

# AMMUNNAN JA RÄJÄYTYSTEN AIHEUTTAMA TÄRINÄ

Timo Markula, Tapio Lahti, Timo Peltonen

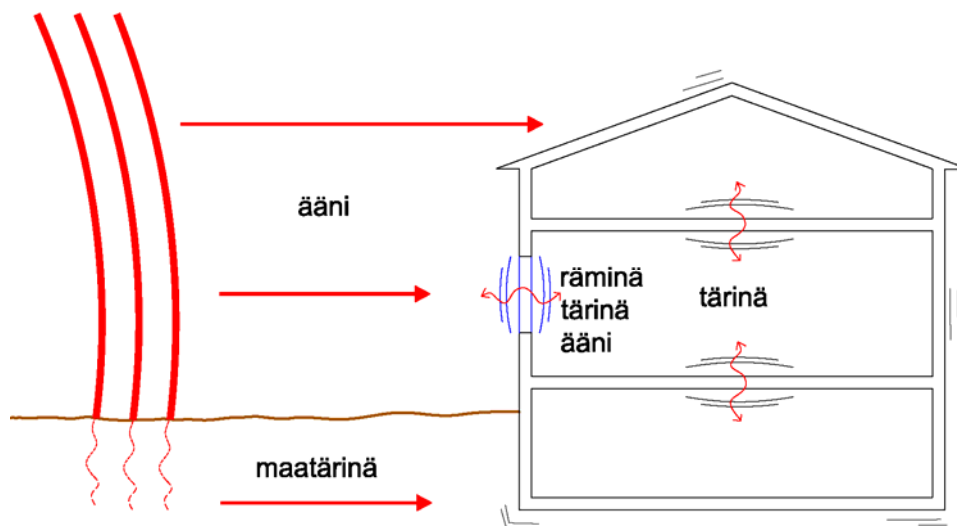
Insinööritoimisto Akukon Oy  
Kornetintie 4A, 00380 HELSINKI  
timo.markula@akukon.fi

## 1 JOHDANTO

Raskaiden aseiden ammunta ja räjäytykset synnyttävät impulssimaisia ja pienitaajuisia ääni- ja värähtelyaaltoja, jotka voivat edetä suurten etäisyyksien päähän. Aaltojen aiheuttama värinä sekä kuulo- ja tuntoaistimukset muodostavat yhden Puolustusvoimien toiminnan merkittävimmistä ympäristöhaitoista.

Ampuma- ja harjoitusalueiden ympäristön asukkaiden valitukset liittyvät melun, paineen ja värinän yhteisvaikutuksen (kuva 1) tuottamaan koettuun häiritsevyyteen sekä pelkoon ääni- ja värinäpulssien rakennuksiin aiheuttamien vaurioiden syntymisestä. Ihmisten kokeman subjektiivisen häiriön ohella potentiaalisena vaikutuksena voi olla rakennusten vaurioituminen. Asukkaiden kokema häiriö välittyy tavallisemmin värinän ja värinän kuin suoraan kuultavan äänen kautta. Värinän mahdollisesti aiheuttamia vaurioita ovat esimerkiksi ikkunoiden rikkoutuminen tai halkeamat seinissä.

Tässä työssä tutkittiin räjäytyksistä ja ammunnoista aiheutuvien ääni- ja värähtelyaaltojen etenemistä ilmassa ja maaperässä, niiden kytkeytymistä rakenteisiin ja rakennuksiin sekä arvioitiin pulssien voimakkuuden ja muiden ominaisuuksien vaikutuksia rakenteiden ja asukkaiden kannalta. Tavoitteena oli selvittää, millä edellytyksillä pulssit aiheuttavat rakenteissa havaittavaa värinää, sekä arvioida äänen ja värähtelyn voimakkuuksia, joilla erilaiset rakenteet voivat värähtää tai vaurioitua.



Kuva 1. Ammunnan ja räjäytysten aiheuttama ääniaalto aiheuttaa rakennuksissa värinää ja värinää. Pääasiallinen heräte on suoraan rakennuksen ulkovaippaan kohdistuva ääniaalto; maatärinän merkitys on selvästi vähäisempi.

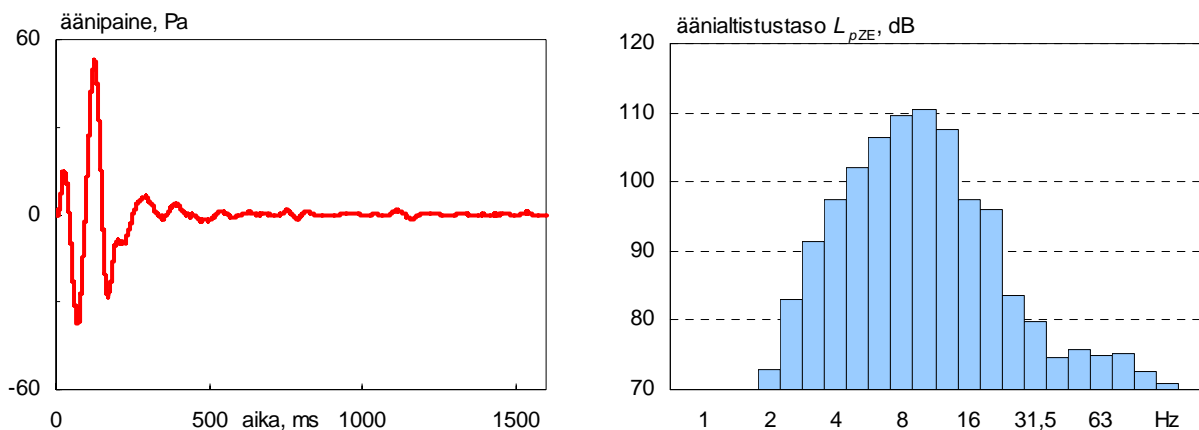
## 2 ETENEMINEN JA KYTKETYMINEN

Räjätysten ja raskaiden aseiden ammunnan aiheuttama rakennusten värinä on ilmassa etenevän ääniaallon kuljettaman energian herättämää. Energia siirtyy rakennuksen värinäksi pääosin suoraan ääniaallon paineesta rakenteiden värähtelynopeudeksi.

Myös rakennusten luona maaperässä havaittava värinä on ilmassa edenneestä ääniaallosta siihen uudelleen myöhemmin kytkeytyntä. Ilmasta maavärinäsi siirtynyt energian osa ilmenee maassa aina Rayleigh-aaltona [1]. Maaperässä havaittava värinä ei siis kulkeudu räjäytys- tai ampumapaikalta asti maaperää pitkin seismisinä värähtelyaaltoina, kuten kallioräjäytystöissä tai maanjäristyksessä syntyvä värinä. Maaperästä rakennukseen siirtyvän värähtelyenergian osuus ei kuitenkaan ole yhtä merkittävää kuin suoraan ääniaallosta siirtyvä energia.

Suuren räjäytyksen (räjähdysainetta esim. 50–200 kg) synnyttämä painepulssi on usean kilometrin etäisyydellä vaimentunut lineaariselle alueelle ja asettunut muodoltaan. Sen kesto on n. 200–300 ms, se koostuu 3–4:stä puoliaallosta ja spektrin maksimi on yleensä välillä 5–20 Hz.

Esimerkki pulssin aaltomuodosta ja spektristä on esitetty kuvassa 2. Ääniaallon aiheuttamaa liikettä maaperässä ja rakennuksessa on esitetty kaavamaisesti kuvassa 3.



Kuva 2. Tyypillinen suuren räjäytyksen ääniaallon painepulssi ja spektri usean kilometrin etäisyydellä.

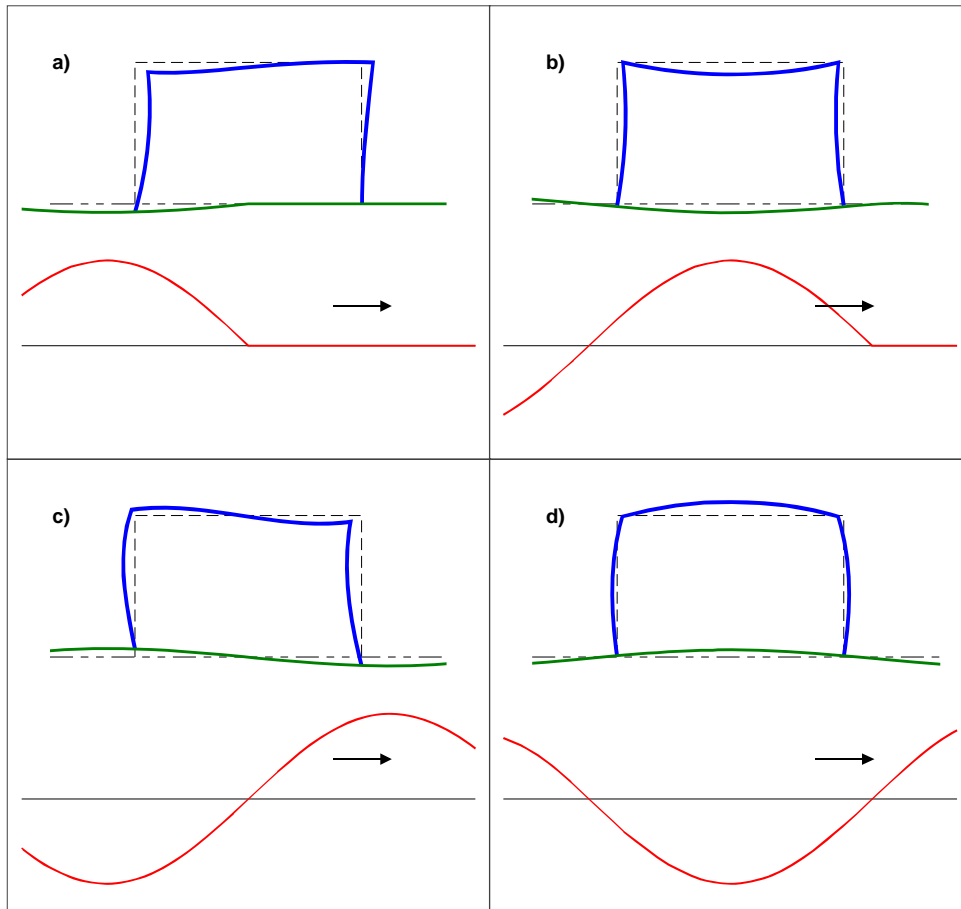
## 3 VAIKUTUSTEN ARVIOINTI

Lähimmät kirjallisuudesta löytyvät ammuntaan ja räjäytyksiin soveltuvat värinän raja-arvot vaurioiden syntymiselle ovat peräisin avolouhoksista tai maanalaisista räjäytyksistä. Kirjallisuudessa esiintyvät alimmat rajat värähtelynopeuden huippuarvolle rakennuksen perustuksista mitattuna ovat johdonmukaisesti

$$v_{\text{peak}} \geq 5 \text{ mm/s}$$

Rakennuksiin kohdistuvien ääniaaltojen tutkimista on tehty erityisesti yliaänipamauksien suhteen, mutta myös räjäytyksien vaikutuksia on tutkittu. Usein raja-arvo on määritetty hyvin pienenä todennäköisyytenä ikkunoiden särkymiselle tai levyseinien hiushalkeamille. Raja-arvoissa on melko suuri hajonta; alimmat rajat ovat noin

$$L_{pZ\text{peak}} \geq 135 - 140 \text{ dB}$$



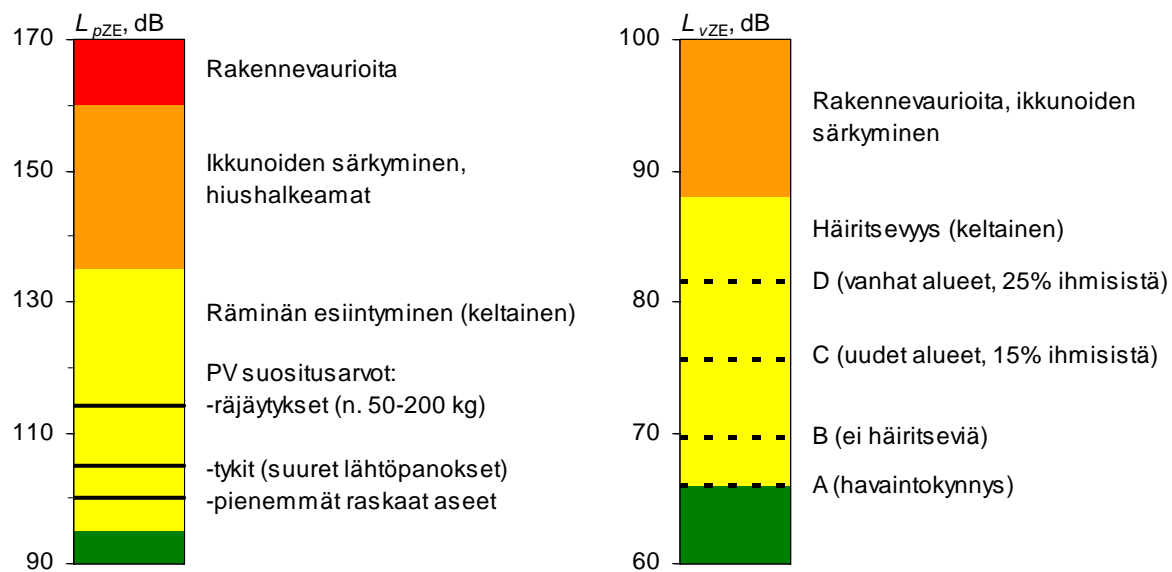
Kuva 3. Kaavamainen kuvaus talon ulkovaipan liikkeestä sivulta katsoen, kun painepulssi ohittaa talon kulkien vasemmalta oikealle.

Ihmisten kokeman häiritsevyyden suhteen sen sijaan yhtä selkeitä rajoja ei kirjallisuudesta löydy. Pienitaajuinen impulssimainen värinä eroaa esim. liikennetärinästä monessa suhteessa. Ammunnan ja räjäytysten aiheuttama värinä on impulssimaisempaa, jolloin se saattaa aiheuttaa ihmisessä säpsähdysreaktion. Toisaalta taas kunkin tapahtuman kesto on selvästi liikennetärinän tapahtumaa lyhyempi ja tapahtumia on yleensä tietyssä ajanjaksossa vähemmän, ainakin tieliikenteeseen verrattuna.

Ampumatärinälle ei ole kuitenkaan olemassa suositusarvoja. Toistaiseksi liikennetärinän suositusarvoja [2] voitaneen käyttää suuntaa-antavina vertailukohtina myös ampumatärinälle.

Yksi merkittävä, mahdollisesti jopa merkittävin, häiritsevyyttä lisäävä tekijä on ikkunoiden, ovien, koriste-esineiden yms. värinä. Rärinän häiritsevyyttä lisäävä vaikutus on kiistaton, mutta esiintymiskynnystä on tutkittu niukasti. Amerikkalaisessa tutkimuksessa [3,4] rärinää saatiin esiintymään, kun huippuäänitaso  $L_{pZ_{peak}}$  oli karkeasti noin 108–112 dB. Rärinää esiintyi lähes aina, kun huippuäänitaso oli 113–115 dB ja lähes kaikki osat (ikkunat, astiat jne.) rämisivät kun huippuäänitaso oli yli 121 dB.

Standardeista ja muusta kirjallisuudesta löytyvistä raja-arvoista on esitetty synteesi kuvassa 4. Arvot ovat esitetty sekä äänialtistustasolle että nopeusaltistustasolle, jotta eri suureina kirjallisuudessa esitetyt raja-arvot ovat keskenään vertailukelpoisia.



Kuva 4. Kirjallisuudessa esiintyvät yleisimmät raja-arvot äänialtistustasolle  $L_{pZE}$  (vasen) ja nopeusaltistustasolle  $L_{vZE}$  (oikea). Värähtelynopeuden rajat ovat rakennevaurion osalta painottamattomia ja häiritsevyyden osalta viitteen [2] mukaisesti painotettuja.

#### 4 MITTAUKSET

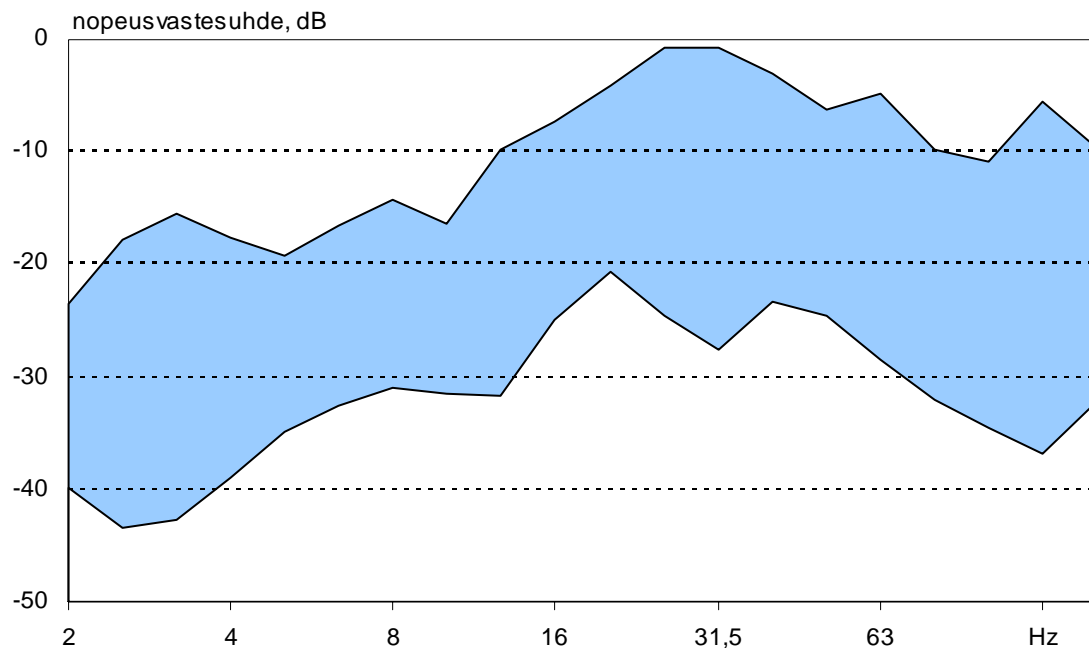
Yhdistettyjä tärinä- ja melumittauksia tehtiin vuosina 2007–08 kahden Puolustusvoimien räjäytysalueen ja yhden tykistön ampuma-alueen ympäristössä yhteensä kymmenellä rakennuksella, joista seitsemän oli asuinkäytössä. Kaikissa kohteissa mitattiin yhtä aikaa sekä värähtelyä että ääntä.

Mittauksissa vaurioriskin rajat ylittyivät kahdessa Puolustusvoimien rakennuksessa, mutta asuintaloilla ne alittuivat melko selvästi. Muutamana asuintalon yläkerrassa mitattiin lattiasta värähtelynopeuksia, jotka ylittävät liikennetärinän häiritsevyyden alimmat rajat  $v_w$  0,15 ja 0,3 mm/s. Alakertojen lattioissa värähtelyn voimakkuus oli alle havaintokynnyksen. Toisin sanoen tärinä ei varsinaisesti liene primääri häiriön aiheuttaja.

Puolustusvoimien suositusarvo melun häiritsevyydelle on  $L_{pCE}$  100 dB [5]. Muutamalla asuintalolla mitattu melu oli tätä voimakkaampaa. Lisäksi usealla talolla saattaa esiintyä ikkunoiden ym. rakenneosien ja esineiden rämää, joka on yksi merkittävimmistä häiritsevyyttä lisäävistä tekijöistä.

Vaurioriskin ja häiritsevyyden arvioinnin lisäksi mittauksista saatiin merkittävää uutta tietoa puurakenteisten omakotitalojen vasteesta pienitaajuiselle ääniaallolle. Tutkimuksessa vastetta kuvattiin käsitteen nopeusvastesuhde avulla. Se on samantapainen energiasuhde kuin absorptiosuhde, täsmällisesti rakennuksen ulkovaipan normalisoidun akustisen pinta-admittanssin itseisarvon neliö.

Nopeusvastesuhde desibeleinä on määritelmän mukaan 0 dB, kun seinä liikkuu samalla nopeudella kohdistuvan ääniaallon kanssa. Nopeusvastesuhde 0 dB vastaa siis tilannetta, jossa äänipainetaso 86 dB aiheuttaa rakenteessa 1 mm/s värähtelynopeuden kyseisellä taajuudella.



Kuva 5. Nopeusvastesuhteiden hajonta taajuuden funktiona kaikkien mitattujen rakennusten ulkoseinien keskikohdassa.

Mitatuissa rakennuksissa nopeusvastesuhde oli suurimmillaan noin 31,5 Hz oktaavilla (kuva 5). Sattumalta tällä taajuusalueella on tyypillisesti juuri tykkimelun maksimi. Suurten räjäytysten (noin 50-200 kg) maksimi on noin yhtä oktaavia alempana, jossa nopeusvastesuhteet olivat enimmillään noin -10 dB. Tosin räjäytyksilläkin on kuitenkin merkittävästi energiaa myös tätä seuraavalla eli 31,5 Hz oktaavilla. Tyypillinen suomalainen puurakenteinen omakotitalo olisi siten ikään kuin viritetty tykkimelulle, mutta herää herkästi myös räjäytysmelulle.

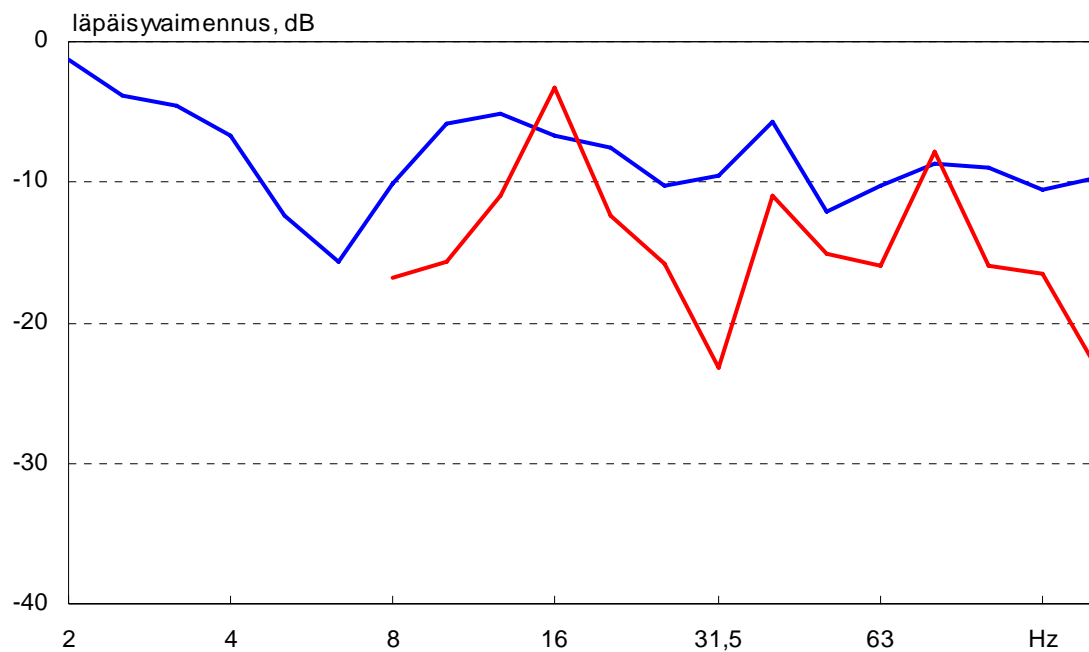
Mittauksista saatiin myös muutamia tuloksia rakennusten äänieristyksestä pienillä taajuuksilla (kuva 6). Äänieristys alle 100 Hz taajuuksilla oli odotetun heikko, keskimäärin noin 10 dB.

## 5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tärinähaittojen arviointia suositellaan ensisijaisesti tehtäväksi mittauksin. Mittauksista pääasiallinen menetelmä on kaksikanavainen järjestelmä, jossa mitataan yhtä aikaa julkisivuun kohdistuva melutaso ja tärinää sopivaksi katsotusta rakenteesta. Jos epäillään rakenneauriota, tärinä mitataan perustuksista. Jos taas kyse on ennemminkin häiritsevyydestä, mitataan lattian ja/tai seinän keskikohdasta.

Kriittisissä kohteissa mittaus voidaan tehdä monikanavaisella järjestelmällä, jolloin tehdään edellä mainittujen kahden mittauksen lisäksi mittaukset sisämelulle ja useamman rakenteen tärinälle. Toisaalta yksinkertaisimmillaan karkeaan kartoitustyyppiseen ensiarvioon voidaan käyttää pelkkää yksikanavaista äänimittausta.

Laskennalliset menetelmät vaikuttavat lupaavilta tavoilta tehdä ensimmäisiä arvioita tärinähaitoista. Menetelmien etuna on, että laskennan avulla voidaan huomattavasti pienemmällä työllä kattaa huomattavasti suurempia alueita ja tehdä myös etukäteissuunnittelua. Laskenta-menetelmien käytössä on kuitenkin syytä noudattaa varovaisuusperiaatetta eli niillä on syytä pyrkiä laskemaan pahinta mahdollista tilannetta.



Kuva 6. Läpäisyvaimennus pienillä taajuuksilla kahdessa asuintalossa..

## VIITTEET

1. MADSHUS C, LØVHOLT F, KAYNIA A, HOLE L R, ATTENBOROUGH K & TAHERZADEH S, Air-ground interaction in long range propagation of low frequency sound and vibration—field tests and model verification. *Applied Acoustics* **66**(2005), 553-578.
2. TALJA A, *Suositus liikennetärinän mittaamisesta ja luokituksesta*. VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, tiedotteita **2278**, Espoo 2004. 50 s.
3. SCHOMER P D, HOTTMAN S D & ELDRED K M, *Mitigation of the building vibration and rattle induced by blast noise: Development of a test facility and systematic investigative procedures*. US Army Corps of Engineers, interim report, N-87/25, Champaign, USA 1987. 78 s.
4. SCHOMER P D & AVERBUCH A, Indoor human response to blast sounds that generate rattles. *J Acoust Soc Amer* **86**(1989)2, 665-673.
5. JALONIEMI R, PÄÄKKÖNEN R & PARRI A, *Raskaiden aseiden ja räjähteiden ympäristömelun arviointiohje*. Puolustusvoimat, Ohje R 20/22.8/D/I, Hamina 2005. 47 s.