

TEOLLISUUSHALLIEN AKUSTISTEN PARAMETRIEN MÄÄRITTÄMINEN MITTAAMALLA JA MALLINTAMALLA

Riku Tanila¹, Esa Nousiainen¹, Rauno Pääkkönen¹, Jesse Lietzén¹, Mikko Kylliäinen¹

¹ A-Insinöörit Suunnittelu Oy
Puutarhakatu 10
33210 Tampere
etunimi.sukunimi@ains.fi

Tiivistelmä

Melu on usein suurin haittatekijä työhyvinvoinnille teollisuushalleissa. Melu voi aiheuttaa kuulonalenemia, puhekommunikaation häiriintymistä ja työviihtyvyyden laskua. Jotta meluntorjuntasuunnittelua voidaan teollisuushalleissa tehdä luotettavasti, on pystyttävä määrittämään niissä tarkasteltavat akustiset parametrit riittävällä tarkkuudella. Haasteita mallinnukseen aiheuttavat tilojen pintojen ja kalusteiden absorptiokertoimien arvojen määrittäminen sekä se, että tilat ovat tilavuuksiltaan usein hyvin suuria. Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää mikä tai mitkä mallinnusmenetelmät soveltuvat parhaiten teollisuushallien akustisten parametrien määrittämiseen. Tutkittaviksi akustisiksi parametreiksi valittiin jälkikaiunta-aika ja leviämismuunnos, koska niistä kummallekin on annettu ohjearvoja standardissa SFS 5907.

Tutkimuksen aikana mitattiin 10 teollisuushallia ja mitattuja tuloksia verrattiin mallinnettuihin tuloksiin. Samalla pystyttiin vertailemaan erilaisten mittausmenetelmien soveltuvuutta teollisuustilojen mittaamiseen, koska mittausolosuhteet vaihtelivat siitä, että tilat olivat tyhjiä ja hiljaisia siihen, että meneillään oleva tuotanto saatiin keskeytettyä vain hetkeksi. Mittauksia ja niiden tuloksia on esitetty tarkemmin Tanila [1] diplomityössä.

1 JOHDANTO

Teollisuushallit ovat tilavuudeltaan suuria yhtenäisiä tiloja, joiden ääniolosuhteisiin voidaan vaikuttaa huoneakustisella suunnittelulla. Melun häiritsevyyttä pyritään vähentämään äänen leviämisen vaimennuksella. Tilan huoneakustisia ominaisuuksia kuvataan erilaisilla huoneakustisilla mittaluvuilla kuten jälkikaiunta-aika, puheensiirtoindeksi, kaiuntasäde ja leviämismuunnos. Näille mittaluvuille on kuitenkin annettu tiettyjä ehtoja niiden soveltuvuuden kannalta. Sellainen on esimerkiksi jälkikaiunta-aika, joka usein lasketaan käyttämällä Sabine yli 100 vuotta sitten kehittämää kaavaa. Kaava toimii hyvin pienissä suorakulmion muotoisissa tiloissa. Useat huoneakustiikan laskentamallit olettavat äänikentän diffuusiksi, joka tarkoittaa tilannetta, jossa äänilähde tuottaa samalla ääniteholla tarkastelupisteeseen kaikista suunnista yhtä paljon ääntä. [2] Teollisuushallit eivät kuitenkaan yleensä täytä diffuusin äänikentän ominaisuuksia. Tästä syystä teollisuushalleissa jälkikaiuntaa laskiessa Sabine kaava ei ennusta välttämättä luotettavia tuloksia.



© 2025 Riku Tanila, Esa Nousiainen, Rauno Pääkkönen, Jesse Lietzén ja Mikko Kylliäinen. Tämä on avoimesti julkaistu teos, joka noudattaa Creative Commons NIMEÄ 4.0 Kansainvälinen –lisenssiä (CC BY 4.0). Teosta saa kopioida, levittää, näyttää ja esittää julkisesti ja siitä saa luoda johdannaisteoksia, kunhan tekijän nimi ja lähde mainitaan asianmukaisesti.

Teollisuushallien jälkikaiunta-ajan määrittämisessä tulisi käyttää mahdollisesti jotain toista jälkikaiunta-ajan laskentatapaa luotettavien tulosten saamiseksi. Tämän lisäksi on syytä ottaa huomioon muita huoneakustiikan mittalukuja, jotka voivat kuvata teollisuushallien huoneakustisia ominaisuuksia paremmin kuin jälkikaiunta-aika. Tällainen mittaluku on esimerkiksi leviämismuunnos, johon vuonna 2022 julkaistu standardi SFS 5907 Rakennusten akustinen suunnittelu ja laatuluokitus antaa ohjeistoja teollisuustiloille. [3]

2 TEOLLISUUSHALLIEN TYYPILLISET OMINAISUUDET

Teollisuusrakennuksille tyypillisiä ominaisuuksia ovat suuret vapaakorkeudet, tilan muuntojoustavuus ja yhtenäinen tilavuus. Suuren yksikerroksisen hallin lisäksi teollisuusrakennuksissa on tavallisesti useampikerroksisia toimistoja tai aputiloja. Tuotantotiloissa on usein äänekkäitä koneita sekä korkea taustamelun äänitaso johtuen ilmanvaihdosta. Työpisteiden määrä tuotantotilassa vaihtelee tilan käyttötarkoituksen mukaan.

Teollisuusrakennuksen kantava runko koostuu usein pilari-palkkirungosta. Runko suunnitellaan teollisuushallin muuntojoustavuuden sekä tuotantotoiminnan perusteella. Tämä johtaa usein vaakarakenteiden pitkiin jänneväleihin ja pieneen pystyrakenteiden määrään. Teollisuushallien korkeus määritetään tilan käyttötarkoituksen mukaan. Hallin korkeuteen vaikuttavat myös koneiden ja laitteiden tarvitsema tila. Teollisuushallien julkisivut ovat yleensä teräsbetonisia tai pelti-villa-pelti elementtejä.

Teollisuushallien pituus on usein kolme kertaa suurempi kuin huonekorkeus. Tämän lisäksi korkeat kalusteet, kuiva ilma, samansuuntaiset kovet pinnat ja suuri- tai epätasaisesti jakautuva absorptioala vaikuttavat siihen, että tilassa ei ole diffuusia äänikenttää. Tämä tekee huoneen akustisten ominaisuuksien määrittämisestä hankalaa, koska useat yksinkertaiset mallit olettavat äänikentän diffuusiksi. [4]

3 MÄÄRÄYKSET JA OHJEET

Vuonna 2004 julkaistu standardi SFS 5907 (2004) Rakennusten akustinen luokitus esitti teollisuustyöpaikoille ohjeistoja suurimmille sallituille jälkikaiunta-ajoille ja äänitason enimmäisarvoille. [5] Kun vuonna 2022 julkaistiin uusi SFS 5907 (2022) standardi Rakennusten akustinen suunnittelu ja laatuluokitus, oli suurin sallittu jälkikaiunta-ajan ohjeisto jätetty pois ja sen tilalle oli tullut leviämismuunnos, joka määrittää sen, paljonko ääni vaimenee etäisyyden kaksinkertaistuessa. Lisäksi äänitasojen enimmäisarvot korvattiin suurimmilla sallituilla keskiäänitasoilla ja uusi standardi esitti myös ohjeistoja tärinälle teollisuustyöpaikoilla. Standardissa esitetään ohjeistoja leviämismuunnoksen vähimmäisarvojen osalta laatuluokittain. Tästä voidaan päätellä se, että vaikka jälkikaiunta-aika onkin yksi yleisimmistä huoneakustiikan mittaluvuista, sen merkitys teollisuushallien suunnittelussa on pienempi kuin muissa tiloissa.

4 MALLINNUSMENETELMÄT

Yksinkertaisilla laskentamalleilla voidaan nopeasti saada tietoa tilan akustisista ominaisuuksista. Tällaisia menetelmiä ovat tilastollinen mallintaminen ja empiiriset mallit. Niiden etu on laskennan yksinkertaisuus, mutta huonona puolena on tulosten suuri virhemarginaali ja epävarmuus. Laskentamallit ja yhtälöt perustuvat mittauksista saatuihin kokeellisiin arvoihin tai yksinkertaistuksiin, jotka on johdettu akustiikan teoriasta. Mittaluvut, joita eri menetelmillä tutkitaan ovat äänenpainetaso ja jälkikaiunta-aika.

Tähän tutkimukseen on valittu äänenpainetason laskentaan Friberg, Sergejev, Thompson, Kuttruff ja Heerema -mallit. Jälkikaiunta-ajan laskentaan on valittu Sabine, Eyring, Millington, Friberg ja Heerema -mallit sekä standardissa SFS-EN 12354-6 (2003) esitetty jälkikaiunta-ajan laskentamalli. Eyringin ja Millingtonin malleista on lisäksi laskettu versiot, jossa otetaan huomioon ilman absorption vaikutus. Osaa oheisista laskentamalleista on lissensiaatin työssään tutkinut Keränen vuonna 2006. [6]

Huoneakustiikan simuloinnissa tilasta luodaan 3D-malli. Mallinnuksessa otetaan huomioon tilan seinät, lattia ja katto sekä suurimmat kalusteet. Mallin geometrian jokaisen yksityiskohdan mallintaminen ei paranna akustisten parametrien tulosta, vaan ainoastaan kasvattaa laskenta-aikaa. Mallinnus tehtiin Odeon Auditorium 17 ohjelmalla. Odeon sisältää materiaalikirjaston, josta nämä voidaan valita. Pinnoille valitaan lisäksi sirontakerroin materiaalin karheuden ja äänen taipumisen vaikutuksesta väliltä 0–1. Jos tilassa oli paljon epätasaisia objekteja pintojen edessä, sirontakertoimen arvoa kasvatettiin. [7]

5 MITTAUSMENETELMÄT

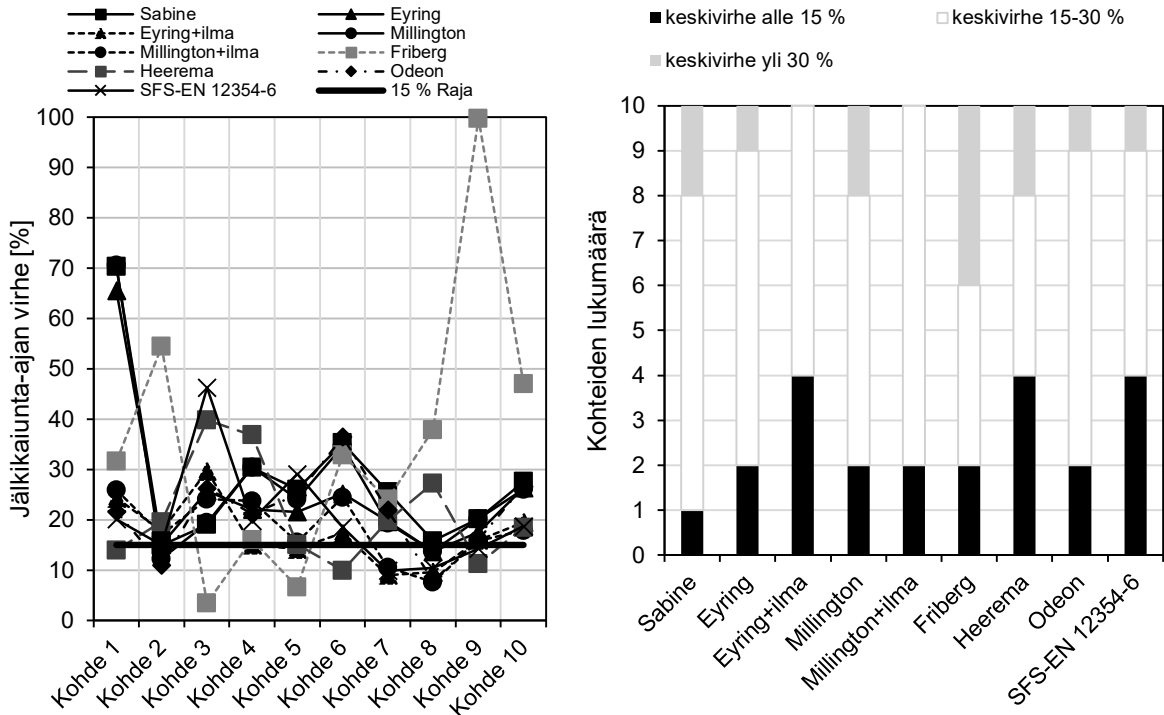
Jälkikaiunta-aikaa mitattiin katkaistun kohinan ja integroidun impulssivasteen menetelmällä. Mitattaessa jälkikaiunta-aikaa katkaistun kohinan menetelmällä, tilaan asetetaan ympärisäteilevä äänilähde 1,5 metrin korkeuteen lattiasta. Äänilähteen tuottama signaali on spektriltään vaaleanpunaista kohinaa (*pink noise*). Äänilähteen paikkojen lukumäärä määräytyy tilan koon mukaan. Ympärisäteilevän kaiuttimen avulla voidaan mitata myös etäisyysvaimennusta, josta voidaan laskea leviämismvaimennus. Äänilähde pyritään sijoittamaan äänekkään koneen läheisyyteen.

Jälkikaiunta-aika mitattiin tavallisella impulssivasteen integrointimenetelmällä. Työssä osoittautui impulssilähteenä hyvin edulliseksi käyttää kal. 9 mm kaasuasetta, jolla saadaan 10 m säteellä noin 115 dB L_{pAmax} herätetaso. Mitataan käytännössä merkinantopatruunan pamauksen vaimeneminen. Tämä riittää 30 dB jälkikaiunta-ajan määrittämiseen tavallisessa teollisuuden tuotantotilassa, vaikka taustamelu olisi korkea. Kaasuaseen laukauksen impulssia käytetään myös leviämismvaimennuksen mittauksessa. Mittauskäytäntö on samanlainen kuin kaiuttimella tehtävässä mittauksessa.

6 TULOKSET

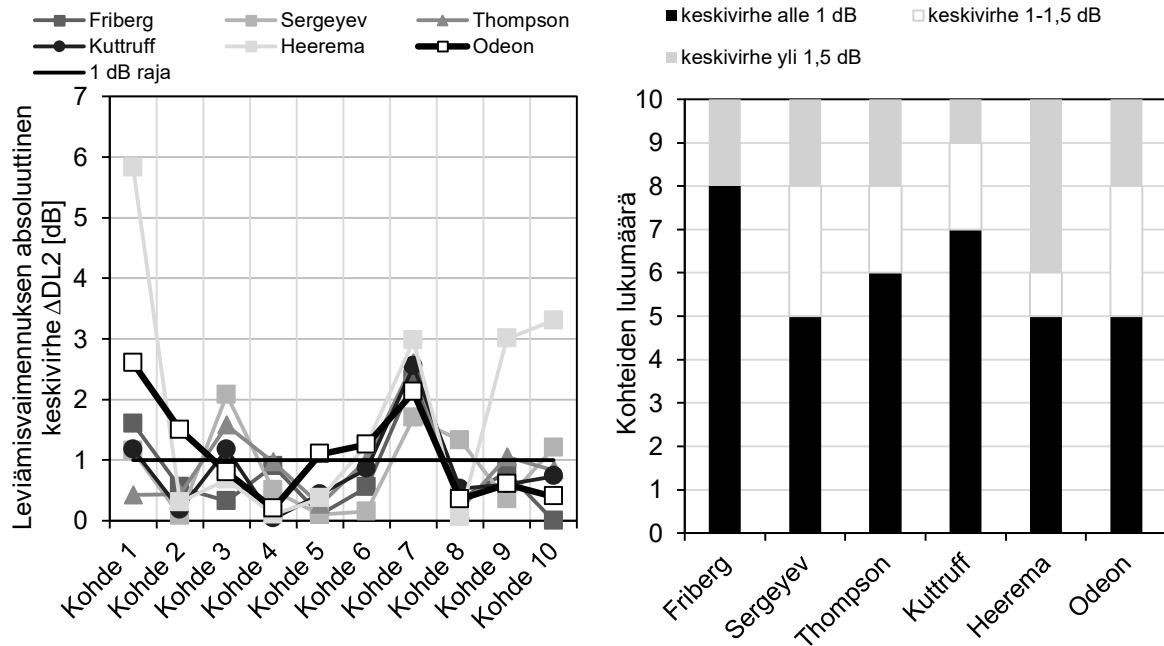
Virhetarkastelussa mitattuja ja mallinnettuja tuloksia verrataan toisiinsa suhteellisen keskivirheen avulla. Laskenta- ja mallinnustulokset, joiden suhteellisen virheen keskiarvo on alle 15 %, voidaan pitää luotettavina. Jos suhteellinen keskivirhe on yli 30 %, ei mallinnustulokseen voida luottaa. Kun 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. Kohteita 4...10 yhdisti se, että ne olivat tilavuuksiltaan alle 20 000 m³. Tilavuuksiltaan suurimmissa halleissa (kohteet 1 ja 3), joiden tilavuudet olivat yli 25 000 m³, ei yksikään malli ennustanut luotettavia tuloksia molemmissa tiloissa.



Kuva 1. Mallinnettu jälkikaiunta-aika ja virhetarkastelu.

Kolmanneksi suurin tila oli noin 15 000 m³ (kohde 4). Siinä ainoastaan Eyring + ilma -mallin keskivirhe oli alle 15 %. Tästä voidaan päätellä se, että suurissa yli 15 000 m³ tiloissa mallien luotettavuus heikkenee huomattavasti. Mitattuja jälkikaiunta-aikoja kohdeissa vastasi parhaiten Eyringin malli, jossa oli otettu huomioon ilman absorptio.



Kuva 2. Laskettu leviämismuutos ja virhetarkastelu.

Leviämismaimennukselle luotettavuustarkastelussa käytettiin 1 dB rajaa. Se vastaa 4 dB eroa 16 m etäisyydellä melutasossa, mikä on jo kuultavissa. Mallien leviämismaimennuksen absoluuttisen virheen keskiarvot on esitetty kuvassa 2. Tilanteissa, joissa keskivirhe on yli 1,5 dB, mallinnustulosta ei voida pitää luotettavana. Tämä vastaa 16 m etäisyydellä 6 dB eroa mittaustulokseen.

Leviämismaimennuksen mallinnuksessa yksinkertaiset mallit eivät osanneet ottaa huomioon esteitä matkalla, vaan ne toimivat parhaiten suoralla mittaustulolla, 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.

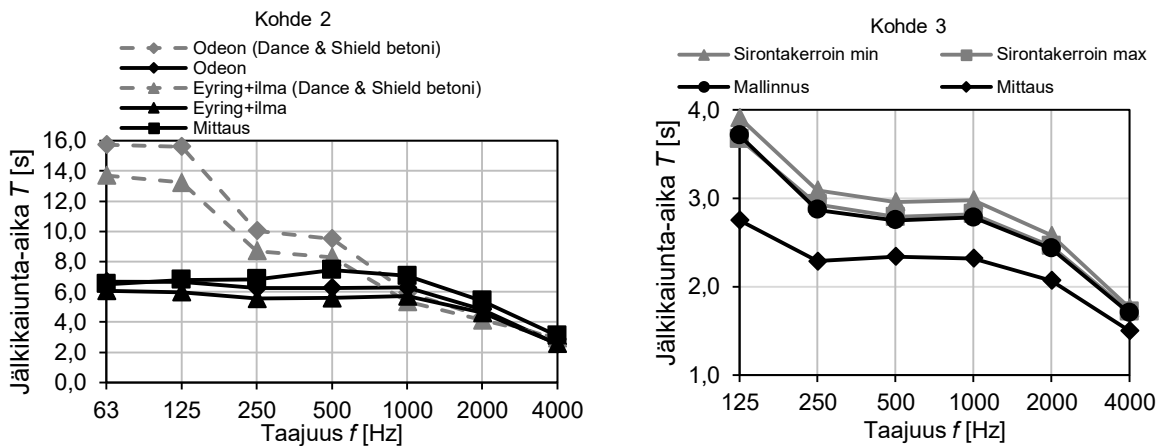
Työssä saatuja tuloksia verrattiin standardin SFS 5907 (2004) ja SFS 5907 (2022) luokkiin taulukossa 1.

Taulukko 1. Mittaustulokset ja tilavuudet sekä standardin SFS 5907 (2004) ja SFS 5907 (2022) esittämät suurimmat sallitut jälkikaiunta-ajan ja leviämismaimennuksen luokkakohtaiset ohjearvot.

	V [m ³]	Mitattu T [s]	Luokka A [s]	Luokka B [s]	Luokka C [s]	Luokka D [s]	DL ₂ [dB]	V [m ³]	Mitattu	Luokka A1	Luokka A2	Luokka A3	
Kohde 1	55 000	5	1,5	2	2,2	2,6		Kohde 1	55 000	4	9	7	5
Kohde 2	5 700	6,1	1,2	1,7	2	2,4		Kohde 2	5 700	3	9	7	5
Kohde 3	29 000	2,2	1,5	2	2,2	2,6		Kohde 3	29 000	3	9	7	5
Kohde 4	15 000	2,3	1,5	2	2,2	2,6		Kohde 4	15 000	3	9	7	5
Kohde 5	7 000	1,5	1,2	1,7	2	2,4		Kohde 5	7 000	4	9	7	5
Kohde 6	14 000	1,3	1,5	2	2,2	2,6		Kohde 6	14 000	5	9	7	5
Kohde 7	10 000	1,4	1,2	2	2	2,4		Kohde 7	10 000	6	9	7	5
Kohde 8	7 000	1,3	1,2	1,7	2	2,4		Kohde 8	7 000	4	9	7	5
Kohde 9	9 000	1,5	1,2	1,7	2	2,4		Kohde 9	9 000	5	9	7	5
Kohde 10	7 000	1,9	1,2	1,7	2	2,4		Kohde 10	7 000	3	9	7	5

Taulukosta nähdään, että jälkikaiunta-ajan osalta kaksi kohteista ylitti selkeästi tavoitearvot, yksi sijoittui luokkaan D, kaksi luokkaan C ja loput viisi kohteista vastasi jälkikaiunta-ajan puolesta tavanomaista tasoa parempaa suunnittelua. Kolme kohteista täyttää leviämismaimennuksen osalta luokan A3 vaatimuksen. Muiden kohteiden tulokset ovat välillä 3–4 dB. Mittauskohteissa suurimmassa osassa mittaustuloksilla ei ollut esteitä äänilähteen ja mikrofonin välissä, koska tilat olivat suuria avoimia halleja. Silloin leviämismaimennuksen teoreettinen maksimiarvo on 6 dB. Näin ollen luokan A2 arvon täyttäminen vaatii jonkinlaista estettä mittaustulolle.

Kuvassa on esitetty absorptiokertoimien ja sirontakertoimien vaikutus mallinnustulokseen.



Kuva 3. Absorptiokertoimien ja sirontakertoimen vaikutus mallinnukseen.

Absorptiokertoimien ja sirontakertoimien valinnalla on suuri merkitys mallinnustulokseen tilojen suurien tilavuuksien takia

7 YHTEENVETO

Jälkikaiunta-aikaa parhaiten ennusti Eyringin malli, jossa otettiin huomioon ilman absorptio. Toiseksi parhaiten jälkikaiuntaa ennusti standardin SFS-EN 12354-6:2003 esittämä laskentatapa, joka ottaa huomioon kalusteiden sironnan. Mallien tuloksista kuitenkin alle 50 % oli suhteelliselta virheeltään alle 15 %, joten ne eivät ennustaneet tarkasti jälkikaiunta-aikaa. Niillä saadaan kuitenkin hyvä käsitys tilan jälkikaiunta-ajan suuruusluokasta.

Leviämismallinnusta parhaiten ennusti Fribergin malli ja toiseksi parhaiten Kuttruffin malli. Mallien toimivuus Odeonia lukuun ottamatta perustui siihen, että mitattavilla linjoilla ei ollut esteitä. Leviämismallinnuksen arvoa voidaan parantaa usein oikein sijoitetuilla väliseinillä tai seinäkkeillä. Tällaisissa tilanteissa kyseiset laskentamallit eivät sovelletuneet leviämismallinnuksen tarkasteluun.

Työssä huomattiin myös, että jälkikaiunta-ajan osalta tilat täyttävät paremmin vaatimukset kuin leviämismallinnuksen osalta. Lisäksi absorptiokertoimien valinta vaikuttaa oleellisesti mallinnustulokseen erityisesti, jos tilassa on paljon heijastavia pintoja. Odeonissa on myös merkitystä sillä, että sirontakerroin valitaan oikein.

Akustiset mittaukset tehtiin katkaistun kohinan menetelmällä ja integroidun impulssiväesteen menetelmällä. Mittaustavoista erityisesti impulssimenetelmällä tehdyt mittaukset, jossa herätteenä käytettiin kaasuseen laukausta, sopivat tämän tutkimuksen perusteella teollisuustilojen jälkikaiunta-ajan ja leviämismallinnuksen mittaamiseen hyvin, koska menetelmä on logistisesti helppo ja nopea verrattuna kaiuttimilla tehtyyn katkaistun kohinan tai sinipyyhkäisyyn menetelmään. Kaiutinpaikkojen vaihtamiseen menee aikaa ja vaivaa, ja taustamelutaso usein tekee mahdottomaksi järkevän kokoisella ja tehoisella kaiutinjärjestelmällä mittaamisen.

8 VIITTEET

- [1] Tanila, R. (2025). Teollisuushallien akustisten parametrien määrittäminen mittaamalla ja mallintamalla. Diplomityö, Tampereen Yliopisto, Rakennetun Ympäristön tiedekunta, Tampere.
- [2] Kuttruff, H. (1985). Sound propagation in working environments. Proceedings of the FASE Symposium, Thessaloniki, Kreikka, s. 69–73.
- [3] SFS 5907 (2022). Rakennusten akustinen suunnittelu ja laatuluokitus. Suomen Standardoimisliitto SFS, Helsinki.
- [4] SFS-EN 11690-3:1997 (1997). Acoustics. Recommended practice for the design of low-noise workplaces containing machinery. Part 3: Sound propagation and noise prediction in workrooms. Suomen Standardoimisliitto SFS, Helsinki.
- [5] SFS 5907 (2004). Rakennusten akustinen luokitus. Suomen Standardoimisliitto SFS, Helsinki.
- [6] Keränen, J. (2006). Akustinen mallintaminen työpaikkojen meluntorjuntasuunnittelussa. Lisensiaatintyö, Turun yliopisto, Fysiikan laitos, Turku.
- [7] ODEON Room Acoustics Software, Version 17, User manual. (2021). Odeon A/S, Lyngby, Tanska.