

Zaj és rezgésvédelem

OMKT felsőfokú munkavédelmi szakirányú képzés
Hangterjedés szabad és zárt térben

Szerkesztette:

Márkus Miklós
zaj- és rezgésvédelmi szakértő

Lektorálta:

Márkus Péter
zaj- és rezgésvédelmi szakértő

Budapest
2010. február

Tartalomjegyzék

Tartalomjegyzék.....	2
1. Hangterjedés szabad térben	3
2. Szabadtéri terjedés számítása.....	4
3. Hangterjedés zárt térben.....	6
4. Hangelnyelési tényező.....	8
5. Utózungési idő.....	9

1. Hangterjedés szabad térben

Szabad hangtér (def.): akusztikai szempontból **szabad térnek** az olyan teret tekintjük, amelyben a hullámterjedést nem befolyásolja semmilyen elnyelő vagy visszaverő felület, azaz a hanghullám a forrásból a tér minden irányában elhajlás, törés és visszaverődés nélkül terjed. A szabad tér ilyen megfogalmazása csupán elméleti, a valóságban sohasem létezik.

A hangforrások három elemi típusa, amelyekből az összetett sugárzók elméletileg felépíthetők:

- pontszerű hangforrás (pontsugárzó)
- vonalszerű hangforrás (vonalsugárzó)
- felületszerű hangforrás (felületsugárzó)

PONTSZERŰ HANGFORRÁS (def.): a *pontsugárzó* idealizált hangforrás, kiterjedése elvileg mindhárom irányban végtelen kicsi, és minden irányban azonos teljesítményt ad le. Ha nincs akadály a térben, akkor *a hanghullámok koncentrikus gömbként terjednek*.

A gyakorlatban pontszerűnek tekintjük a hangforrást: ha a forrás legnagyobb méretétől (d) legalább kétszeres távolságra rögzítjük a vizsgálati (megítélési) pontot, mely a hangforrás által kisugárzott hang hullámhosszának kétszeresénél is távolabb van:

$$2d < r < 2\lambda \text{ [m]}$$

ahol:

- | | |
|-----------|---------------------------------------------------------|
| r | a mérési pont távolsága a hangforrás középpontjától [m] |
| d | a hangforrás legnagyobb mérete [m] |
| λ | a hang hullámhossza [m] (pl. 100 Hz-en 3,4 méter) |

Közeltér és távltér fogalma (def.): A hangforrás által kisugárzott hang hullámhosszának kétszerese a közeltér és távltér határát jelöli ki. A *közeltérben* (a hangforrás közelében) bonyolult fizikai jelenségek játszódnak le, melyek az ún. *meddő hangenergia* révén növelik a hangintenzitást. A hangforrások forráselemzését ennek megfelelően minden esetben a *távltérben* kell elvégezni, mivel a közeltéri vizsgálatok hibás eredményekre vezethetnek.

VONALSZERŰ HANGFORRÁS (def.): a *vonalsugárzó* olyan (elméletben) végtelen hosszú vonal, melynek minden eleme hangforrásként működik. Két alaptípusa a *koherens vonalsugárzó* (minden eleme azonos fázisban rezeg, pl. áramlási zaj csővezetékben), és az *inkoherens vonalsugárzó* (egyidejűleg nem azonos fázisban sugárzó elemi gömbsugárzók halmaza, pl. közúti útszakasz). Ha nincs akadály a térben, akkor *a hanghullámok hengeres hullám formájában terjednek*.

FELÜLETSZERŰ HANGFORRÁS (def.): a *felületsugárzó* esetében a hang meglehetősen nagy felületen sugárzódik le, például a zaj nagyobb felületű szabad nyíláson át jut a környezetbe (pl. repülőgéphangár nyitott ajtaja). Ilyen esetekben azt feltételezzük, hogy a felület egyenletesen elosztott, független zajforrásokból áll, és a források a hangenergiát *véletlenszerű fázisban félgömbszerűen* sugározzák szét.

A felület közelében közelítően *síkhullámú hangsugárzónak* tekintjük (a felülettől kis mértékben eltávolodva nem csökken a hangintenzitás), a felülettől távolodva a hangenergia csökkenése előbb a *vonalszerű hangforrás* törvényszerűségeit követi, nagyobb távolságban pedig (a távolságtörvénynek megfelelően) *pontszerű hangforrásnak* tekinthetjük.

2. Szabadtéri terjedés számítása

A hangnyomás a felületen oszlik meg, így amennyiben a hangforrástól távolodva növekszik a hanghullám felülete, csökken az egységnyi felületre eső hangnyomás, vagyis a hangforrástól távolodva csökken a hangnyomás. A csökkenés mértéke attól függ, milyen mértékben nő a felület.

Amennyiben a felület gömb alakú (*pontszerű források* esetén gömbhullámok jönnek létre), a hangnyomás csökkenése a gömbfelület sugarával, vagyis *a távolság négyzetével arányos*:

$$I = \frac{P}{4r^2\pi} \text{ [W/m}^2\text{]} \text{ mely alapján } L = L_w + 10 \cdot \lg \frac{1}{4r^2\pi} \text{ [dB]}$$

ahol:

- L a vizsgálati pontban eredő hangnyomásszint [dB]
- L_w a zajforrás hangteljesítményszintje [dB]
- r a vizsgálati pont távolsága a zajforrástól [m]

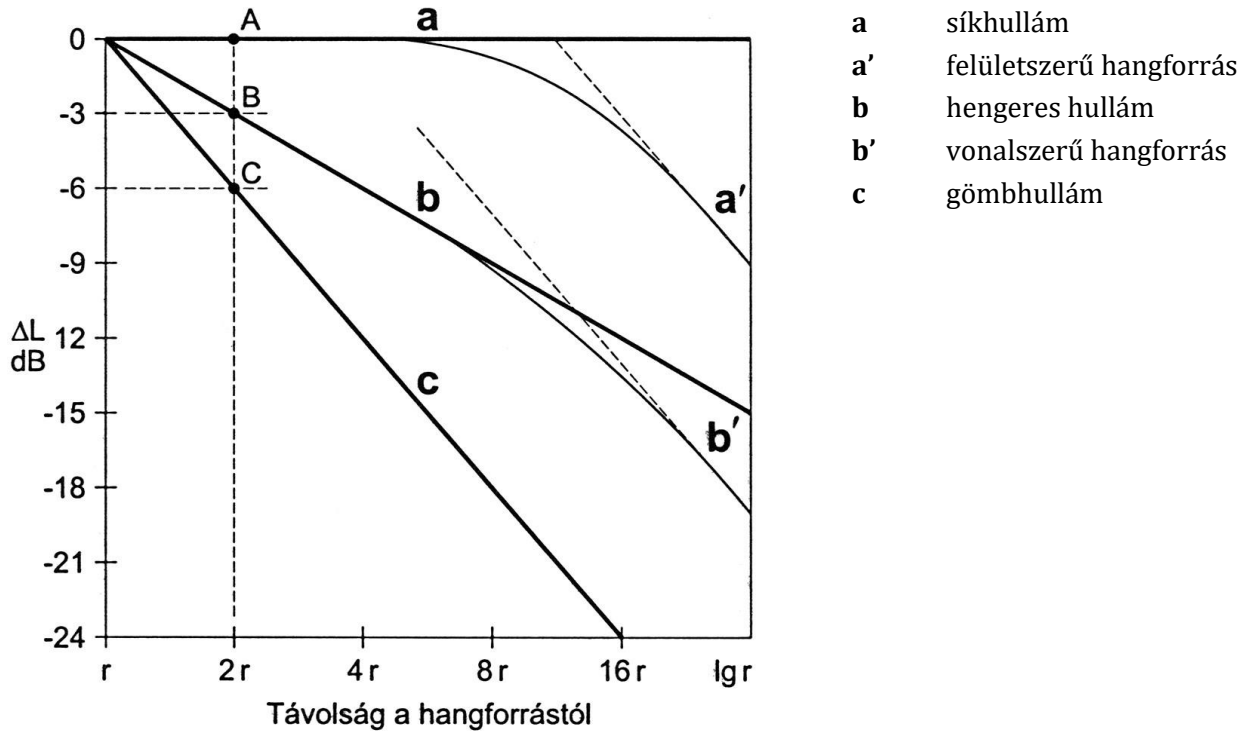
Amennyiben a felület henger alakú (*vonalszerű források* esetén hengeres hullámok jönnek létre), a hangnyomás csökkenése a hengerfelület sugarával, vagyis *a távolsággal arányos*:

$$I = \frac{P}{2r\pi} \text{ [W/m}^2\text{]} \text{ mely alapján } L = L_w + 10 \cdot \lg \frac{1}{2r\pi} \text{ [dB]}$$

ahol:

- L a vizsgálati pontban eredő hangnyomásszint [dB]
- L_w a zajforrás hangteljesítményszintje [dB]
- r a vizsgálati pont távolsága a zajforrástól [m]

A különböző jellegű források által létrehozott hanghullámok terjedésének geometriai törvényszerűségeit a következő ábra mutatja be:



A tökéletes síkhullám tulajdonságait jellemző **a** jelű függvény szerint a hangintenzitás független a forrástól mért távolságtól. A távolság kétszereséhez tartozó ΔL szintcsökkenési mutató az **A** jelű pontban: $\Delta L = 0 \text{ dB} / 2r$, vagyis a távolság duplázódásával a hangnyomásszint nem csökken.

A tökéletes hengeres hullám tulajdonságait a **b** jelű függvény jellemzi, a **B** ponthoz tartozó szintcsökkenési mutató: $\Delta L = 3 \text{ dB} / 2r$, vagyis a távolság duplázódásával 3 decibelt csökken a hangnyomásszint.

A tökéletes gömbhullám és a pontszerűnek tekinthető hangforrás tulajdonságait a **c** jelű függvény jellemzi. A **C** ponthoz tartozó szintcsökkenési mutató: $\Delta L = 6 \text{ dB} / 2r$, vagyis a távolság duplázódásával 6 decibelt csökken a hangnyomásszint.

Irányítási tényező (def.): általában a hangforrás sugározta hangteljesítmény nem minden irányban azonos intenzitással terjed, a teljesen gömbszerű terjedéstől való eltérés jellemzésére használják az **irányítási tényezőt**, amelynek jele: D , dimenziója nincs, értéke:

- teljesen szabad térben, gömbsugárzó esetén: $D=1$
- egy visszaverő felület, félgömbsugárzó esetén: $D = 2$
- két visszaverő felület, negyed térbe sugárzó esetén: $D = 4$
- három felület, nyolcad térbe sugárzó esetén: $D = 8$

A pontszerű hangforrás által kibocsátott gömbhullám szabadtéri terjedését leíró összefüggés kifejtésével kapjuk az alábbi képletet, mellyel elvégezhető a hangnyomásszint számítása:

$$L = L_W + 10 \cdot \lg D - 20 \cdot \lg r - 11 \text{ [dB]}$$

ahol:

- L_W a forrás hangteljesítményszintje [dB]
- L a zajforrástól adott távolságban mért hangnyomásszint [dB]
- r a mérési pont távolsága a zajforrás mértani középpontjától [m]
- D irányítási tényező

A vonalszerű hangforrás által kibocsátott hengeres hullám szabadtéri terjedését leíró összefüggés kifejtésével kapjuk az alábbi képletet, mellyel elvégezhető a hangnyomásszint számítása:

$$L = L_W + 10 \cdot \lg D - 10 \cdot \lg r - 8 \text{ [dB]}$$

ahol:

- L_W a forrás hangteljesítményszintje [dB]
- L a zajforrástól adott távolságban mért hangnyomásszint [dB]
- r a mérési pont távolsága a zajforrás mértani középpontjától [m]
- D irányítási tényező

3. Hangterjedés zárt térben

A hangtani jelenségek tanulmányozása során talán az egyik legfontosabb feladat annak tisztázása, hogy hogyan viselkedik az a helyiség, amelyikben a hangforrás működik. A következő vizuális gondolatjáték végigkövetését javaslom:

- vegyük az előbbieken felvázoltak szerinti pontszerű hangforrást (gömb sugárzót)
- helyezzük a zajforrást a talajra szabad hangtérben
- vegyük körül a zajforrást olyan helyiséggel melynek falai teljesen elnyelnek minden hangot
- **következmény:** a zajforrás által kibocsátott hangenergia teljes egészében elnyelődik
- csökkentsük a helyiség falainak elnyelését (keményebb, nem porózus, nem hangelnyelő)
- **következmény:** a zajforrás által kibocsátott hangenergia egy része visszaverődik
- csökkentsük tovább a helyiség falainak elnyelését, míg minden hangot teljesen visszavernek
- **következmény:** a zajforrás által kibocsátott hangenergia teljes egészében visszaverődik

A fentiekből levonható a következtetés, miszerint a zárt térben kialakuló hangnyomásszintet a következő tényezők befolyásolják:

- a zajforrás által kibocsátott **hangenergia** (hangteljesítményszint)
- a tér geometriai **méretei** (térfogata és felülete)
- a határoló felületek hangvisszaverő és **hangelnyelő** tulajdonságai (elnyelési tényező)

A zárt helyiségben működő hangforrást *energiaforrásnak* tekintjük. A zajforrás által folyamatosan kibocsátott energia részben a helyiségben marad, és ott felhalmozódik, részben átjut a falon, vagy a csatlakozó falszerkezetekben kerülőutakon terjed, illetve hővé alakul, és mint hangenergia megszűnik létezni (elnyelődik). Az adott hangteljesítményű zajforrás bekapcsolását követő néhány másodperc után **egyensúlyi helyzet** alakul ki: a falakon éppen annyi hangteljesítmény nyelődik el, mint amennyi hangteljesítményt a hangforrás kisugároz. A **diffúz térből** (visszaverődésekből származó szórt zengő hangtér) elnyelődő hangteljesítmény a hanghullámok által megtett szabad úthossz (vö. a tér mérete), az ebből adódó másodpercenkénti ütközésszám, továbbá az átlagos hangelnyelési tényező (ld. később) segítségével írható fel.

A levezetés számos szakirodalomban megtalálható, ezért itt mellőzzük. A levezetés eredményeként a **diffúz hangtér hatása** az alábbi alakúra egyszerűsödik:

$$L = L_w + 10 \cdot \lg \frac{4}{R_T} \text{ [dB]}$$

ahol:

- L az eredő diffúz téri hangnyomásszint [dB]
 L_w a zajforrás hangteljesítményszintje [dB]
 R_T a helyiség teremállandója [m²]

A helyiségben tartózkodó megfigyelő egyidejűleg észleli a kisugárzott és elnyelt hangteljesítmény egyensúlyából adódó **diffúz hangtér** hatását, és észleli ugyanakkor a hangforrásból kiinduló **szabad-téri terjedésű (közvetlen) hangtér** hatását; végső soron tehát a két hangtér energiatartalma összeadódik:

$$L = L_w + 10 \cdot \lg \left(\frac{D}{4r^2\pi} + \frac{4}{R_T} \right) \text{ [dB]}$$

ahol:

- L a helyiségben eredő hangnyomásszint [dB]
 L_w a zajforrás hangteljesítményszintje [dB]
 D irányítási tényező
 r a vizsgálati pont távolsága a zajforrástól [m]
 R_T a helyiség teremállandója [m²]

Energiaegyensúlyi felület/sugár (def.): a fentiek figyelembevételével meghatározható az a zajforrástól számított elméleti r_e távolság, ahol a szabadtéri terjedésű hangtérből és a visszavert diffúz hangtérből származó hangenergia egyenlő:

$$\frac{D}{4r_e^2\pi} = \frac{4}{R_T} \text{ mely alapján } r_e = \sqrt{\frac{D \cdot R_T}{16\pi}} \text{ [m]}$$

ahol:

- r_e energiaegyensúlyi sugár távolsága a zajforrástól [m]
- D irányítási tényező
- R_T a helyiség teremállandója [m²]

4. Hangelnyelési tényező

A zárt térben kialakuló hangterjedés jelensége azzal magyarázható, hogy a helyiség falai a hangenergiát részben elnyelik, részben pedig visszaverik. A falra eső E hangenergia αE hányada a falról nem jön vissza, hanem elnyelődik.

Átlagos hangelnyelési tényező (def.): a hangelnyelés mértékét kifejező mérőszám, vagyis a falra eső E hangenergia αE hányada nyelődik el a falban. Jele: α , dimenziója nincs. A hangelnyelési tényező az időben állandó, független a beeső hanghullámok irányától, és független a hangforrás hangteljesítményétől, csupán csak a fal anyagától és a hang frekvenciájától függ. Definícióját az alábbi összefüggés fejezi ki:

$$\alpha = \frac{E_{\text{beeső}} - E_{\text{visszavert}}}{E_{\text{beeső}}}$$

Egyenértékű elnyelési felülete (def.): a térhatároló falfelületek egyenértékű elnyelési felülete a tér hangelnyelő képességét fejezi ki. Jele: A , mértékegysége: [m²]. A helyiség átlagos hangelnyelési tényezőjéből és teljes felületéből az alábbi összefüggéssel kell meghatározni:

$$A = \sum_{i=1}^n S_i \cdot \alpha_i = \bar{\alpha} \cdot S \text{ [m}^2\text{]}$$

ahol:

- S a helyiség teljes felülete [m²]
- α a helyiségre vonatkozó átlagos hangelnyelési tényező

Teremállandó (def.): ugyancsak a tér hangelnyelő képességét fejezi ki. Jele: R_T , mértékegysége: $[m^2]$. A helyiség átlagos hangelnyelési tényezőjéből és teljes felületéből az alábbi összefüggéssel adódik:

$$R_T = \frac{\bar{\alpha} \cdot S}{1 - \alpha} [m^2]$$

ahol:

- S a helyiség teljes felülete $[m^2]$
 α a helyiségre vonatkozó átlagos hangelnyelési tényező

A fentiek alapján, egy adott helyiségben a térhatároló falfelületek elnyelési tényezőjének ismeretével megbecsülhető a helyiség egyenértékű elnyelési felülete és teremállandója (pl. a kemény vakolatlan betonfelület elnyelési tényezője 500 Hz-en $\alpha = 0,02$). Az elnyelési tényező azonban függ a frekvenciától, így a pontos számítás igen összetett és bonyolult művelet.

5. Utózungési idő

Mint azt említettük, ha a zárt térben egy hangforrást állandó teljesítménnyel működtetünk, a térhatároló felületek hangvisszaverő és hangelnyelő hatása következtében egy állandósult *egyensúlyi állapot* alakul ki. Ha a hangforrást kikapcsoljuk, a hangszórázás megszűnésekor a diffúz térbe bevitt energia fokozatosan csökken, vagyis úgynevezett **utózungés** észlelhető. Ez a folyamat a **lecsengés**, a lecsengési görbe meredeksége (az utózungés ideje) a tér hangelnyelő képességétől függ. Minél kisebb a tér egyenértékű elnyelési felülete, annál hosszabb idő alatt hal el a hang (vö. mélygarázs és lakószoba).

Utózungési idő (def.): olyan időtartam, amely alatt a hangforrás kikapcsolása után az energiasűrűség *egymilliomod* részére, a hangnyomásszint *60 decibellel* csökken. Jele: T , mértékegysége: $[s]$. Az utózungés addig tart, amíg a helyiségből a hangenergia el nem fogy, pontosabban, amíg mennyisége az észlelhetőségi küszöb alá nem csökken.

A helyiség A egyenértékű elnyelési felületét (illetve ezen keresztül az elnyelési tényezőt és a teremállandót), a T utózungési idő és a helyiség V térfogata ismeretében határozzuk meg a *Sabine-képlet* segítségével:

$$A = 0,163 \cdot \frac{V}{T} [m^2]$$

ahol:

- T utózungési idő $[s]$
 V a helyiség térfogata $[m^3]$
 A a helyiség egyenértékű elnyelési felülete $[m^2]$