

# 1 AKUSTIIKAN KÄSITTEITÄ

## 1.1 ÄÄNI

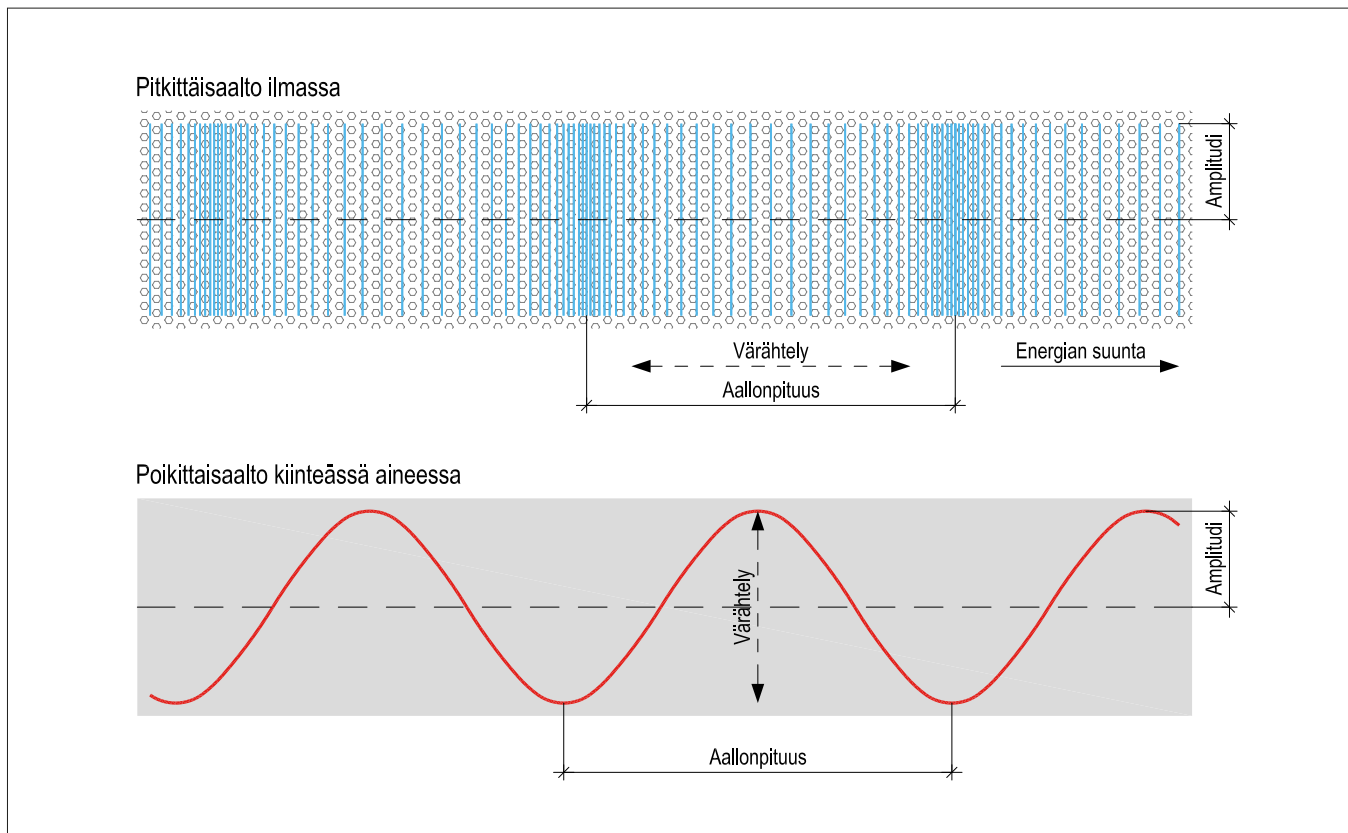
Ääni on väliaineessa etenevää aaltoliikettä. Väliaine voi olla kaasu, neste tai kiinteä aine. Ilmassa ääni etenee pitkittäisaaltona. Kiinteässä aineessa ääni etenee sekä poikittais- että pitkittäisaaltona. Äänelle annetaan nimityksiä sen perusteella, missä väliaineessa ääni etenee.

Ilmassa etenevää ääntä kutsutaan ilmaääneksi. Aistimme ilmaäänien ensisijaisesti kuulomme avulla, kun äänentaajuus on 20...20000 Hz. Voimakkaan pienitaajuuden värähtelyn aistimme myös kehollamme (tärinä). Ilmaääniä syntyy rakennuksen sisällä, mutta myös rakennuksen ulkopuolella syntyvät ilmaäänit tulevat huomioon rakennuksen akustisessa suunnittelussa. Ulkoisen melun hallinta on merkittävässä osassa, kun rakennus sijaitsee liikenneväylien tai lentokentän läheisyydessä.

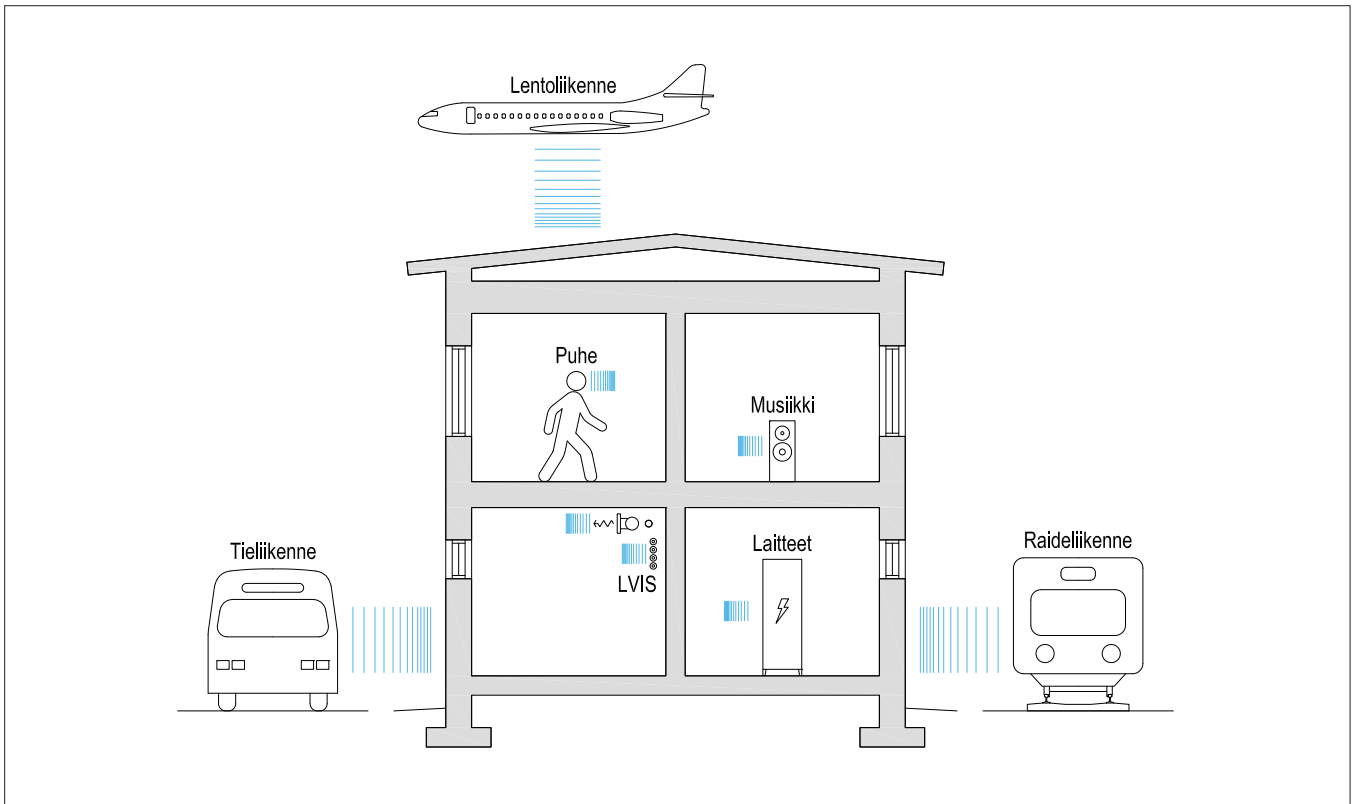
Rakennuksen rungossa etenevää ääntä kutsutaan runkoääneksi. Runkoäänien ja ilmaäänien välillä on keskinäinen yhteys, sillä runkoääni synnyttää ilmaääntä ja ilmaääni synnyttää runkoääntä.

Käytännössä rakennusosan värähtely tuottaa rakennusosaa ympäröivään ilmaan värähtelyä, jolloin syntyy ilmaääntä. Vastaavasti rakennusosaan kohdistuva ilmaääni saa rakennusosan värähtelemään, jolloin syntyy runkoääntä, joka etenee rakennusosaa pitkin. Runkoääniä syntyy rakennuksen sisällä, mutta myös rakennuksen ulkopuolelta johtuvat runkoäänit tulevat ottaa huomioon rakennuksen akustisessa suunnittelussa. Perusmaasta johtuva runkoääni saattaa olla hyvin merkittävässä osassa, kun rakennus sijaitsee esimerkiksi junaradan läheisyydessä.

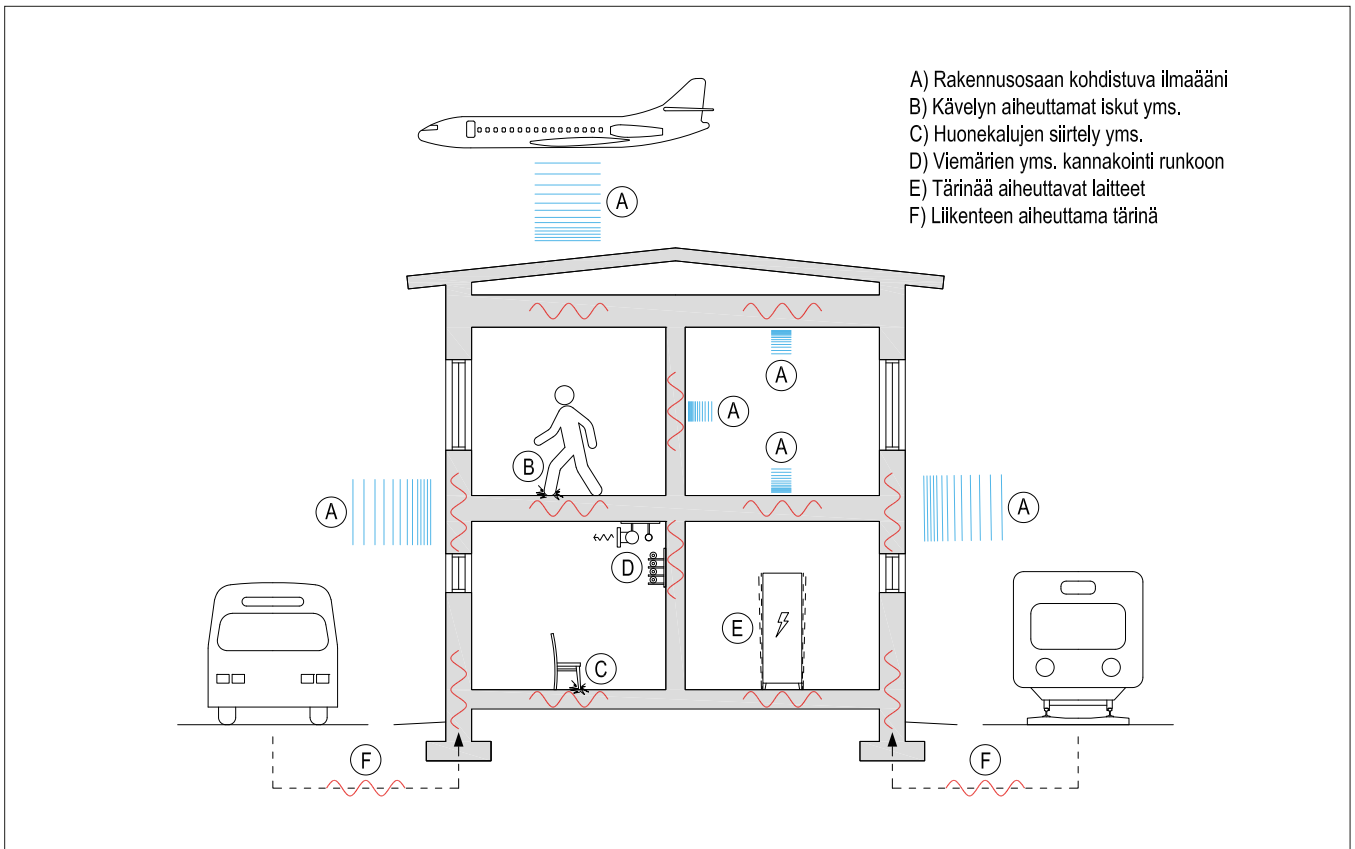
Rakennuksen sisällä ilma- ja runkoäänellä on useita etenemisreittejä. Tästä johtuen rakennuksen akustinen suunnittelu täytyy aina toteuttaa tarkastelemalla rakennusta kokonaisuutena siten, että otetaan huomioon kaikki äänilähteet ja äänien etenemisreitit. Pelkkä rakennusosakohtainen tarkastelu ei ole riittävä, koska esimerkiksi sivutiertymät saattavat heikentää tilojen välistä ääneneristävyyttä merkittävästi.



Kuva 1. Pitkittäis- ja poikittaisaallon periaate.

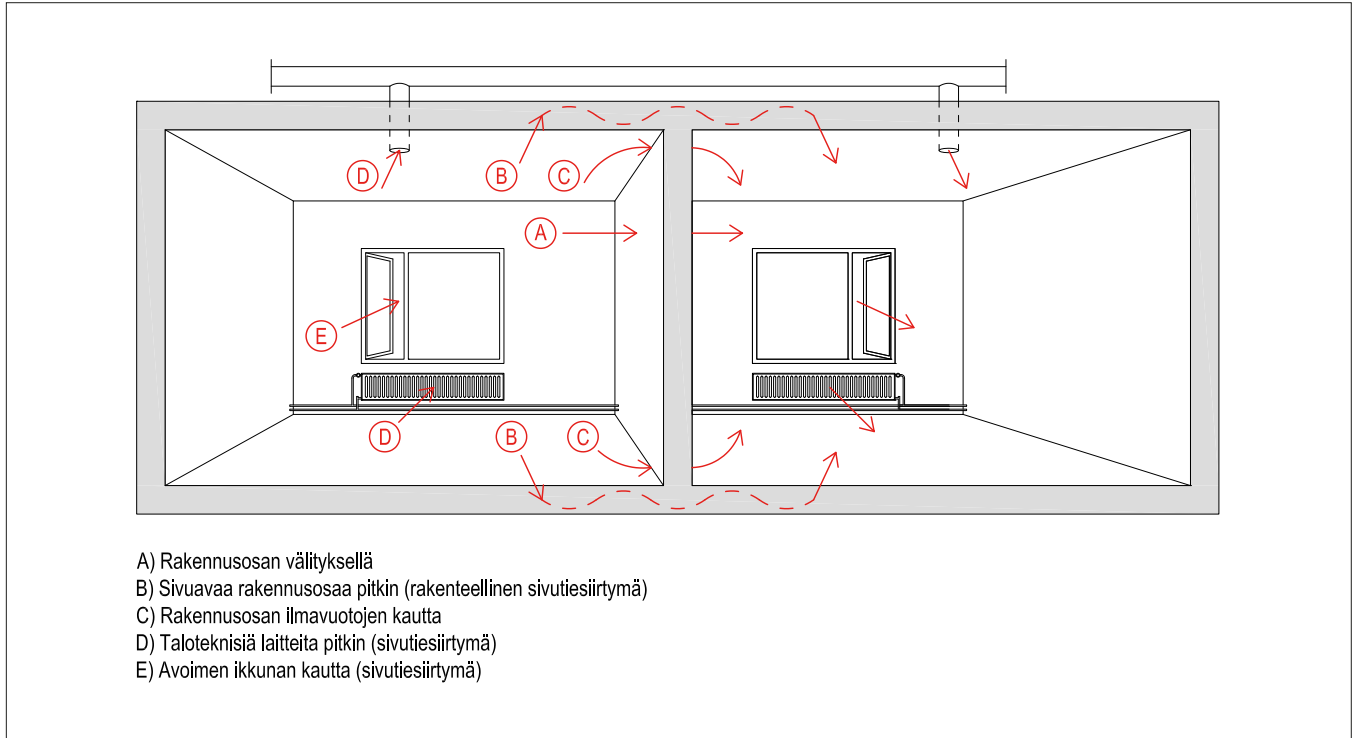


Kuva 2. Ilmaaänen lähteitä.



Kuva 3. Runkoäänen lähteitä.

## AKUSTIIKAN KÄSITTEITÄ



Kuva 4. Äänen etenemisreitit tilojen välillä.

### 1.2 ÄÄNENPAINETASO

Äänenpaine  $p$  [Pa] on ilmanpaineen muutos staattiseen ilmanpaineeseen nähden. Mitä suurempi ilmanpaineen muutos on, sitä voimakkaampana aistimme äänen. Pienin ilmanpaineen muutos, jonka ihminen kuulee äänenä, on 0,00002 Pa. Tätä kutsutaan kuulokynnykseksi ( $p_0$ ). Vastaavasti ihmisen kuulon kipukynnys saavutetaan ilmanpaineen muutoksella 20 Pa. Kuten edellisestä havaitaan, ihminen pystyy aistimaan äänenä hyvin pieniä ja suuria ilmanpaineen muutoksia.

Äänenpainetaso  $L_p$  [dB] esittämiseen on kehitetty logaritminen desibeliasteikko, koska äänenpainetaso esittäminen äänenpaineen  $p$  avulla on haasteellista. Tämä johtuu siitä, että äänenpaineen lukuarvot ovat hyvin pieniä ja niiden vaihteluväli on suuri. Esimerkiksi kuulokynnyksen ja kipukynnyksen äänenpaineiden suhde on miljoonakertainen. Logaritminen desibeliasteikko helpottaa käytännössä myös äänenpainetaso hahmottamista. Esimerkiksi lukuarvona 60 dB kertoo äänenvoimakkuudesta enemmän kuin 0,02 Pa. Suuruusluokkatietona tulee kuitenkin ottaa huomioon, että äänenpaineen  $p$  kaksinkertaistaminen kasvattaa äänenpainetasoa  $L_p$  vain 6 dB. Äänenpainetaso  $L_p$  logaritmisesta asteikosta seuraa myös se, että usean äänilähteen yhdessä tuottama äänenpainetaso  $L_{p,tot}$  määritetään kaavalla 1. Usean äänilähteen vaikutusta kokonaisäänepainetasoon  $L_{p,tot}$  on havainnollistettu taulukossa 2.

### 1.3 ÄÄNENTAAJUUS

Äänentaajuudella tarkoitetaan ääniaallon värähtelyiden määrää sekunnissa. Taajuuden yksikkö on hertsi [Hz]. Mitä suurempi äänentaajuus on, sitä korkeampana kuulemme äänen. Äänentaajuuden ollessa riittävän pieni (infraääni) tai suuri (ultraääni), emme kuule ääntä ollenkaan. Ihminen voi kuitenkin aistia infraäänien tuntemuksena, kuten esimerkiksi tärinänä. Normaalin kuulon omaavan ihmisen kuuloalue on taajuusalueella 20...20000 Hz, kun taas esimerkiksi koiralla tämä taajuusalue on 70...100000 Hz. Ihmisen kuulo on herkimmillään taajuusalueella 1000...2000 Hz oleville äänille.

Äänentaajuudella on oleellinen merkitys akustisessa suunnittelussa. Äänilähteen tuottama äänenpainetaso, ääntä eristävän rakennusosan akustinen toiminta ja sen ääneneristyskyky ovat äänentaajuudesta riippuvia ilmiöitä. Edellisistä johtuen rakennusosan ääneneristävyyttä tarkastellaan akustisessa suunnittelussa taajuuskaistoittain. Suunnittelu on vaativaa, koska rakennusosan ääneneristävyyden tulee olla riittävän hyvä suhteellisen laajalla taajuusalueella (100...3150 Hz).

Kaava 1.

$$L_{p,tot} = 10 \log_{10} \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_{p,i}}{10}}$$

$L_{p,tot}$  = usean äänilähteen yhdessä tuottama äänenpainetaso [dB]

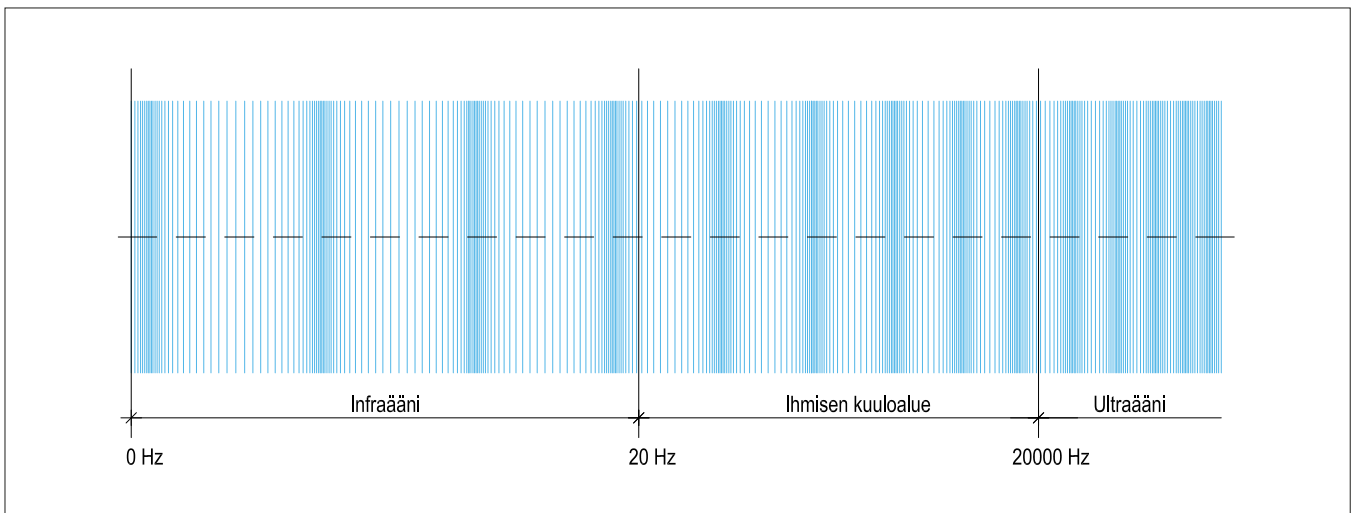
$L_{p,i}$  = yksittäisen äänilähteen tuottama äänenpainetaso [dB]

Taulukko 1. Äänenpaineen ja äänenpainetaso vastavuus.

Suuntaa-antava kuvaus	Äänenpaine $p$	Äänenpainetaso $L_p$ $L_p = 20 \log_{10} \frac{p}{p_0}$	Suhde kuulokynnykseen $\frac{p}{p_0}$
Kuulokynnys ( $p_0$ )	0,00002 Pa	0 dB	1
Hiljainen asuinhuoneisto	0,0002 Pa	20 dB	10
Toimistotyöympäristö	0,00356 Pa	45 dB	178
Normaali puhe	0,02 Pa	60 dB	1000
Katumelu	0,2 Pa	80 dB	10000
Piikkauskone	2 Pa	100 dB	100000
Kipukynnys	20 Pa	120 dB	1000000
Suihkumoottori	200 Pa	140 dB	10000000

Taulukko 2. Usean äänilähteen vaikutus kokonaisäänepainetasoon  $L_{p,tot}$

Äänilähteiden yhdistelmä				Äänilähteet yhdessä	Huomioitavaa
$L_{p,1}$	$L_{p,2}$	$L_{p,3}$	$L_{p,4}$	$L_{p,tot}$	
60 dB	60 dB	-	-	63 dB	Äänilähteiden kaksinkertaistaminen kasvattaa äänenpainetasoa 3 dB
60 dB	60 dB	60 dB	60 dB	66 dB	
80 dB	80 dB	40 dB	40 dB	83 dB	Suuren äänenpainetaso omaavat äänilähteet ovat hallitsevia
80 dB	80 dB	-	-	83 dB	
-	80 dB	40 dB	40 dB	80 dB	Äänenpainetasoa alennettaessa tulee ensin poistaa suuren äänenpaineen omaavat äänilähteet
-	-	40 dB	40 dB	43 dB	



Kuva 5. Ihmisen kuuloalue on taajuusalueella 20...20000 Hz.

## 1.4 KOINSIDENSSIN RAJATAAJUUS

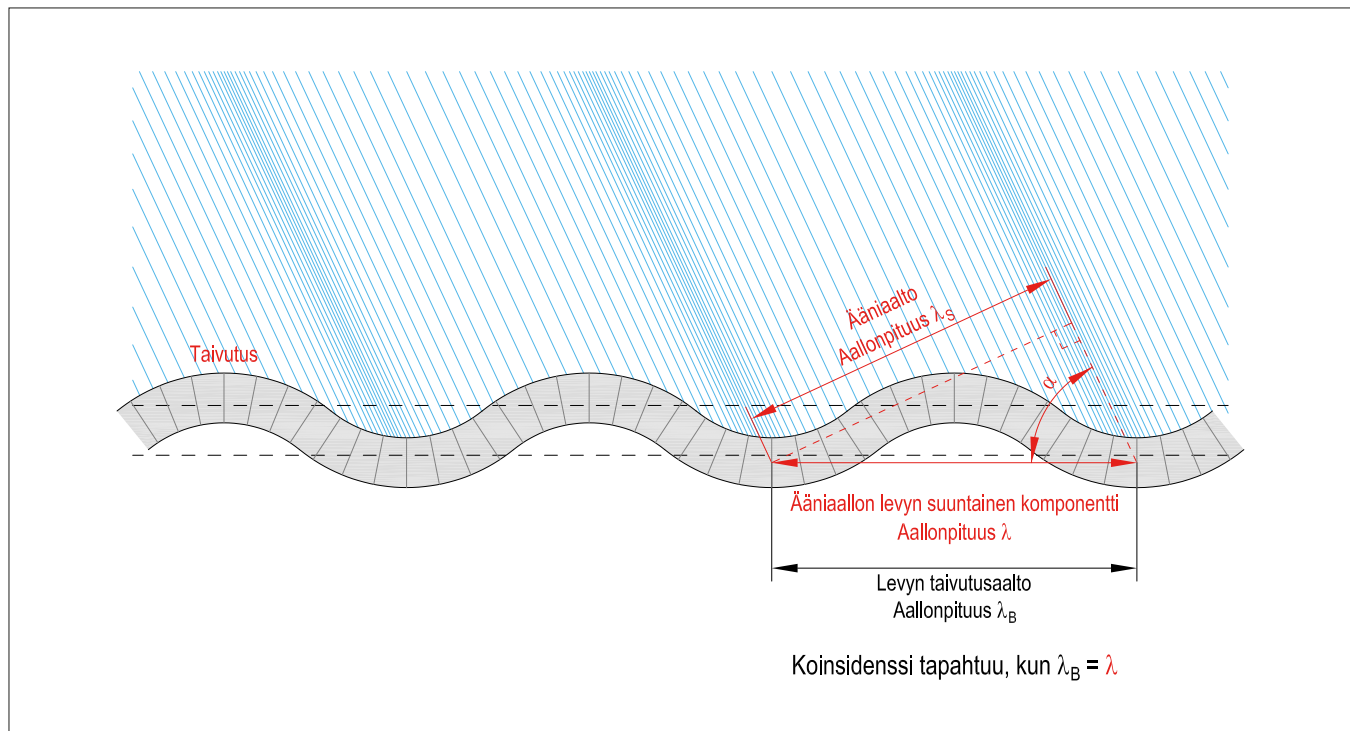
Koinsidenssin rajataajuudella tarkoitetaan taajuutta, jolla levyn (kipsilevy, puulevy, massiivipuulevy, betonilevy jne.) pintaan tietyssä kulmassa osuvan ääniaaltorintaman aiheuttama värähtely levyssä on aallonpituudeltaan samanlainen kuin ääniaaltorintaman levyn suuntaisen komponentin aallonpituus (kuva 6). Tällöin levyn osuva ääniaaltorintama ja levyn taivutusaalto ovat samassa vaiheessa, jolloin ääniaallot ”lävistävät” levyn. Koinsidenssin rajataajuudella  $f_c$  [Hz] rakennusosan ilmajääneneristävyyden heikkenee merkittävästi ja levyn ilmajääneneristävyys perustuu lähinnä levyn häviömekanismeihin. Koinsidenssin rajataajuuteen vaikuttavat levyn paksuus, tiheys, Poissonin luku ja kimmomoduuli. Ristiinlaminoiduissa puulevyissä (esim. vaneri, LVL, CLT) levyn tason eri suunnissa on erilaiset koinsidenssin rajataajuudet. Tämä johtuu siitä, että levyn poikkileikkauksen taivutusjäykkyys vaihtelee levyn eri suunnissa.

Koinsidenssin rajataajuus sijaitsee tavallisesti taajuusalueella 100...3150 Hz, joka on rakennusosien ilmajääneneristävyyden kannalta kiinnostavin taajuusalue. Tämän takia koinsidenssin rajataajuus tulisi saada pois kyseiseltä taajuusalueelta. Tämä ei ole kuitenkaan aina mahdollista, koska koinsidenssin rajataajuus riippuu levyn ominaisuuksista.

Taulukosta 3 havaitaan, miksi 13 mm paksu kipsikartonkilevy ja 200 mm paksu betonirakenne ovat kautta aikojen olleet ääntä eris-

tävien rakennusosien rakennustuotteita. Kipsilevyn koinsidenssin rajataajuus on hyvin suuri, joten se on rakennusosan ilmajääneneristävyyden mitta-alueen (100...3150 Hz) yläpäässä. Vastaavasti massiivisen betonirakenteen koinsidenssin rajataajuus on hyvin pieni, joten se on edellä mainitun mitta-alueen alapäässä. Täten sekä ohuen kipsilevyn että massiivisen betonirakenteen koinsidenssin rajataajuudet ovat poissa taajuusalueelta 200...2000 Hz, joka on ihmisen kuuloaistin näkökulmasta merkityksellinen, kun tarkastellaan rakennusosan ilmajääneneristävyyttä. Lisäksi massiivisilla betonirakenteilla koinsidenssi-ilmiö ei ole niin merkittävä kuin kevyillä rakenteilla, koska massiivisilla betonirakenteilla on suhteellisen hyvä ilmajääneneristävyys pienillä taajuuksilla. Tämä kompensoi koinsidenssi-ilmiön heikentävää vaikutusta rakennusosan ilmajääneneristävyyteen.

Taulukosta 3 havaitaan myös kuinka levyn paksuus vaikuttaa koinsidenssin rajataajuuteen. Tämän takia kevyissä ääntä eristävissä rakennusosissa tulee käyttää levyjä, joiden tiheys ja jäykkyys johtavat suureen koinsidenssin rajataajuuteen. Useimmat rakennuslevyt ovat tällöin melko ohuita. Mikäli levytyksen massaa tarvitsee lisätä, käytetään useampaa ohutta levykerrosta päällekkäin mekaanisesti kiinnitettynä (naulat, ruuvit jne.). Päällekkäisiä levykerroksia ei tule liimata toisiinsa, koska tällöin niistä muodostuu yksi paksu levy, jonka seurauksena levyn koinsidenssin rajataajuus alenee. Edellä mainitusta periaatteesta voidaan poiketa, mikäli liimauksen vaikutus rakennusosan ääneneristävyyteen on tutkittu.



Kuva 6. Koinsidenssi-ilmiö levyssä.

Taulukko 3. Suuntaa-antavia levyjen koinsidenssin rajataajuuksia  $f_c$ .

Levy	$t$ [m]	$f_c$ [Hz]	Seuraus koinsidenssin rajataajuudesta
Kipsikartonkilevy	13	2500...4000	Ei yleensä heikennä ilmastäneristävyyttä merkittävästi.
	15	2000...2500	
	18	2000...2500	
Kuusivanerilevy	15	1000...1600	Heikentää ilmastäneristävyyttä suurilla taajuuksilla. Vaikutus ei ole niin merkityksellinen, koska suurilla taajuuksilla puulevyn ilmastäneristävyys on suhteellisen hyvä.
	18	800...1250	
	21	630...1000	
OSB-levy	15	1600...3150	Heikentää ilmastäneristävyyttä suurilla taajuuksilla. Vaikutus ei ole niin merkityksellinen, koska suurilla taajuuksilla puulevyn ilmastäneristävyys on suhteellisen hyvä.
	18	1250...2500	
	22	1000...2000	
LVL-levy	27	500...1200	Heikentää ilmastäneristävyyttä pienillä taajuuksilla tai keskitaajuuksilla. Vaikutus on merkityksellinen, koska pienillä taajuuksilla puulevyn ilmastäneristävyys on suhteellisen heikko (massan ja jäykkyyden puute).
	33	400...1000	
	39	315...1000	
	75	160...500	
	120	100...315	
	144	80...250	
CLT-levy	60	200...1250	Heikentää ilmastäneristävyyttä pienillä taajuuksilla tai keskitaajuuksilla. Vaikutus on merkityksellinen, koska pienillä taajuuksilla puulevyn ilmastäneristävyys on suhteellisen heikko (massan ja jäykkyyden puute).
	80	160...500	
	100	125...630	
	120	100...630	
	140	100...400	
	180	80...315	
Betonilevy	100	125...250	Ei yleensä heikennä ilmastäneristävyyttä merkittävästi.
	150	100...160	
	200	80...125	

## 1.5 OMINAISTAAJUUS

Ominaistaajuudella  $f$  [Hz] tarkoitetaan taajuutta, jolla värähtelijä värähtelee siten, että se saavuttaa suurimman amplitudin (värähtely on voimakkainta). Värähtelijällä on alin ominaistaajuus ja tämän yläpuolella olevia muita ominaistaajuuksia (monikertoja). Jokaisella ominaistaajuudella on myös ominaisvärähtelymuoto.

Ominaistaajuus on riippuvainen rakennusosan, rakennusosakokonaisuuden tms. systeemin massasta, jäykkyydestä ja mitoista. Rakentamisessa ominaistaajuutta tarvitaan mm. seuraavissa:

- Ääntä eristävien rakennusosien suunnittelussa.
- Välipohjan värähtelysuunnittelussa.
- Rakennuksen rungon värähtelysuunnittelussa.
- Tärinää aiheuttavien laitteiden perustusten suunnittelussa.

## 1.6 RESONANSSI-ILMIÖ

Värähtelijään syntyy resonanssi, kun siihen kohdistuu sen ulkopuolinen heräte, jonka taajuus vastaa värähtelijän ominaistaajuutta. Herätteen aiheuttaja voi olla esimerkiksi mekaaninen isku tai äänialto. Resonanssissa oleva värähtelijä värähtelee hyvin suurella amplitudilla. Tämä johtuu siitä, että värähtelijä saa koko ajan lisää energiaa samalla taajuudella olevasta ulkopuolisesta herätteestä.

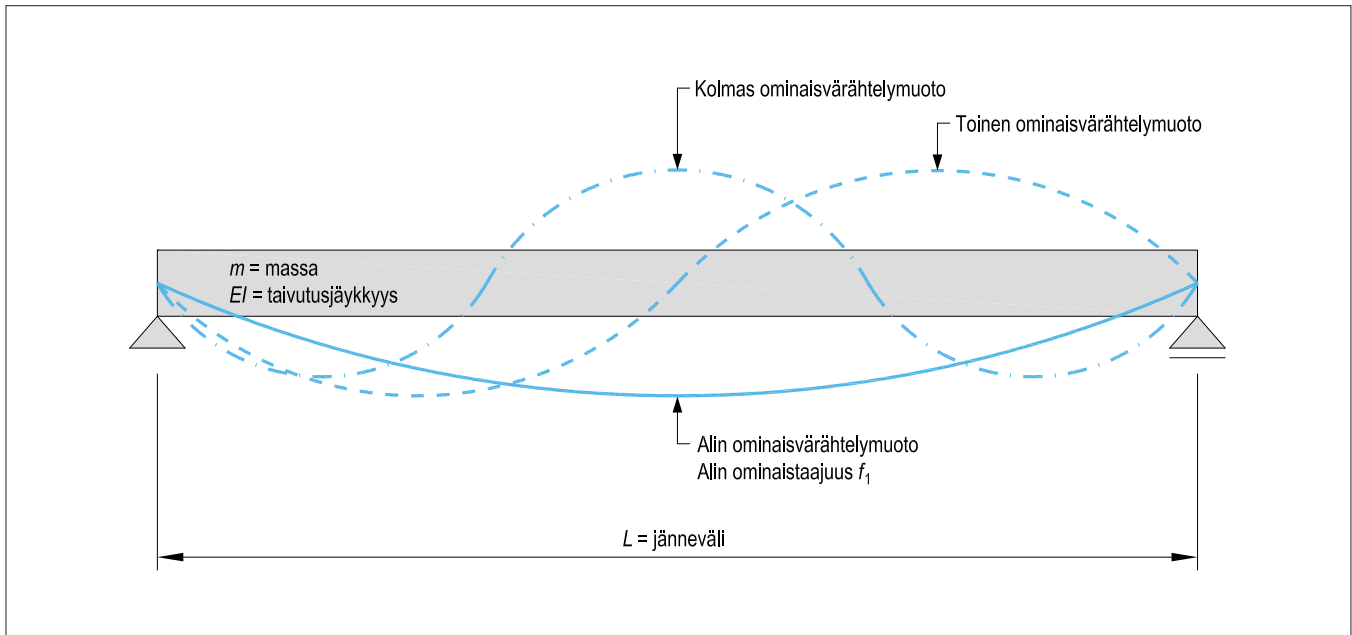
Resonanssivärähtelyn voimakkuuteen voidaan vaikuttaa vai-

mennuksella, mutta sen lisääminen rakennusosiin on käytännössä vaikeaa. Värähtelevässä rakennusosakokonaisuudessa on kuitenkin aina jonkin verran vaimennusta, kuten esimerkiksi rakennusosien liittymien jäykkyys. Värähtelevien rakennusosien ja rakennusosakokonaisuuksien suunnittelussa tulee estää resonanssin syntyminen. Pahimmassa tapauksessa resonanssissa oleva värähtelevä systeemi saattaa vaurioitua tai sortua värähtelyn voimakkuuden johdosta.

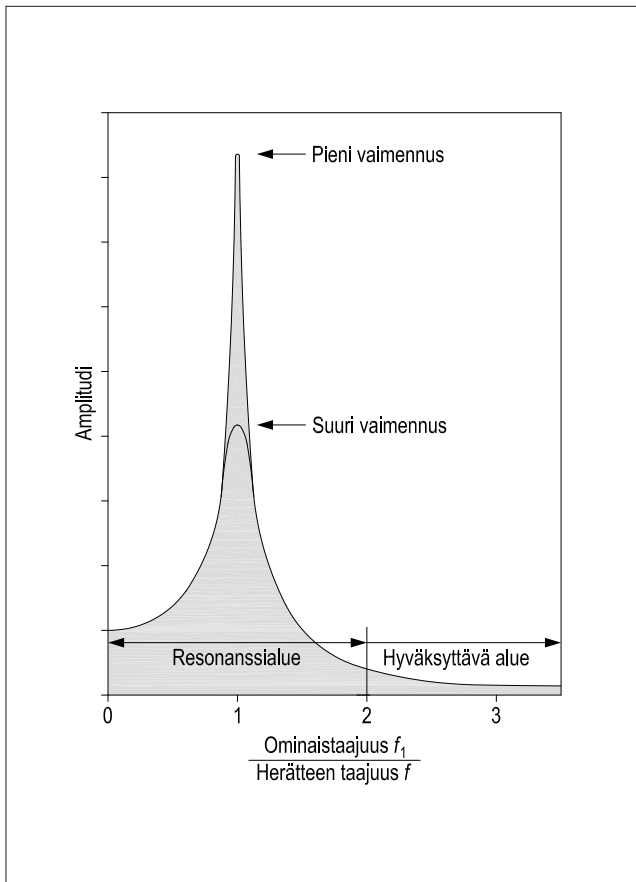
Resonanssi-ilmiö liittyy suoraan ominaistaajuuteen. Ominaistaajuuden alapuolella olevilla taajuuksilla värähtelijä värähtelee voimakkaammin kuin ominaistaajuuden yläpuolella olevilla taajuuksilla. Tästä johtuen ominaistaajuuden suhde herätteen taajuuteen tulee olla vähintään kaksi, jotta resonanssi-ilmiö voidaan välttää (kuva 8).

Ääntä eristävien rakennusosien suunnittelussa resonanssi-ilmiö on myös merkityksellinen, koska ääneneristävyys kasvaa tehokkaasti alimman ominaistaajuuden yläpuolella olevilla taajuuksilla. Tästä johtuen ääntä eristävän rakennusosan alin ominaistaajuus tulee olla mahdollisimman pieni, jotta rakennusosa eristää ääntä tehokkaasti taajuusalueella 100...3150 Hz. Materiaalista riippumatta ääntä eristävien rakennusosien alin ominaistaajuus on usein suhteellisen pieni, joten akustisen suunnittelun kannalta se ei ole niin merkityksellinen kuin koinsidenssin rajataajuus. Resonanssi-ilmiöön tulee kuitenkin kiinnittää erityisesti huomiota välipohjan kelluvaa lattiaa suunniteltaessa (ks. kohta 3.6.2).

## AKUSTIIKAN KÄSITTEITÄ



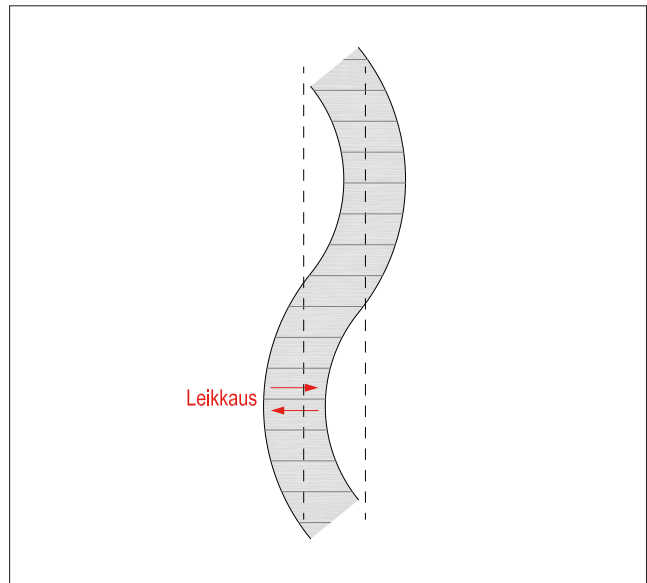
Kuva 7. Esimerkkejä yksiaukkaisen rakennusosan ominaisvärähtelymuodoista.



Kuva 8. Resonanssi-ilmiö.

### 1.7 LEIKKAUSAALTOJEN RAJATAAJUUS

Taivutusaaltojen lisäksi levyssä esiintyy leikkausaaltoja. Levyn leikkausaaltojen rajataajuuden  $f_n$  [Hz] yläpuolella olevilla taajuuksilla leikkausaalto heikentää rakennusosan ilmaaneneristävyyden kasvua. Leikkausaaltojen vaikutus ilmaaneneristävyyteen on merkityksellinen paksuilla levyillä suurien taajuuksien yhteydessä (esimerkiksi betoni- ja massiivipuulevyrakenteet).



Kuva 9. Leikkausaalto levyssä.