennettiin 6 m korkea sisäpuolelta ääntä absorboiva seinäke. Koska tila oli suuri ja kaikuva, oli seinäkkeen vaikutus muihin työpisteisiin kantautuvaan meluun vähäinen.

Kohde 2. 40 x 20 x 8 m kutomosalissa oli 16 suurta melua aiheuttavaa konetta. Tilan sivuseinille ja katon poikittaispalkkeihin asennettiin 50 mm akustiikkalevyt.

Kohde 3. 142 x 30 x 12 m levytyöhallissa käytettiin useissa työpisteissä meluisia käsityökaluja. Tila oli hyvin kaikuva ja kaareva katto lisäksi heijasti enemmän ääntä tietyille alueille.

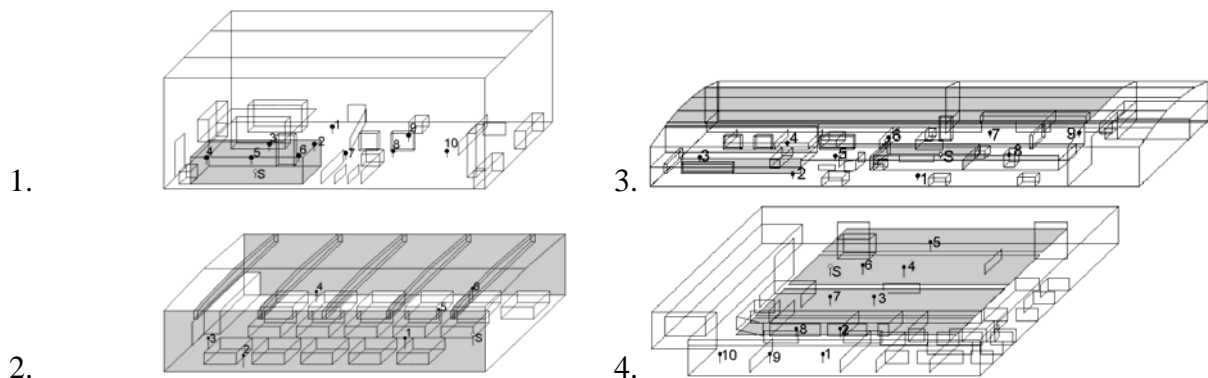
Koko kattoon asennettiin 30 mm akustiikkalevyt. Lisäksi tilan keskellä sijaitsevan levytyöpiirteen ympärille rakennettiin 3 m korkea ääntä absorboiva seinäke.

Kohde 4. Yhdistetyssä 54 x 42 x 6 m elektroniikkakokoonpano- ja avotoimistotilassa kokoonpanon aiheuttama melu kuului häiritsevästi avotoimistoon. Lähes koko katon alueelle asennettiin 25 mm ruiskutettavaa absorptiomateriaalia. Lisäksi toimistotyöpisteiden välille sijoitettiin 2 m korkeita pehmeäpintaisia toimistoseinäkkeitä.

2.2 Mittausmenetelmät

Äänen eteneminen melunlähteeltä työpisteisiin selvitettiin mittaamalla äänitasot valituissa työpisteissä käyttäen ympärisäteilevää pallokaiutinta, signaaligeneraattoria ja tehovahvistinta. Mittauspisteet ja pallokaiutin sijoitettiin 1,5 m korkeudelle. Pallokaiuttimen äänitehotaso määritettiin kaiuntahuoneessa ISO 3741 standardin mukaan. Tuotanto oli keskeytetty mittausajaksi, jotta taustamelu ei aiheuttaisi ongelmia. Mittaukset toistettiin meluntorjuntatoimenpiteiden toteuttamisen jälkeen samoilla mittauslaitteistoilla ja -järjestelyillä.

Jälkikaiunta-ajat mitattiin reaaliaika-analysaattorilla käyttäen äänilähteenä pistoolin laukausta. Mittaus toistettiin useissa pisteissä. Myös äänilähteen paikkaa vaihdettiin. Jälkikaiunta-aika määritettiin 20 dB vaimeneman mukaan.



Kuva 1. Kohteiden akustiset mallit meluntorjunnan jälkeen. Meluntorjuntatoimenpiteet on kuvattu harmaalla. S on äänilähde ja numerot mittauspisteitä.

2.3 Mallinnusmenetelmät

Työpaikoista laadittiin akustiset mallit alku- ja lopputilanteissa (kuva 1). Mallintamiseen käytettiin kaupallista mallinnusohjelmistoa (ODEON 3.1), joka on todettu useassa *round-robin*-testissä luotettavaksi [2, 3, 4]. Huoneakustisissa malleissa työtilan seinät, lattia, katto, suuret yli 2 metrin seinäkkeet ja kalusteet määritettiin pintojen avulla. Jokaiselle pinnalle määritettiin absorptiosuhde ja sirontakerroin, joiden avulla vaikutettiin äänen heijastuksiin mallinnetun tilan pinnoista. Pintojen absorptiosuhteet määritettiin kirjallisuudessa yleisesti esiintyneiden arvojen pohjalta ja sirontakertoimet määritettiin yleisiä ohjeita ja aiempaa kokemusta hyödyntäen [5, 6]. Pistemäinen äänilähde (pallokaiutin) ja mittauspisteet sijoitettiin malliin mittaustilanteiden mukaisesti.

2.4 Yksinkertaiset mallit

Äänitason ennustemalleja valittaessa kirjallisuudesta huomioitiin ensisijaisesti teollisuustilojen suunnitteluun tarkoitettavat mallit. Yhteensä tarkasteltavia äänitason ennustemalleja oli 14, joista 11 oli yksinkertaisia malleja [7]. Näistä kolme ennusti äänitason vain A-taajuus-

painotettuna. Vertailtavaksi jäi seitsemän ennustemallia: Embleton & Russel (L1) [8], Heerma & Hodgson (L2) [9], Hodgson (L3) [10], Kuttruff (L4) [11], Sergeyev ym. (L5) [12], Sabine (L6) [13] ja Thompson ym. (L7) [14].

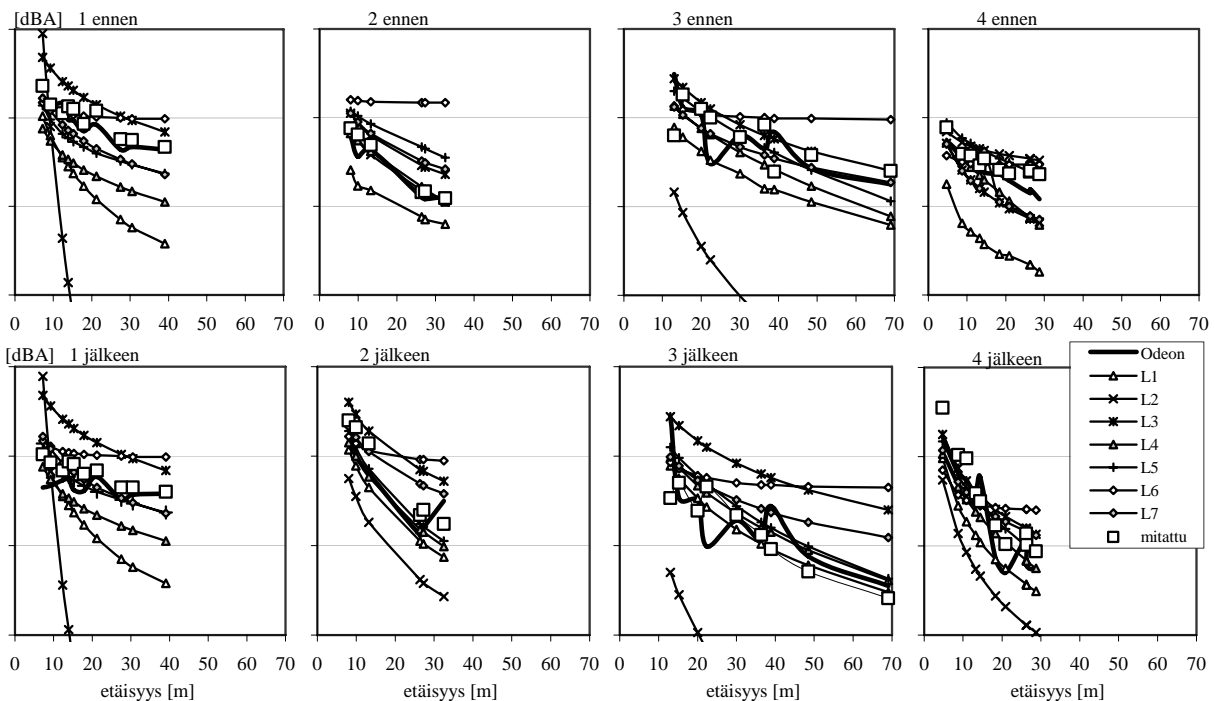
Yksinkertaisissa malleissa syötearvoina tarvitaan vain tilan pituus L , leveys W ja korkeus H sekä kalusteiden tai koneiden keskimääräinen korkeus h . Tilan mitoista voidaan määrittää tilavuus V ja pintojen alat S . Lisäksi malleihin määritetään absorptiosuhteet α pintakohtaisesti tai keskimääräisesti.

2.5 Virhetarkastelu

Ennustetarkkuus määritettiin vertaamalla ennusteita mittaustuloksiin 125 - 4000 Hz oktaavikaistoittain useissa mittauspisteissä kussakin kohteessa ennen ja jälkeen meluntorjunnan. Lopuksi määritettiin absoluuttisen ennustetarkkuuden keskiarvo, jonka perusteella arvioitiin yksinkertaisten mallien soveltuvuus meluntorjunnan vaikutuksen mallintamiseen. Virhetarkastelu tehtiin erikseen myös A-taajuuspainotetulle äänenpainetasolle. Virhetarkastelu on kuvattu yksityiskohtaisesti lisensiaattityössä [7, 15].

3 TULOKSET

Yksityiskohtaiset tulokset kaikkien 25 mallin osalta on esitetty lisensiaattityössä [7]. Kuvassa 2 esitetään mitatut, ODEON -mallinnusohjelmalla ja yksinkertaisilla malleilla L1 - L7 ennustetut A-taajuuspainotetut äänenpainetasot kohteissa 1-4 ennen ja jälkeen meluntorjunnan.



Kuva 2. Mitatut ja ennustetut A-taajuuspainotetut äänenpainetasot kohteissa 1-4 ennen (yllä) ja jälkeen (alla) meluntorjunnan. Pystyakselilla jako on 10 dB välein.

3.1 Nettityökalu

Nettityökaluun valittiin Sabine -malli, koska se on tunnetuin jälkikaiunta-ajan laskentaan käytetty yhtälö ja siihen viitataan useissa rakentamista koskevissa ohjeissa.

Äänitason laskentaan valittiin virhetarkastelun pohjalta Sergejev ym. -malli:

$$L_p(r) = L_w + 10 \lg \left[\frac{1}{2\pi r^2} + \frac{(1 - \bar{\alpha})(r + W)J(\bar{\alpha}, \rho)}{HW(r + H)} \right], \quad (1)$$

missä $J(\bar{\alpha}, \rho) = 0.1 / [\bar{\alpha} + \rho^2 \exp(0.65\rho)]$ ja $\rho = -rS \ln(1 - \bar{\alpha}) / 4V$.

Mallissa r on etäisyys äänilähteestä ja L_w äänilähteen äänitehotaso. Keskimääräinen absorptiosuhde, $\bar{\alpha}$, määritetään pintojen ja kalusteiden absorptiosuhteiden ja pinta-alojen perusteella.

Valituista malleista tehtiin yksinkertainen selainpohjainen mallinnustyökalu, joka on vapaasti käytettävissä Työterveyslaitoksen verkkosivulla [16]. Ohjelman käyttöliittymässä (Kuva 3) valitaan huoneen pituus, leveys ja korkeus. Seinäkkeille valitaan korkeus, pintamateriaali ja seinäketiheys, joka kuvaa seinäkkeiden määrää tilan pohjapinta-alaa kohden. Tilan katto-, lattia- ja seinäpinnoille valitaan pintamateriaalin mukaan absorptioluokka A-E tai betoni. Kattoabsorptiolle voi myös määrittellä peittoasteen, koska koko kattopinta-alaa ei yleensä pystytä hyödyntämään.

Äänilähteen äänitehotason voi säätää 63-8000 Hz oktaavikaistoittain. Ohjelma ennustaa jälkikaiunta-ajan RT ja leviämismuunnosasteen DL_2 sekä esittää karkeana melukarttana äänen leviämisen yksittäisestä äänilähteestä tilaan. Lisäksi käyttöliittymässä esitetään ISO 11690-1 ja SFS 5907 standardien mukaiset ohjearvot.

4 POHDINTA

Teollisuustilojen meluntorjunnassa on pitkään käytetty jälkikaiunta-aikaa suunnittelua ohjaavana arvona. Vaikka jälkikaiunnan avulla voikin arvioida ääntä absorboivan materiaalin määrää diffuusissa äänikentässä, ei sen avulla voi kuvata äänen vaimenemista tehdastilassa etäisyyden kasvaessa, mikä on subjektiiviselta kannalta kuitenkin tärkeintä tietää. Vertailututkimuksessa ilmeni, että etenkin yksinkertaisten jälkikaiunta-aikamallien ennustetarkkuus ei vastannut niille asetettuja odotuksia. Mallien ennustevirheet olivat moninkertaisia jälkikaiunta-ajan mittaustarkkuuteen verrattuna. Kaikki ennustemallit osoittivat jälkikaiunta-ajan pienenevän, kun absorptiomateriaalia lisättiin tilassa, mutta ennustetut jälkikaiunta-ajat eivät olleet välttämättä lähelläkään mitattuja arvoja.

Leviämismuunnosaste DL_2 on kuvattu standardeissa ISO 14257 ja ISO/NP 3382-3, joissa määritellään mittausmenetelmä teollisuustiloihin ja avotoimistoihin. Tyypillisiä DL_2 -arvoja teollisuustiloille on esitetty standardeissa ISO 11690-1 ja ISO 11690-2. Leviämismuunnosaste kertoo, kuinka paljon ääni vaimenee tilassa etäisyyden kaksinkertaistuesssa. Sen mittaaminen on käytännössä yhtä helppoa kuin jälkikaiunta-ajan, joten DL_2 soveltuu tilan akustiikan arviointikriteeriksi. Tämä tulisi ottaa huomioon esimerkiksi SFS 5907 standardissa, jossa ei tällä hetkellä ole DL_2 -ohjearvoja. Tutkimuksen virhetarkastelussa todettiin äänitason ennustemallien ennustetarkkuus paremmaksi kuin jälkikaiunta-ajan ennustemalleilla. A-taajuuspainotetun äänitason osalta Sergejev ym. -mallilla keskimääräinen ennustetarkkuus oli

lähes yhtä hyvä kuin ODEON -mallinnusohjelmalla. Jälkikaiunta-ajan keskimääräinen ennustetarkkuus ei ollut ODEON -mallinnusohjelmallakaan alle 10 %, mikä vastaisi ISO 3382-2 mukaan kenttämittauksen toistettavuutta.

Pitkälle kehitetyillä mallinnusohjelmilla, kuten ODEON, voidaan suhteellisen tarkasti ennustaa äänitaso tilassa, kun kaikki tarvittavat tiedot on syötetty malliin. Huoneakustisen mallin laatiminen on kuitenkin useimmiten varsin työlästä, koska malliin tarvittava lähtötietojen määrä on moninkertainen yksinkertaisiin malleihin verrattuna. Myös eri tilanteiden laskenta vaatii aikaa, mikä tosin tietokoneiden laskentatehokkuuden jatkuvasti parantuessa on kohtuullisen pieni ongelma. Yksinkertaisilla malleilla voidaan pikaisesti arvioida huoneakustisten vaimennusratkaisujen vaikutusta tilan äänitasoon ja jälkikaiunta-aikaan. Lähtötietojen määrittely tapahtuu huomattavasti helpommin ja muutosten vaikutus on heti havaittavissa.

5 YHTEENVETO

Tutkimuksen perusteella äänitason ennustemalliksi selainpohjaiseen mallinnustyökaluun valittiin Sergejev ym. -malli, jonka keskimääräinen ennustevirhe oli 7/8 kohteessa alle 3 dB(A). Jälkikaiunta-ajan malliksi valittiin Sabine -malli, koska se on edelleen yleisimmin käytetty teollisuustilojen huoneakustiikassa eikä tutkimuksessa löydetty ennustetarkkuudelta parempaakaan yksinkertaista mallia. Kyseiset mallit soveltuvat meluntorjunnan vaikutusten pika-arviointiin. Tulosten jatkohyödyntämiseksi laadittiin vapaasti käytettävä mallinnustyökalu [16].

VIITTEET

1. J. KERÄNEN, E. AIRO, P. OLKINUORA, V. HONGISTO, Validity of ray-tracing method for the application of noise control in workplaces. *Acustica - acta acustica* **89** (2003), 863-874.
2. M. VORLÄNDER, International round robin on room acoustical computer simulations. *15th International Congress on Acoustics '95*, 1995, Trondheim, Norway, 689-692.
3. I. BORK, A comparison of room simulation software - the 2nd round robin on room acoustical computer simulation. *Acustica - acta acustica* **86** (2000), 943-956.
4. I. BORK, Report on the 3rd round robin on room acoustical computer simulation - Part II: calculations. *Acustica - acta acustica* **91** (2005), 753-763.
5. C. M. HARRIS, Noise control in buildings a practical guide for architects and engineers, *McGraw-Hill Inc*, New York, 1994.
6. S. DANCE, B. SHIELD, Technical note: Absorption coefficients of common construction materials for use in computer modelling of enclosed spaces, *Building Acoustics* **7**(3) (2000), 217-224.
7. J. KERÄNEN, Akustinen mallintaminen työpaikkojen meluntorjuntasuunnittelussa, Lisen-siaattityö, *Turun yliopisto, fysiikan laitos*, Turku, 2006.
8. Canadian Standard Z107.52-M1983, Recommended practice for the prediction of sound-pressure levels in large rooms containing sound sources, 1983.
9. N. HEEREMA, M. HODGSON, Empirical models for predicting noise levels, reverberation times and fitting densities in industrial workrooms, *Appl. Acoust.* **57** (1999), 51-60.
10. M. HODGSON, Sound propagation curves in industrial workrooms: statistical trends and empirical prediction models, *J. Building Acoust.* **3**(1) (1996), 25-32.
11. H. KUTTRUFF, Room acoustics, *Elsevier Applied Science*, London, 1991.

12. G. L. OSIPOV, M. V. SERGEYEV, I. L. SHUBIN, Optimum location of sound absorbing material and estimation of its noise-reduction efficiency in industrial spaces, *Inter-Noise '87*, 1987, Beijing, China, 683-686.
13. L. L. BERANEK, I. L. VER, Noise and vibration control engineering: principles and applications, *John Wiley & Sons*, New York, 1992.
14. J. K. THOMPSON, L. D. MITCHELL, C. J. HURST, A modified room acoustics approach to determine sound-pressure levels in irregularly-proportioned workroom spaces, *Inter-Noise '76*, 1976, Washington DC, USA, 465-468.
15. J. KERÄNEN, V. HONGISTO, Comparison of simple room acoustic models used for noise control design. *submitted to Acustica - acta acustica*, September 14, 2008.
16. www.ttl.fi/teollisuusakustiikka

Kohde: kohde 2

Huonepituus [m]: 0 20 40 60 80 100 120 140 160 180 200 40.0

Huoneleveys [m]: 0 20 40 60 80 100 120 140 160 180 200 20.0

Huonekorkeus [m]: 2.5 5.0 10.0 15.0 20.0 25.0 8.0

Katon materiaali: (0.9) absorptioluokan A materiaali

Kattoabsorption peittoaste [%]: 0 20 40 60 80 100 60.

Lattian materiaali: (0.1) Betoni, laatta, vinyylimatto

Vasen seinämateriaali (0.9) absorptioluokan A materiaali

Oikea seinämateriaali (0.9) absorptioluokan A materiaali

Etu seinämateriaali (0.9) absorptioluokan A materiaali

Taka seinämateriaali (0.9) absorptioluokan A materiaali

Seinäkekorkeus [m]: 1.0 2.0 3.0 4.0 5.0 6.0 7.0 8.0 9.0 1.2

Seinäketiheys [%]: 0 10 20 30 40 50 10.

seinäkkeen materiaali (0.1) puu tai lasi

Melupäästötaaso oktaavikaistoittain 63 - 8000 Hz [dB]

90 107 105 104 102 101 101 90

Laske Tietoa

20.0 m tilavuus: 6424 m³

10.0 m

70 - 75 dBA
75 - 80 dBA
80 - 85 dBA
yli 85 dBA

TULOKSET
Lp: 76.5 dBA
DL2: 6.2 dBA
T(Sab): 0.7 s
Lw: 108.2 dBA

AKUSTINEN LUOKITUS

	leviämisvaimennusaste DL2 [dBA]	jälkikaiunta-aika T [s]
D (kehno)	4 tai alle	2.0- 2.4
C (kohtalainen)	4 - 6	1.7 - 2.0
B (hyvä)	6 - 7	1.2 - 1.7
A (erinomainen)	7 tai yli	1.2 tai alle

Teollisuustilan akustinen malli (C) Työterveyslaitos, 23.2.2009

Kuva 3. Teollisuustilan huoneakustiikan mallinnustyökalun käyttöliittymä.