Huonevaimennuksen merkitys teollisuustilan onnistuneen meluntorjunnan perustana

Riku Tanila 1[1], Esa Nousiainen[1], Rauno Pääkkönen[1], Saana Romula[1] , Jyrki Kesti[2]
[1] A-Insinöörit Suunnittelu Oy, Tampere
[2] Ruukki Construction Oy, Hämeenlinna

Tiivistelmä

Artikkeli tarkastelee huonevaimennuksen merkitystä teollisuus- ja urheilutilojen meluntorjunnassa. Tutkimuksessa yhdistetään mallinnusmenetelmiä, mittauksia ja käytännön esimerkkejä neljästä erilaisesta suunnittelu – ja korjauskohteesta: suuri tehdashalli, Tredun Siltakampuksen rakennusosaston työhalli, JTK Power Oy:n Vöyrin tehtaan hitsauskokoonpanohalli ja Jyväskylän Huhtahalli.

Tulokset osoittavat, että huolellinen akustinen suunnittelu parantaa ääniympäristön laatua ja työviihtyvyyttä merkittävästi. Suunnittelun onnistumista varmentaa oikeiden mallinnusmenetelmien käyttäminen. Sädeseurantaohjelmiston käytöstä teollisuushallin akustisen korjauksen suunnitteluun on myös saatu hyviä tuloksia.

1. Johdanto

Teollisuustilojen meluntorjunta on keskeinen osa työympäristön laatua ja työntekijöiden hyvinvointia. Huonevaimennus vaikuttaa puheviestintään, keskittymiseen ja tuottavuuteen. Myös työturvallisuus paranee, kun työympäristön havainnointi onnistuu tarkemmin. Erityisesti kaiunnan hallinta korostuu, kun työtehtävät vaativat tarkkuutta tai työntekijällä on kuulonalenema. Työsuojelurahaston ja tutkimusyritysten AGCO Power, Nokian Renkaat, Promeco, Ruukki Construction ja Teollisuuden Voima TVO rahoittamassa Työnäänet-hankkeessa [1] tutkitaan melua, joka aiemman tutkimushankkeen tulosten perusteella [2] häiritsee työntekijää ja työtä, mutta ei ole lainsäädännön tarkoittamalla tavalla terveydelle vaarallista [3]. Suuruusluokkana tutkitaan teollisuuden työpaikoilla melua, jonka taso on 65…75 dB(A).

2. Teoreettiset menetelmät

Huonevaimennus arvioidaan kahden mittaluvun avulla: jälkikaiunta-aika (T60) ja leviämisvaimennus (DL2). Kaiunnan ja sen muutoksen laadullista havaitsemista on tutkittu jonkin verran, ja vaikuttaa myös kokemuksen perusteella että 20…30 % muutoksen voi ihminen havaita. Aiempi tutkimus painottaa puhetta ja musiikkia, teollisen melun kaiunnasta ei löydy juuri tutkimusta. [4, 5]

Molemmille on annettu standardissa SFS5907 hyvää tilaa kuvaavat ohjearvot. Tanila on diplomityössään [6] selvittänyt nykyisen sädeseurantaohjelmiston (Odeon) käyttöä teollisuushallien akustiikan mallintamiseen. Sädeseuranta perustuu luotavan tilan 3D-geometrisen mallin äänisäteiden heijastumisen ja absorboitumisen laskemalla seuraamiseen.
Aiemmin teollisuushallien kaiuntaa ja kuvaamista mallintamalla ovat Suomessa selvittäneet Pääkkönen vuonna 1981 [7] ja Keränen vuonna 2006 [8] Diplomityössä selvitettiin nykyisen sädeseurantaohjelmiston lisäksi erilaisten parametristen mallien (ei huomioida oikeaa geometriaa vaan tila kuvataan sen tunnuslukujen avulla) käyttökelpoisuutta teollisuushallin suunnittelussa.

Suunnittelussa käytetään laskentamalleja, yleensä nimetty tekijänsä mukaan: Sabine, Eyring, Millington, Friberg, Heerema. Mallinnuksen onnistumista arvioitiin vertaamalla huolellisella mittauksella saatuun mittaustulokseen.

3. Mittausmenetelmät

Jälkikaiunta-aika mitattiin tavallisella impulssivasteen integrointimenetelmällä. Työssä osoittautui impulssilähteenä hyvin edulliseksi käyttää kal. 9 mm kaasuasetta, jolla saadaan 10 m säteellä n. 115 dB L_{pAmax} herätetaso. Mitataan käytännössä merkinantopatruunan pamauksen vaimeneminen. Tämä riittää 30 dB jälkikaiunta-ajan määrittämiseen tavallisessa teollisuuden tuotantotilassa, vaikka taustamelu olisi liki 80 dB. Menetelmä on myös logistisesti helppo ja nopea verrattuna kaiuttimilla tehtyyn katkaistun kohinan tai sinipyyhkäisyn menetelmään. Kaiutinpaikkojen vaihtamiseen menee aikaa ja vaivaa, ja taustamelutaso usein tekee mahdottomaksi järkevän kokoisella ja tehoisella kaiutinjärjestelmällä mittaamisen.

4. Suunnittelukohteiden tulokset

4.1 Suuri teollisuushalli

Halli on tilavuudeltaan erittäin suuri teollisuushalli, jonka mitat ovat 80 x 56 x 13 m. Sen tilavuus on noin 55 000 m^3. Osa hallin pinnoista on betonisia ja osa pvp-elementtirakenteisia.

Taulukko 1. Suunniteltu vaimennusmateriaalin lisäys ja saatava melutason alenema ja jälkikaiunta-aika. Näin suurelle hallille ei suoraan anneta ohjearvoa.

Taajuus [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	Log-keskiarvotettu melutaso *L*pA[dB]
T60 [s] mitattu	6,7	6,5	6,5	5,4	4,3	2,2	92
T60 1500 m^2 asennettu	5,2	4,6	5,2	4,6	4,3	2,4	87
T60 2700 m^2 asennettu	3,6	2,7	2,9	2,8	2,7	1,8	85

Sädeseurannalla ennustetun äänenpainetason aleneman perusteella vaikuttaa parhaalta asentaa vaimennusmateriaalia 1500 m^2 jolloin saadaan melutason alenema 3…5 dB(A) koko hallissa ja riittävä jälkikaiunta-ajan lyheneminen. Vaimennusmateriaalilla on A luokan absorptio ja sitä asennetaan kattoon ja usealle seinäpinnalle.

4.2 Rakennusalan työhallit

Kohteessa suunniteltiin rakennusalan opetustyöhallien akustinen korjaus vastaamaan tarkemmin aiemmin käytössä ollutta hyvin vaimennettua opetustilaa. Työhallit ovat pvp-elementtirakenteisia ja hallien kattorakenne on profiilipeltikatto.

Käyttäjän palaute korjauksen jälkeen oli ”*raksan osalta toimenpiteet ovat hyvin parantaneet lähtötilannetta. Jopa niin hyvin, että muuraushallin pölyimurille ei tarvitse tehdä enää mitään melunhallintatoimenpiteitä*”.

Jälkikaiunta-aika pieneni korjauksessa merkittävästi. Mittaustuloksen perusteella sädeseurantaohjelmisto ennustaa katosta ripustettavien melusieppojen vaimennuksen hyvin, ja siepot toimivat tilan kaiuntaa vähentäessä hyvin.

Taulukko 2. Mitatun jälkikaiunta-ajan muutos korjauksen jälkeen.

Tila	Jälkikaiunta-aika *T* [s]				
	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Rakennusala, työhalli 1					
- *ennen korjaustoimenpiteitä*	1,2	1,2	1,4	1,4	1,0
- *korjaustoimenpiteiden jälkeen*	0,9	0,9	0,8	0,9	0,8
Rakennusala, työhalli 2					
- *ennen korjaustoimenpiteitä*	1,3	1,2	1,4	1,4	1,1
- *korjaustoimenpiteiden jälkeen*	0,9	0,8	0,8	0,8	0,8
Sähköalan työhalli					
- *ennen korjaustoimenpiteitä*	1,0	1,0	1,2	1,2	1,0
- *korjaustoimenpiteiden jälkeen*	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6

4.3 Hitsauskokoonpanohalli

Halli on tilavuudeltaan suuri hitsauskokoonpanohalli, jonka mitat ovat 96 x 48 x 8 m. Sen tilavuus on noin 39 000 m^3. Osa hallin pinnoista on betonisia ja osa pelti-villa-pelti elementtejä. Kohteeseen lisättiin absorptiomateriaalia 50 % lattiapinta-alasta kattoon ja seinille.

Taulukko 3. Jälkikaiunta-ajan muutos korjaussuunnitelman toteutuksen jälkeen.

Taajuus [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
T60 [s] ennen	3,9	3,0	3,1	3,0	1,9	1,4
T60 [s] suunnitteluarvo	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2
T60 [s] jälkeen	1,9	2,1	2,1	2,1	1,9	1,4

Korjauksen jälkeen tuotantopäällikkö sanoi: ”*tila tuntuu hiljaisemmalta, siellä voi puhua puhelimeen ja tuotannon ollessa hiljaisempaa voi poiketa hallissa työhuoneesta ilman kuulosuojaimia*”

4.4 Suuri liikuntahalli

Urheiluhalli on mitoiltaan 119 x 75 m ja sen tilavuus on noin 150 000 m^3. Seinät ovat pvp-elementtirakenteisia ja hallin kattorakenne on perforoitu profiilipeltikatto, joka on B-luokan absorptiotuote. Seinille on asennettu 40…50 mm paksuista akustiikkavillaa kaikille pinnoille, joille sitä on mahdollista asentaa. Kohteen lattian pinta on tekonurmi.

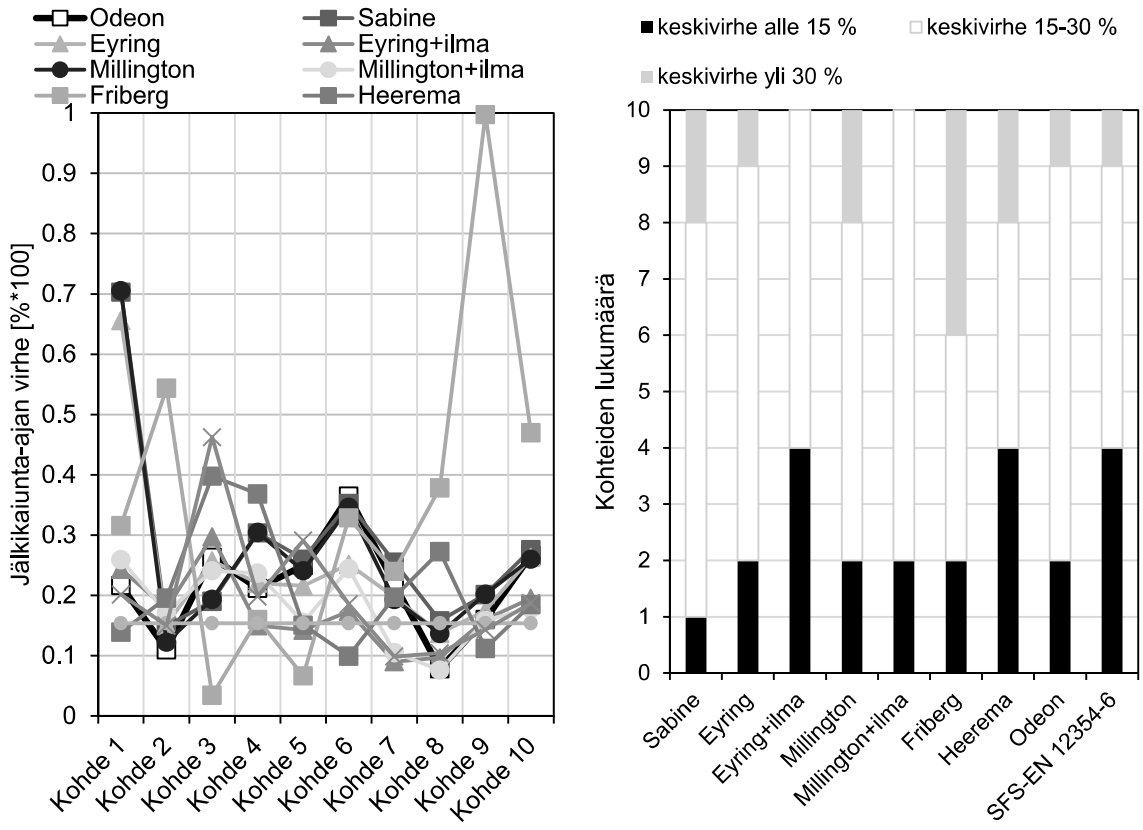
Taulukko 4. Suurten hallitilojen jälkikaiunta-aika. SFS5907:2004 D-luokan ohjearvo on 2,6 s.

Taajuus [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	Tilavuus V [m^3]
T [s] Huhtahalli mitattu	6,3	4,5	3,8	3,0	2,0	1,2	155 000
T [s] Erittäin suuri teollisuushalli mallinnettu	6,1	4,0	2,9	2,9	2,7	2,0	510 000

5. Mallinnusmenetelmien tulokset ja vertailu

Tanilan diplomityössä tarkastellaan eri parametrisia malleja suhteessa sädeseurantaohjelmistolla saatuun ja mitattuun tulokseen. Tutkittiin yhteensä 10 eri kohdetta. [6]

5.1 Jälkikaiunta-ajan mallinnustulos ja virhetarkastelu



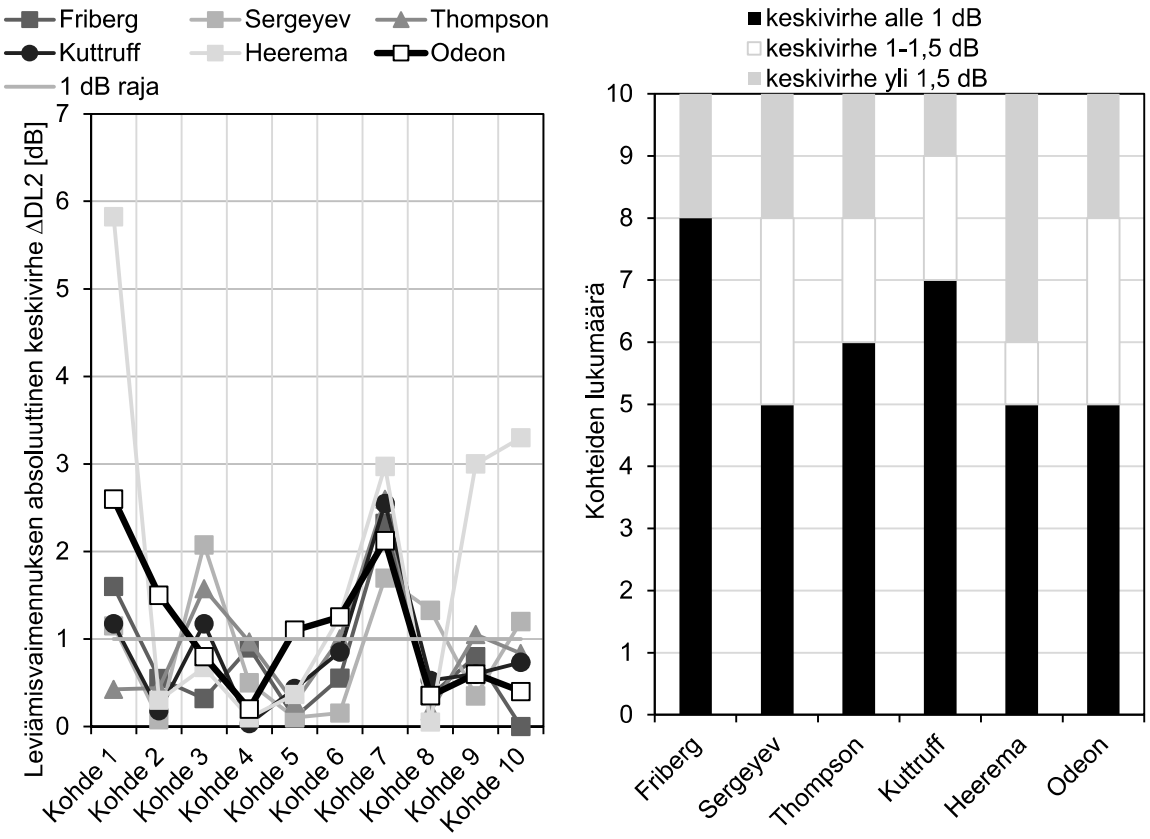
Kuva 1. Mallinnettu jälkikaiunta-aika ja virhetarkastelu.

Virhetarkastelussa mitattuja ja mallinnettuja tuloksia verrataan toisiinsa suhteellisen keskivirheen avulla. Laskenta- ja mallinnustulokset, joiden suhteellisen virheen keskiarvo on alle 15 %, voidaan pitää luotettavina. Jos suhteellinen keskivirhe on yli 30 %, ei mallinnustulokseen voida luottaa. Kun tilan jälkikaiunta-aika on 3 s, 15 % virhe kuvaa noin 0,4 s eroa tulokseen. Virheen ollessa samassa tilanteessa 30 %, eroaa tulos noin 1 s. Virheet ovat laskettu oktaavikaistoilla 125–4 000 Hz. Mallien suhteelliset keskivirheet esitetään kuvassa 1, samoin luotettavuustarkastelu.

Jälkikaiunta-ajan suhteellisen keskivirheen kuvaajista (kuva 1) nähdään, että mallinnustulokset vastasivat mittaustuloksia parhaiten kohteissa 4…10 lukuun ottamatta Fribergin mallia, joka ennusti huonoja tuloksia kohteissa 8…10. Kohteita 4…10 yhdisti se, että ne olivat tilavuuksiltaan alle 20 000 m^3. Tilavuuksiltaan suurimmissa halleissa (kohteet 1 ja 3), joiden tilavuudet olivat yli 25 000 m^3, ei yksikään malli ennustanut luotettavia tuloksia molemmissa tiloissa. Kolmanneksi suurin tila oli noin 15 000 m^3 (kohde 4). Siinä ainoastaan Eyring + ilma -mallin keskivirhe oli alle 15 %. Tästä voidaan päätellä se, että suurissa yli 15 000 m^3 tiloissa mallien luotettavuus heikkenee huomattavasti. Mitattuja jälkikaiunta-aikoja kohteissa vastasivat parhaiten Eyringin malli, jossa oli otettu huomioon ilman absorptio, SFS-EN 12354-6:2003 standardin laskentamalli

ja Heereman malli.

5.2 Leviämisvaimennuksen mallinnustulos ja virhetarkastelu



Kuva 2. Laskettu leviämisvaimennus ja virhetarkastelu.

Leviämisvaimennukselle luotettavuustarkastelussa käytettiin 1 dB rajaa. Se vastaa 4 dB eroa 16 m etäisyydellä melutasossa, mikä on jo kuultavissa. Jokaisessa tilassa mitattiin vähintään 16 m matkalta leviämisvaimennusta, minkä vuoksi se on valittu tarkastelun etäisyydeksi. Mallien leviämisvaimennuksen absoluuttisen virheen keskiarvot on esitetty kuvassa 3 ja niistä on tehty luotettavuustarkastelu kuvaan 4. Tilanteissa, joissa keskivirhe on yli 1,5 dB, mallinnustulosta ei voida pitää luotettavana. Tämä vastaa 16 m etäisyydellä 6 dB eroa mittaustulokseen. Keskivirhe suhteessa mittaustulokseen

Leviämisvaimennuksen absoluuttisen virheen kuvaajasta (kuva 2) huomataan, että mallit ennustivat leviämisvaimennusta parhaiten kohteissa 4, 5, 9 ja 10 lukuun ottamatta Heereman mallia. Yksinkertaiset mallit eivät osanneet ottaa huomioon esteitä matkalla, vaan toimivat parhaiten suoralla mittauslinjalla, jossa ei ollut esteitä. Odeonilla mallintaminen otti esteet huomioon, mutta tulokset eivät silti olleet luotettavia. Mallia pitäisi siis vähintään tarkentaa, jotta se ennustaisi luotettavampia tuloksia.

Parhaiten mitattuja tuloksia vastasi Fribergin malli. Sen absoluuttinen virhe oli alle 1 dB kahdeksassa kohteessa. Kahdessa kohteessa mallin keskivirhe oli yli 1,5 dB. Kuttruffin malli ennusti alle 1 dB keskivirhettä seitsemässä kohteessa. Keskivirhe oli vain yhdessä kohteessa yli 1,5 dB.

6. Yhteenveto

Huonevaimennus on kriittinen osa teollisuustilan toimivuutta ja meluntorjuntaa. Mallinnusmenetelmät ja mittaukset mahdollistavat tehokkaan suunnittelun. Käytännön esimerkit osoittavat, että akustinen korjaus parantaa ääniympäristön laatua ja käyttäjäkokemusta. Rakennusvaiheessa tehty akustinen suunnittelu voi merkittävästi parantaa tuottavuutta ja vähentää meluhaittoja.

Aiemmin todetulla tavalla nostamme esiin tarpeen vaientaa suorakuution muotoisen huonetilavuuden vastakkaisia seinäpintoja (katto, pitkä seinä, lyhyt seinä) ja kohdistaa myös vaimennus lähelle aluetta ja työpistettä missä melua halutaan vaimentaa.

Katon akustisen vaimennuksen toteutukseen on mielenkiintoinen vaihtoehto valmiiksi perforoitu ja akustisesti vaimennettu Ruukin T153AcuB- kantava poimulevy, jolloin vältytään erillisen vaimennusmateriaalilevytyksen tai pystysuoraan asennettavien melusieppojen asentamiselta. T153AcuB on kantavan poimun mineraalivillatäytöllä A-luokan absorptiomateriaali. Teollisuus- tai työhallissa seinille asennettava vaimennuslevy on usein melun taajuussisällön vuoksi edullista valita n. 100 mm paksuna.

Leviämisvaimennuksen parantaminen osittaisella osastoinnilla tai melusermeillä auttaa myös työpisteen yleismelun vaimentamisessa. Hyvä leviämisvaimennus edellyttää kaikuvan äänikentän tehokasta vaimentamista eli hyvää huonevaimennusta. Tehokkaan leviämisvaimennuksen parantamisen suunnittelutapoja selvitetään käynnissä olevassa Työsuojelurahaston hankkeessa Työnäänet [1].

Teollisuustilojen jälkikaiunta-ajan mallinnuksessa on tärkeää ottaa huomioon ilman absorptio. Materiaalien absorptiokertoimien valinta vaikuttaa oleellisesti mallinnustulokseen. Leviämisvaimennuksen mallinnuksessa on käytettävä mallinnustapaa, joka ottaa huomioon mittauslinjalla olevat seinäkkeet, kun halutaan saavuttaa standardin SFS 5907 määrittämä vähimmäistaso.

Lähdeluettelo

[1] Työn äänet-hankkeen verkkosivu: https://www.ttl.fi/tutkimus/hankkeet/tyontekijoiden-tyohyvinvointi-ja-osaamisen-kehittyminen-teollisuuden-aanimaisemissa-tyonaanet
[2] https://www.humak.fi/julkaisut/teollisuuden-tyopaikkojen-aaniympariston-ratkaisukeskeinen-kehittaminen/
[3] Valtioneuvoston asetus 85/2006
[4] Blasinski L, Kocinski J, Perception of reverberation length in rooms with active acoustics enhancement systems, Forum Acusticum 2003 Torino, EAA
[5] ¨Frissen I et. al. Perception of reverberation in large single volumes, Proceedings of the 15th International Conference on Auditory Display, Kööpenhamina, 2009.
[6] Tanila R. Teollisuushallien akustisten parametrien määrittäminen mittaamalla ja mallintamalla, Tampereen yliopisto, 2025.
[7] Pääkkönen R. Oulun aluetyöterveyslaitos 1981
[8] Keränen J, Akustinen mallintaminen työpaikkojen meluntorjuntasuunnittelussa, Turun yliopisto 2006