

MATERIAALIEN JA RAKENTEIDEN VÄRÄHTELYOMINAISUUDET

Tuomo Kärnä

TIIVISTELMÄ

Rakenteiden Mekaniikka, Vol. 24
No 1 1991, ss. 55 - 63

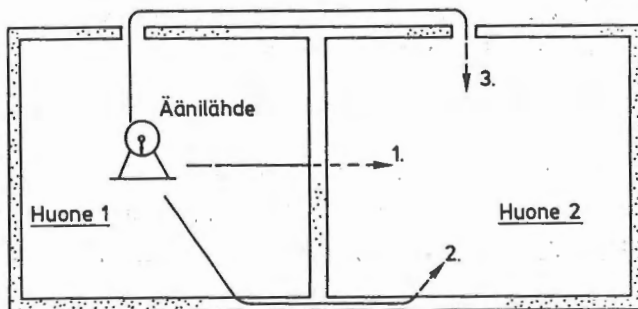
Kirjoituksessa käsitellään lyhyesti rakenteiden ääneneristävyyttä värähtelymekaniikan näkökulmasta. Yksinkertaisen seinämän ääneneristävyyttä verrataan yhden vapausasteen värähtelijän vasteeseen olettaen, että ns. sivutiesiirtymät on estetty. Vertailu osoittaa, että seinämän eristävyys määräävät normaalit värähtelymekaaniset parametrit; massa, jäykkyys ja vaimennus. Tavallisten seinärakenteiden eristävyys kasvaa 6 dB massan tai äänen taajuuden kaksinkertaistuess. Toisaalta eristävyttä heikentää resonanssityyppinen ns. koinsidenssi-ilmiö, jossa äänienergia siirtyy seinämän läpi rakenteen taivutusvärähtelyjen välityksellä.

JOHDANTO

Ääneneristystoimenpiteet keskittyvät yleensä joko äänen etenemisen estämiseen tai itse äänilähteen eliminoimiseen, kuva 1. Seuraavassa tutkitaan näissä kahdessa perustilanteessa esiintyviä fysikaalisia ilmiöitä:

- äänen suora siirtyminen yksinkertaisen seinän läpi
- tärinä- ja äänilähteen eristämässä käytettävän systeemin ominaisuudet.

Esityksessä nojaututaan värähtelymekaniikan perusteisiin ja tarkastellaan vain näitä yksinkertaisia perustapauksia.

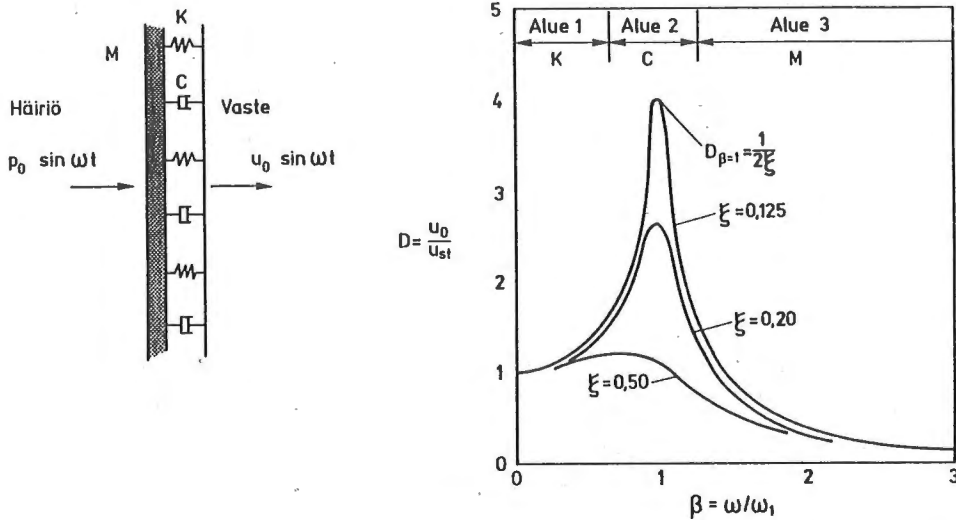


Kuva 1. Ilmaäänien siirtyminen huoneesta toiseen
1. suora siirtymä
2...3 sivutiesiirtymiä

YKSINKERTAINEN SEINÄ ÄÄNEN ESTEENÄ

Seinä yhden vapausasteen värähtelijänä

Ilmassa etenevä ääniaalto on ilmamolekyylien pitkittäistä aaltoliikettä ja siihen liittyy jaksoittaista ilmanpaineen vaihtelua. Seinään kohdistuva ääniaalto panee näin ollen seinän värähtelemään ja tästä tulee äänilähde viereiselle huoneelle. Havainnollisuuden vuoksi tarkastellaan seinämää ensin yhden vapausasteen värähtelijänä, kuva 2.



Kuva 2. Seinä yhden vapausasteen värähtelijänä.
 D on dynaaminen vahvistuserroin
 $u_{st} = p_0/K$
 $\omega_1 = (K/M)^{1/2}$ on ominaiskulmataajuus ($\omega_1 = 2\pi f_1$)
 $\xi = C/(2\pi f_1 M)$ on vaimennussuhde

Yksinkertaisen värähtelijän dynaaminen toiminta määräytyy kolmen parametrin mukaan: massa M , vaimennus C ja jäykkyys K . Jos herätteenä on jaksollinen pakko-voima $p(t) = p_0 \sin(2\pi f t)$, on rakenteen siirtymäamplitudi u_0 kuvan 2 mukainen.

Kun herätteen taajuutta vaihdellaan voidaan rakenteen vasteessa havaita karkeassa mielessä kolme eri aluetta, joissa vaste määräytyy kulloinkin yhden parametrin mukaan:

Alue 1: $f \ll f_1 \longrightarrow$

voima vaihtelee niin hitaasti, että vaimennus- ja massavoimat eivät mobilisoidu. Vaste määräytyy jäykkyyden K mukaan (kvasistaattisesti)

Alue 2: $f \approx f_1 \longrightarrow$

resonanssitilanne, jossa vaste määräytyy vaimennuksen C mukaan

Alue 3: $f \gg f_1 \longrightarrow$

voima vaihtelee niin nopeasti, että massavoimat pitävät rakenteen likimain paikallaan. Vaste määräytyy siis pääasiassa massan M mukaan.

Eristävyys

Seinämän ääneneristävyys R määritellään vertaamalla rakenteeseen kohdistuneen äänen tehoa P_1 ja läpi menneen äänen tehoa P_2 keskenään seuraavasti:

$$R = 10 \log_{10} (P_1/P_2) \quad (1)$$

Eistävyys käsitellään siis desibeli-yksiköissä.

Kun seinää tarkastellaan edelleen yhden vapausasteen värähtelijänä voidaan ääneneristävyydelle johtaa /1/ lauseke

$$R = 10 \log_{10} \left[\left(1 + \frac{C}{2 \rho_0 c_0 \sec \Theta} \right)^2 + \left(\frac{M\omega - K/\omega}{2 \rho_0 c_0 \sec \Theta} \right)^2 \right] \quad (2)$$

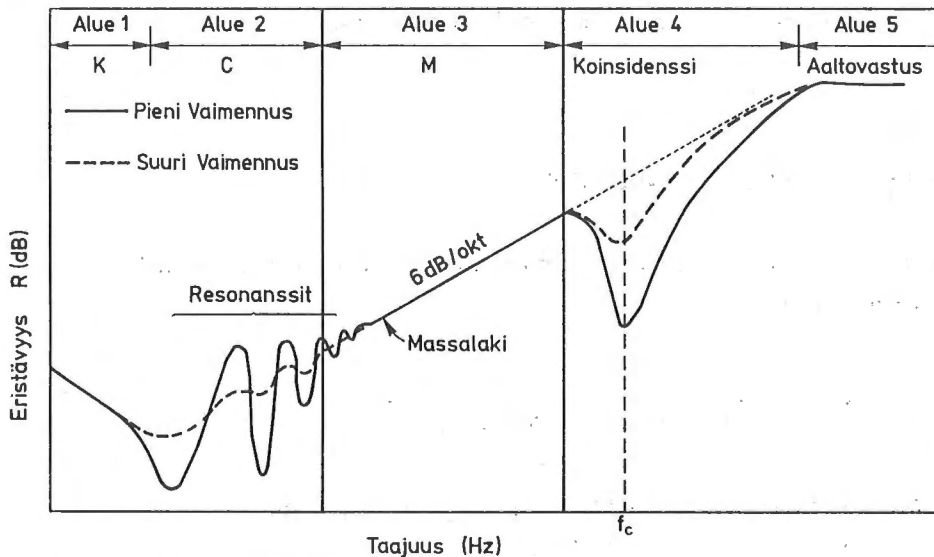
missä M, K ja C on määritelty pinta-alayksikköä kohden
 ρ_0 on ilman tiheys
 c_0 äänen nopeus ilmassa
 Θ ääniaallon kohtauskulma (ks. kuva 4)
 ω ääniaallon kulmataajuus

Todellisilla rakenteilla on kuitenkin aina useita ominaistaajuuksia ja -muotoja, joiden kanssa ääniaalloilla on mahdollisuus resonoida. Tämä on otettu huomioon kuvassa 3, jonka pääosa on laadullinen esitys yllä olevalle eristävyden lausekkeelle /2/. Kuvassa

on osoitettu samat yksinkertaisen värähtelijän vasteelle ominaiset piirteet (Alueet 1...3) kuin kuvassa 2.

Kuva 3 osoittaa, että massiiviset seinämät eristävät parhaiten korkeataajuisia ääniä kun taas matalataajuiset äänet läpäisevät rakenteen helpommin. Jos rakenteen jäykkyyden ja vaimennuksen vaikutukset jätetään huomiotta, jää lausekkeesta (2) jäljelle ns. massalaki, jonka mukaan seinämän eristävyys kasvaa 6 dB massan tai äänen taajuuden kaksinkertaistuessa (Kuva 3/Alue 3).

Rakenne-osien alimmat ominaistajuuudet ovat usein kuultavan äänialueen alapäässä tai jopa alapuolella; $f_1 < 50$ Hz. Resonanssivaikutuksia ei tämän takia useinkaan ole tarvinnut huomioida. Uudet lujat rakennemateriaalin houkuttelevat kuitenkin kehittämään entistä kevyempiä rakenne-elementtejä, joissa resonanssivaikutukset saattavat heikentää ääneneristystä. Kuva 3 osoittaa, että tällaisissa tilanteissa voidaan ääneneristystä parantaa edullisimmin lisäämällä rakenteellista vaimennusta (vrt. kuvan 3 katkoviiva).



Kuva 3. Seinämän eristävyys taajuuden funktiona.

Koinsidenssi-ilmiö

Kuvassa 3 on osoitettu, että myös korkeilla taajuuksilla ääneneristys saattaa olla selvästi huonompi kuin massalaki edellyttäisi. Tämä johtuu ns. koinsidenssi-ilmiöstä, jonka luonnetta voidaan tarkastella kuvan 4 avulla.

Riittävän korkealla taajuusalueella seinän reunaehtojen merkitys vähenee ja rakenteen dynaaminen toiminta on parhaiten kuvattavissa pitkittäisten-, poikittaisten- ja taivutusaaltojen etenemisellä. Seinään kohdistuva ääniaalto (= paineaalto) herättää siis rakenteessa taivutusaallon, jonka aallon pituus λ_b riippuu herätteen taajuudesta. Jollakin herätteen taajuudella voi lähestyvän ääniaallon pituus olla sellainen, että paineaallon "harventumat" ja "tihentymät" sattuvat yhteen levyssä etenevän taivutusaallon kupukohtien kanssa. Tällöin ääni- ja taivutusaalto alkavat vahvistaa toisiaan ja seinämä muuttuu akustisesti läpäiseväksi. Levyn sisäinen vaimennus kuitenkin estää kaiken äänienergian läpimenon.

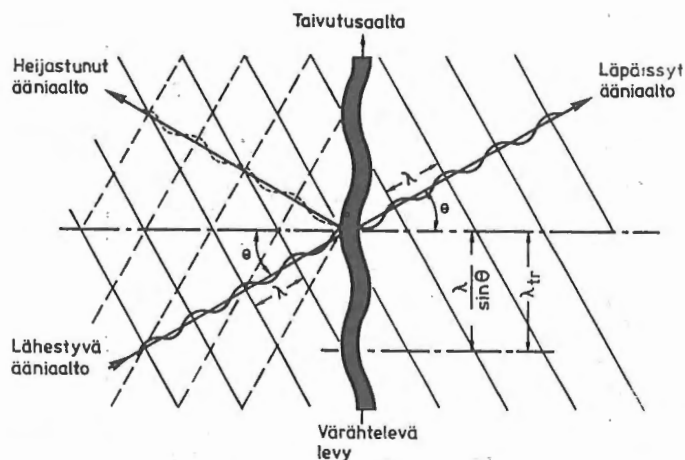
Koinsidenssi-ilmiö esiintyy taajuudella

$$f_c = \frac{c_0^2}{1.8 h c_1 \sin^2 \Theta}, \quad (3)$$

missä h on levyn paksuus ja
 c_1 pitkittäisaallon etenemisnopeus levyssä

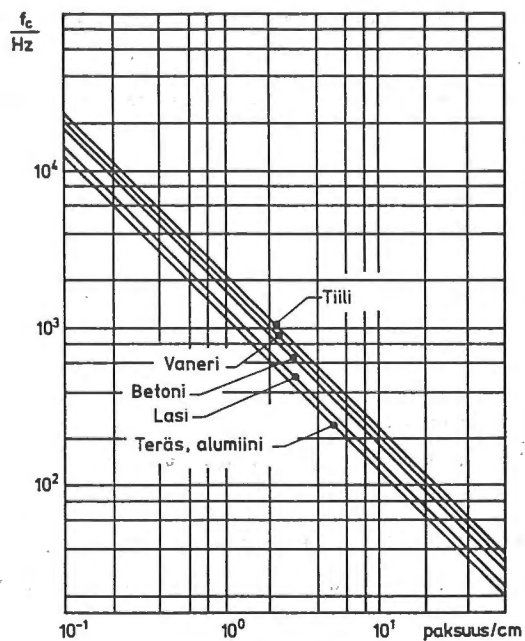
Lausekkeen (3) johdossa /2, s. 310/ on otettu huomioon se, että taivutusaallon etenemisnopeus c_b riippuu pitkittäisaallon etenemisnopeudesta c_1 ja taajuudesta f likimain seuraavasti:

$$c_b = (1.8 h c_1 f)^{1/2} \quad (4)$$

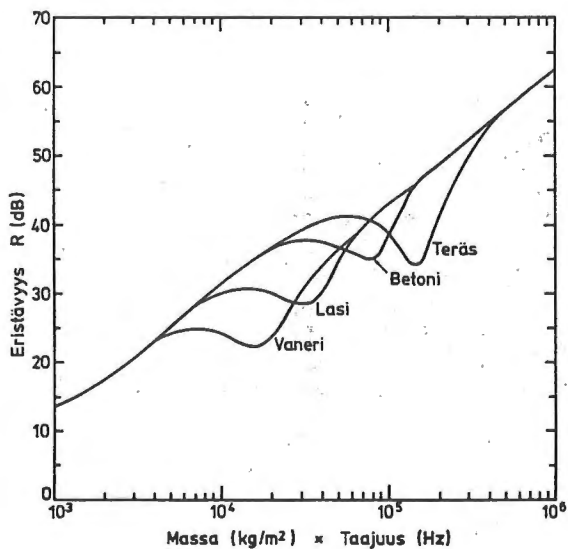


Kuva 4. Koinsidenssi-ilmiö.

Kuvassa 5 esitetään eräiden rakennusaineiden koinsidenssitaajuuksia levyn paksuuden h funktiona /3/. Kun materiaaleille ominaiset koinsidenssitaajuudet ja sisäiset vaimenusefektit otetaan huomioon, voidaan eri aineista tehtyjen seinien ääneneristävyyttä kuvan 6 mukaisesti /4/ Resonanssialuetta ei tämän kuvan esitystavassa voida ottaa huomioon.



Kuva 5. Levymateriaalien koinsidenssitaajuuksia.



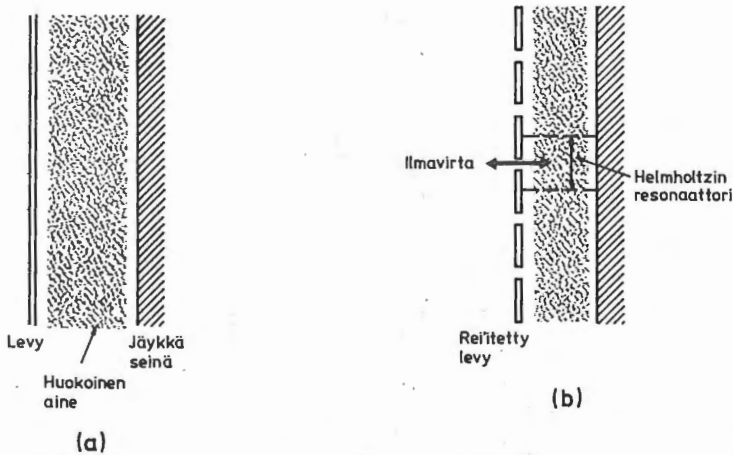
Kuva 6. Seinämän eristävyys massan ja taajuuden funktiona.

ÄÄNEN ABSORPTIO

Yllä kuvatun yksinkertaisen seinämän toimintaperiaate edellyttää, että rakenne ei läpäise ilmaa ja on suhteellisen massiivinen. Vaihtoehtoisesti tai rinnakkaisesti ääntä voidaan eristää myös absorboivilla aineilla tai -rakenteilla.

Ääniaallon osuessa aineen rajapintaan osa pintaan saapuvasta äänitehosta heijastuu takaisin mutta osa jatkaa matkaansa pinnan läpi. Jos ääniaallon kohtaama aine on huokoista ja/tai kuitumaista aiheuttavat ääniaallot aineessa sisäistä deformaatiota ja kitka-vaikutuksia. Osa äänienergiasta muuttuu tämän takia lämmöksi. Tyypillisiä ääntä absorboivia aineita ovat huokoiset tai rei'itetyt levyt, seinävaatteet, matot jne.

Äänen absorptiota saadaan aikaan myös ns. **levyresonaattorilla** tai helmholzresonaattorilla, Kuva 7. Levyresonaattorissa tarvitaan jäykkä seinämä, ohuehko levy ja näiden välissä oleva ilmarako. Levyyn kohdistuva ääniaalto panee sen värähtelemään ilmatilan synnyttämän jousivoiman varassa. Värähtelyn aikana äänienergiaa kuluu levyn vaimennuksesta aiheutuviin sisäisiin häviöihin. Vaimennusta voidaan lisätä ja vaimennus- aluetta laajentaa sijoittamalla ilmapäliin huokoista ainetta.



Kuva 7. Ääntä absorboiva levyresonaattori (a) ja helmholzlin resonaattori (b).

ÄÄNILÄHTEEN ERISTÄMINEN

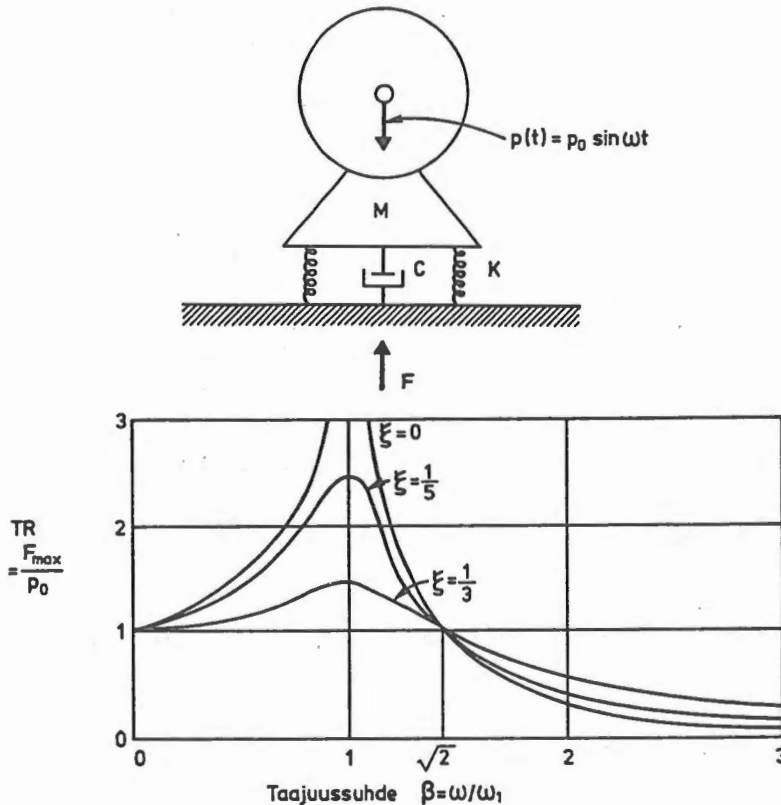
Teollisuusrakennuksissa melu liittyy usein erilaisten koneiden tärinään. Myös asuinrakennusten LVI-koneistot voivat aiheuttaa rakennusrungossa etenevää häiriötä, joka

sisältää äänitaajuisia komponentteja. Tällaisissa tilanteissa käytetään usein tärinän eristimiä, joiden toimintaperiaate on esitetty kuvassa 8. Kyseessä on siis jousitus, jonka avulla häiriön aiheuttaja "irroitetetaan" perustasta.

Tärinän eristyksessä kiinnostaa erityisesti millainen voima F_{\max} välittyy perustukseen häiriön lähteestä vaikuttavasta harmoonisesta voimasta $p_0 \sin(2\pi f t)$. Tämä vuorosuhde voidaan esittää voimansiirtosuhteella

$$TR = \frac{F_{\max}}{P_0}, \quad (5)$$

joka on esitetty taajuuden funktiona kuvassa 8(b). Kuva osoittaa, että eristysjouset on mitoitettava siten, että systeemin resonanssitaajuus on pienempi kuin alin tärinätaajuus jaettuna $\sqrt{2}$:lla. Tätä mitoitusperiaatetta kutsutaan ylikriittiseksi mitoituksiksi



Kuva 8. Tärinä- ja äänilähteen eristäminen
(a) Jousi- massajärjestelmä
(b) Voimansiirtosuhte

VIITTEET

1. Reynolds, D.D., Engineering Principles of Acoustics. Noise and Vibration Control. Allyn and Bacon Inc., Boston 1981. 640 s.
2. Purchell, W.E., Materials for Noise and Vibration Control. Sound and Vibration July 1980, ss. 8 -32.
3. Borenus et. al. Akustiikan perusteet. Insinööritieto, Espoo 1981. 176 s.
4. Rossing, T.d., The Science of Sound. Addison-Wesley, Massachusetts 1982, 640 s.

Tuomo Kärnä, johtava tutkija, rakennetekniikan laboratorio, VTT