

**Teremakusztikai méretezés
gyakran előforduló szituációkban**



**Magyar Mérnöki Kamara
Kiadványsorozata 42.**

**Teremakusztikai méretezés
gyakran előforduló szituációkban**

**MMK FAP azonosító:
112/2019-AT**

Budapest, 2019. szeptember

A sorozat szerkesztője:
NAGY GYULA
a Magyar Mérnöki Kamara elnöke

Készült a Magyar Mérnöki Kamara Akusztikai Tagozatának gondozásában, a 2019. évi Feladat Alapú Pályázatok pénzügyi keretéből.

A kiadvány a Magyar Mérnöki Kamara tulajdona. Másolása, teljes terjedelmében való közzététele csak a Kamara engedélyével lehetséges. Minden jog fenntartva.

Szerzők:
Fürjes Andor Tamás
Kotschy András
Nagy Attila Balázs
Csott Róbert

Lektorálta:
dr. Augusztinovicz Fülöp

Kiadó:

Magyar Mérnöki Kamara
1117 Budapest, Szerémi út 4.
info@mmk.hu, www.mmk.hu

TARTALOMJEGYZÉK

1. Bevezető	6
2. Hogyan használjuk a kiadványt?	8
3. A teremakusztikai méretezés szerepe	9
3.1. Teremakusztika elméleti összefoglaló	9
3.2. Alapkövetelmény: zajosság	30
3.3. Alapkövetelmény: hangszigetelés.....	33
3.4. Komfort követelmények.....	36
3.5. A teremakusztikai követelmények elemei.....	39
3.6. A teremakusztikai tervezés eszközei.....	43
3.7. A teremakusztikai ellenőrzés eszközei.....	51
4. A teremakusztikai szempontok a gyakorlatban.....	53
4.1. A teremakusztikai méretezés hatásai.....	55
4.2. A hazai szabályozás helyzete	57
4.3. Szakmai ajánlások.....	58
4.4. A nemzetközi gyakorlat	63
4.5. A teremakusztikai paraméterek közötti összefüggések.....	67
4.6. A tervezési segédletben felhasznált mérési eredményekről.....	69
5. Melléklet: fogalommagyarázat	76
6. Irodalomjegyzék	90

1. Bevezető

Az építmények leggyakrabban előforduló helyiségei a munka, a pihenés vagy a szórakozás céljait szolgálják. Hagyományosan a használhatóság geometriai méretei, a klimatikus viszonyok és a vizualitás mellett az akusztikai szempontok csak akkor merültek fel, ha a kialakult akusztikai viszonyok kifejezetten veszélyesek vagy zavarók lettek (magas zaj, rossz beszédérthetőség, zavaró áthallások), vagy ha a helyiség célja magától értetődően szükségessé tette az akusztikai méretezést (pl. koncerttermek, színházak, stúdiók).

Az építészetben tehát ismert az akusztikai szempontok fontossága és az akusztikai minőségi szempontok elfogadhatónak tartott értékei vagy hangsúlyai a szakmai ajánlásokon túl megjelentek a rendeletekben, szabványokban is. Ezek közül a teremakusztikai szempontok sem kevésbé fontosak vagy újak.

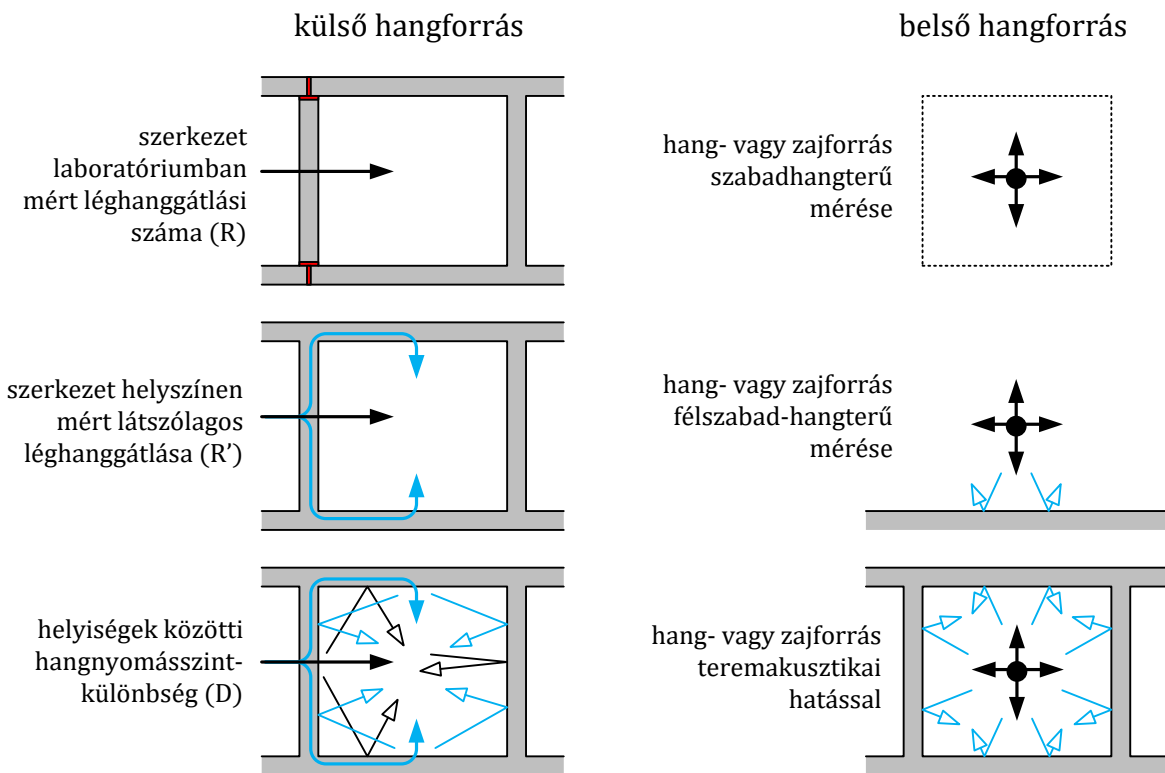
A helyiségek akusztikai minőségét a megfigyelő szempontjából általánosságban az alábbi szempont-csoportok szerint lehet vizsgálni:

- zajosság: helyiségen belül létrejövő vagy helyiségbe a környezetből bejutó zajok;
- hangszigetelés: helyiség és környezete közötti elválasztás;
- helyiség hangzása: helyiségen belül megszólaló hangforrásokat befolyásoló hatások minősége.

A *teremakusztika* az építészeti akusztika témakörén belül a helyiségeken belüli, a visszaverődések által is okozott hanghatások összességének vizsgálatát jelenti.

Bár az elnevezés a leírás alapján elsőre úgy tűnik, hogy a teremakusztika csak a helyiségen belüli hatásokkal van összefüggésben, a valóságban a teremakusztikai hatások a helyiségbe jutó külső zajokra is ugyanúgy hatnak, ezért a hangszigetelés (léghangszigetelés, lépéshangszigetelés) hatásosságát és a zajosságot is nagyban befolyásolják. A teremakusztika szerepét és hatását a hangszigetelés és zajosság szempontjából az 1-1. ábra szemlélteti.

A teremakusztikai minőség tehát a zajosságra, hangszigetelésre gyakorolt hatásán keresztül közvetetten is hatással van a minőségérzetre, ezért a teremakusztikai méretezés célja a rendeltetésszerű használat és a zajcsökkentés támogatása is. Azt is lehet mondani, hogy teremakusztikai méretezés nélkül az építészeti akusztikai méretezés hibás gyakorlat.



1-1. ábra: A teremakusztika (visszaverődések) és a zajosság illetve hangszigetelési szempontok viszonyának szemléltetése.

Gyakran hangzik el olyan érv, hogy például egy iroda nem koncertterem vagy stúdió, a teremakusztikai szempontok ezért nem tartoznak az elsődlegesek közé. Az is elhangzik sokszor, hogy az akusztika és azon belül a teremakusztika is erősen szubjektív, ízlés kérdése és nem tervezhető.

Ezzel szemben tény, hogy a hallással érzékelt minőség folyamatosan alakítja a komfortérzetet, a környezetünkről alkotott megítélést (a fülünket nem tudjuk becsukni). Az emberek életük nagyobb részét zárt helyiségben, nem „természetes” környezetben élik le, ezért hallásunk tudat alatt is igyekszik a hangokat feldolgozni, a hasznos információkat kinyerni, a zavarónak ítélt hatásokat elnyomni. Ezért ahol az akusztikus kommunikáció (beszéd, zene) a helyiség rendeltetésének lényege, a megfelelő teremakusztikai körülmények biztosítása a rendeltetészerű használat biztosításának alapvető követelménye.

Azt is fontos rögzíteni, hogy bár az akusztikai és a teremakusztikai minőség részletes megítélése egyénenként vagy akár hangulattól függően is változik, a minimálisan elvárható minőségi szempontok jól meghatározott műszaki paraméterek használatával és tudományosan, gyakorlatban is alátámasztott módszerekkel méretezhető.

2. Hogyan használjuk a kiadványt?

A teremakusztikai témaközben kiadott első kiadvány célja az építmények tervezésekor leggyakrabban előforduló teremakusztikai méretezést igénylő szituációk, a teremakusztikai szempontrendszerek, követelmények bemutatása.

A meglévő építmények teremakusztikai szempontú jellemzéséről, az egyes helyzetekben vagy rendeltetések szerinti megoldásokról, méretezési javaslatokról és jellemző kivitelezési vagy tervezési hibákról későbbi kiadványban esik szó.

Az elméleti összefoglaló

Mivel a teremakusztikai méretezés a segédlet írásakor az építőipar szereplői számára még valóban nem minden esetben magától értetődő, a segédlet első része egy részletesebb elméleti összefoglaló.

A kiadvány 3. fejezete egy átfogó elméleti összefoglaló azok számára, akik szeretnék megérteni a legfontosabb összefüggéseket és jelenségköröket, a teremakusztikai minőséget leíró paraméterek tényleges hátterét.

A szabályozási környezet bemutatása

A szakirodalomban és a különböző nemzeti szabványokban számos helyen jelenik meg teremakusztikai mennyiség, paraméter, szempont vagy követelmény. Az építésügyi műszaki irányelvek között 2019. szeptemberében megjelent helyiségek akusztikai komfortjáról szóló kiadvány¹ már tartalmaz teremakusztikai követelményeket is.

A kiadvány 4. fejezete kitekintést nyújt a létező követelményrendszerekre és ajánlásokra, majd az elméleti alapok és a hazai tapasztalatok alapján ajánlást fogalmaz meg a teremakusztikai méretezésben használható követelményekre.

A fogalommagyarázat

Az akusztikai és teremakusztikai fogalmak gyakran bizonytalanul jelennek meg a kapcsolódó szakági dokumentációkban (építészet, belsőépítészet, gépészet), ezért a kiadványban alkalmazott akusztikai fogalmakat az 5. fejezet magyarázatai segítenek értelmezni, pontosítani.

¹ (ÉMI, Építésügyi műszaki irányelv, "Akusztika. Helyiségek akusztikai komfortja. Követelmények", 2019)

3. A teremakusztikai méretezés szerepe

A teremakusztikai hatásokat a hangforrások jellegzetességeinek megértésén, a hang szabad terjedésének megértésén, a visszaverődés megértésén és a visszaverődések, visszaverődés-sorozatok érzékelésének megértésén keresztül lehet követni és vizsgálni. A magyarázatokban, szabványokban előforduló alapfogalmakat az 5. Melléklet mutatja be.

3.1. Teremakusztika elméleti összefoglaló

Ha egy csendes helyiségben egy rövid idejű hang (pl. taps) szólal meg, nem csak a tapsot, hanem utána egy elhalkuló, lecsengő hangot is hallunk. Ez a lecsengő hang a helyiség méretére, alakjára, építészeti és belsőépítészeti kialakítására is legalább annyira jellemző, mint a hangforrás hangjára.

A taps után hallott lecsengő, elhalkuló hangot a terem határoló felületekről és a teremben lévő egyéb tárgyakra történő hangvisszaverődések hozzák létre. A visszaverődések során és a hangterjedése közben is a hangenergia egy része elnyelődik. Az elnyelés mértéke a visszaverődésnél a felület akusztikai minőségétől, a frekvenciától, a beesés szögétől is függ. Az elnyelés mértéke a terjedés közben a megtett távolságtól (eltelt időtől) és a frekvencia mellett a levegő klimatikus viszonyaitól (többek között hőmérséklet, légköri nyomás, páratartalom) is függ.

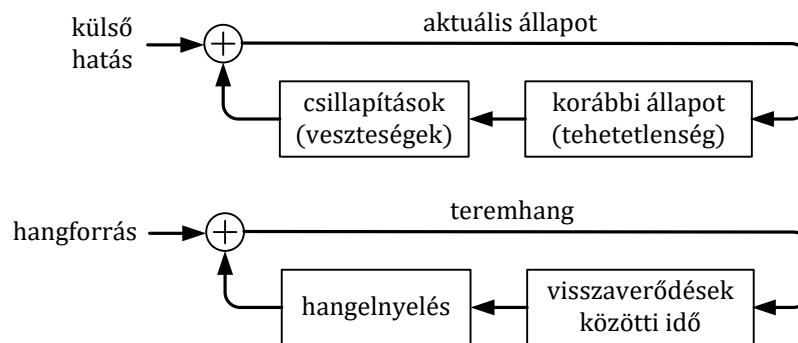
A lecsengés

A természetes folyamatok jellemzője, hogy az aktuális állapotot a korábbi állapot és a külső hatások összege határozza meg (ld. 3-1. ábra). Ez egy dinamikus rendszer, ami a külső hatásokra tehetetlenséggel (nem azonnal) és csillapítással (veszteséggel) válaszol. A lecsengés alapvetően e két tényező következménye.

A hallás mechanizmusa szempontjából azt fontos kiemelni, hogy a lecsengés időbeli lefolyása és hogy melyik irányból milyen hangok érkezik, akkor is folyamatosan információt adnak a környezetünkről, ha nem figyelünk rá külön.

Ugyanilyen hatások természetesen a fény terjedésére is hatnak. Azért van mégis nagy különbség a kettő között, mert a fény terjedési sebessége közel 6 nagyságrenddel nagyobb, mint a hang terjedési sebessége. Emiatt az épített környezetben a fény szempontjából minden felület és elem mérete „óriási” (sokkal nagyobb, mint a látható fény 390...750 nm hullámhossza), miközben a hang szempontjából vannak „nagyon kicsi” akadályok és vannak „nagyon nagy” akadályok is. Például az 50 Hz hangnak megfelelő kb. 6,9 m hullámhossz számára egy asztal nem akadály, de egy 8 kHz hangnak megfelelő 4,3 cm hullámhossz számára már egy dosszié is az. A hang esetében

a fontos hangjelek (pl. beszéd) alakulását ráadásul a hasonló sebességű visszaverődési folyamatok időbelisége is komolyan torzíthatja.



3-1. ábra: A természetes folyamatok és a teremakusztikai folyamatok analógiája a lecsengés kialakulásának megértéséhez.

A lecsengést legegyszerűbben a lecsengés hossza írja le, ami a folyamat gyorsaságából és csillapítottságából adódik. A folyamat gyorsasága a visszaverődések közötti idő, a csillapítottság pedig a felületek hangelnyelése visszaverődésenként és a levegő hangelnyelése a megtett hangút hossza függvényében.

A lecsengést a fenti modell alapján a 3-2. ábra szemlélteti az idő függvényében. Látható, hogy a lecsengés gyorsasága és a csillapítási hatások együttesen határozzák meg a lecsengés hosszát. A lecsengés hosszának a mérnöki gyakorlatnak megfelelően azt az időt tekintjük, ami ahhoz szükséges, hogy egy kezdeti állapothoz képest a hangenergia egymilliomod részre (dB-ben kifejezve 60 dB) csökkenjen. Ez az utózenngési idő² (T_{60}).

A lecsengés hatása folyamatosan működő hangforrásokra

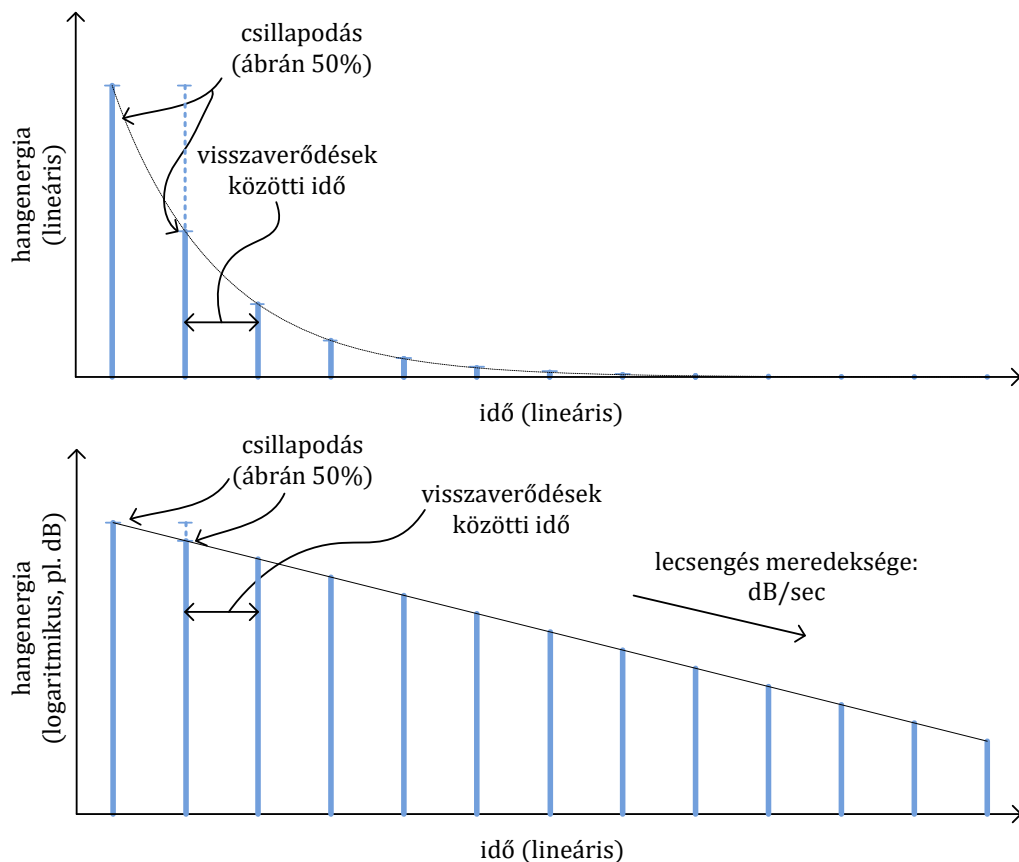
Ha a hangforrás nem rövid ideig szól, a visszaverődő hangenergiák összeadódnak (3-3. ábra). Ez magyarázza, hogy a teremakusztikai folyamatok hatásaként a helyiségben megszólaló hangforrás vagy a helyiségbe kívülről bejutó hang által keltett hangtér energiáját emeli. Az ábrából látható, hogy

- a felhalmozódó hangenergia egy konkrét szinthez tart és annál nem lesz nagyobb;
- a hozzáadódó összes hangenergia mennyisége csak a csillapítástól függ, a visszaverődések közötti időtől nem.

Szemléletesen azt is szokás mondani, hogy amikor már nem nő tovább a folyamatos hangforráshoz felhalmozódó visszaverődések szintjének összege, a helyiség akusztikai

² Az utózenngési idő az akusztikában, szabványokban alkalmazott kifejezés a teremakusztikai folyamatok és lecsengés hosszára. A német nyelvterületen Nachhallzeit, angol nyelvterületen a reverb kifejezés használatos.

értelemben „telítődik”, elér egy egyensúlyi állapotot, amikor a hangelnyeléssel elvesztett energia éppen egyenlő a visszaverődésekből táplálkozó hangteljesítménnyel.

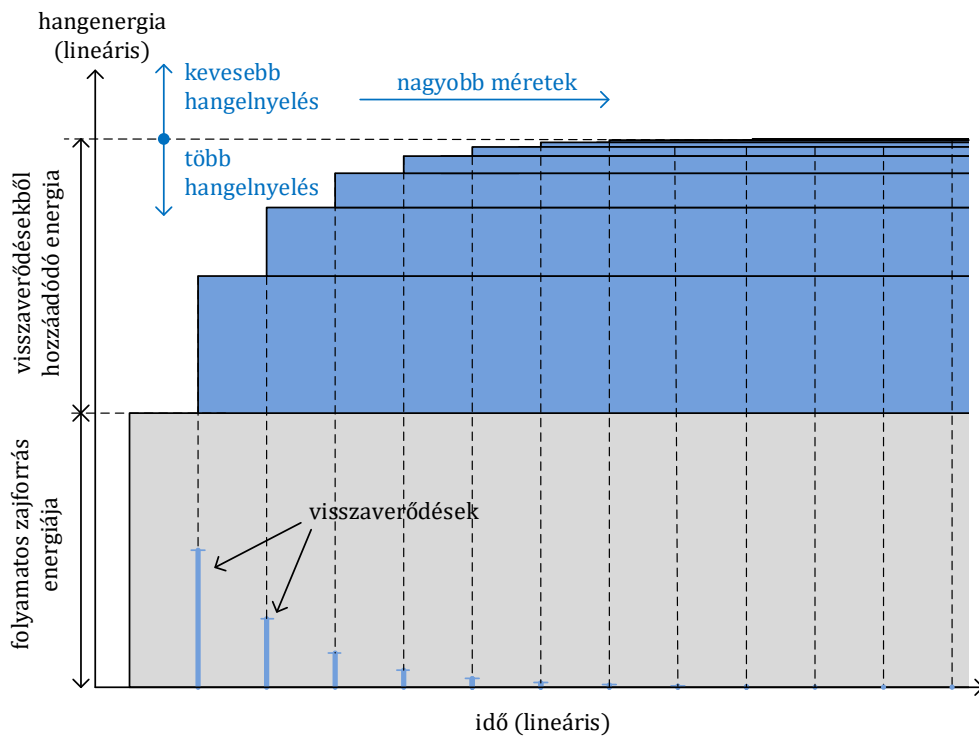


3-2. ábra: A lecsengés hosszát a visszaverődések gyakorisága és a csillapítás együttesen határozzák meg, amit leegyszerűsítve dB/sec mértékegységű meredekség jellemez.

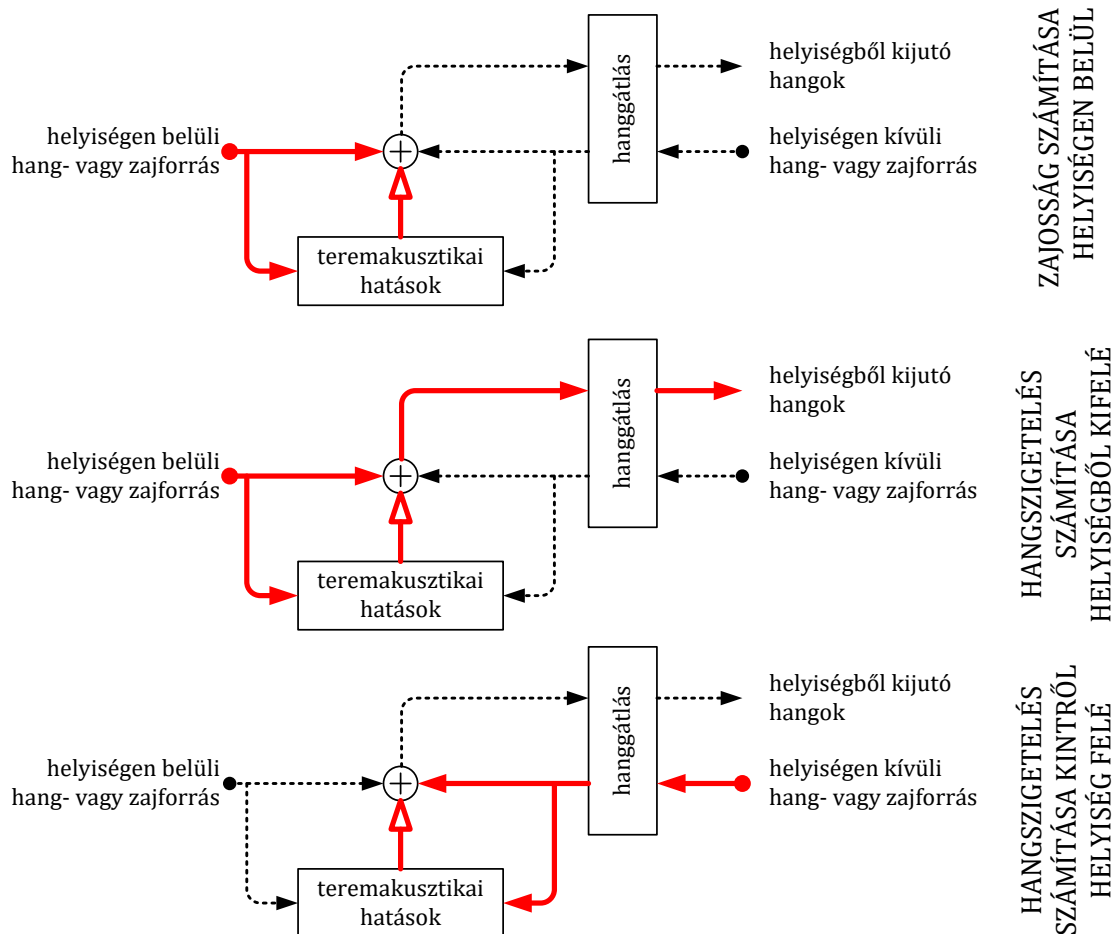
A helyiségekben kialakuló eredő hangenergiaszint tehát függ a helyiség teremakusztikai tulajdonságaitól. Ez indokolja azt is, miért kell figyelembe venni a teremakusztikai hatásokat a hangforrás vagy zajforrás eredő zajsztintjének illetve a hangszigetelés számításakor. Ezt szemlélteti a 3-4. ábra is.

A visszaverődések energiáinak felhalmozódása rövid idejű hatások esetén kevésbé jelentős, de folyamatos hatások, mint például háttérzaj, gépészeti zaj stb. már figyelembe kell venni. A teremakusztikai hatásokat tehát az OTÉK³ 50.§ (3) szerint alapvető követelménynek tekintett zaj- és rezgésvédelem szempontjából figyelembe kell venni.

³ (rendelet, 1997)



3-3. ábra: A folyamatosan bekapcsolt hangforrás energiához hozzáadódnak a visszaverődések hangenergiái.



3-4. ábra: A teremakusztikai hatások szerepe (piros színnel jelzett nyilak) a zajosság és a hangszigetelés számításánál.

A lecsengés egyéb hatásai

A teremakusztika méretezés legalapvetőbb „komfort jellegű” szempontjai a

- beszédérthetőség;
- hangtisztaság;
- bizalmasság;
- támogatás.

A teremakusztikai „támogatás” (support) azt fejezi ki, hogy a teremakusztikai hatások hogyan alakítják a hangnyomásszintet (hangerőt), azaz adott esetben hogyan támogatják a beszédet a beszédhang felerősítésével.

A teremakusztikai „hangtisztaság” (clarity, definition, Deutlichkeit) azt fejezi ki, hogy a közvetlen hang utáni korai és az azt követő visszaverődések energiái hogyan viszonyulnak, a korai visszaverődések energiájának nagyobb aránya tisztább hangzást, határozottabb, jobban kivehető közvetlen hangot jelez.

Az angol szakirodalomban használt „privacy” (magyar nyelvben leginkább „egyedüllét-érzet”) azt fejezi ki, hogy a helyiség egy adott pontján mennyire zavaróan hatnak a helyiségben máshol zajló beszélgetések vagy tevékenységek hangjai. Ezzel rokonértelmű kifejezés a „beszéd diszkréció”, ami kifejezetten azt a szempontot vizsgálja, hogy a helyiség egy adott pontján mennyire rosszul érthető a máshol zajló beszélgetés. A magyar szakirodalomban nincs kialakult szóhasználat ezekre a jellemzőkre, a továbbiakban összefoglalóan a „bizalmasság” kifejezést használjuk.

Ezek részben összefüggenek, mivel a beszédérthetőség és a hangtisztaság szoros kapcsolatban áll, a bizalmasság pedig lényegében a beszédérthetőséggel ellentétes jellemző.

A komfortjellemzők megértéséhez és számításához nem elegendő csak az utózengési időt vizsgálni vagy számolni, mert egyrészt részletesebben kell látni a teremakusztikai hatásokat, másrészt más, nem teremakusztikai jellemzőket is figyelembe kell venni. A 3-1. táblázat szemlélteti, hogy az egyes komfort jellemzőknél hogyan kell figyelembe venni a teremakusztikai (lecsengési) hatásokon felül a hangforrás vagy a helyiségben meglévő háttérzajsztint hatását is.

komfort jellemző	hangforrás				háttérzajsztint	lecsengés	
	teljesítménye	irányítottsága	iránya	távolsága		hossza	korai/késői energiaarány
beszédérthetőség	X	X	X	X	X	X	X
hangtisztaság	-	X	X	X	-	-	X
bizalmasság	X	X	X	X	X	X	X
támogatás	-	X	X	X	-	X	X

3-1. táblázat: A teremakusztikában vizsgált komfort-jellemzők.

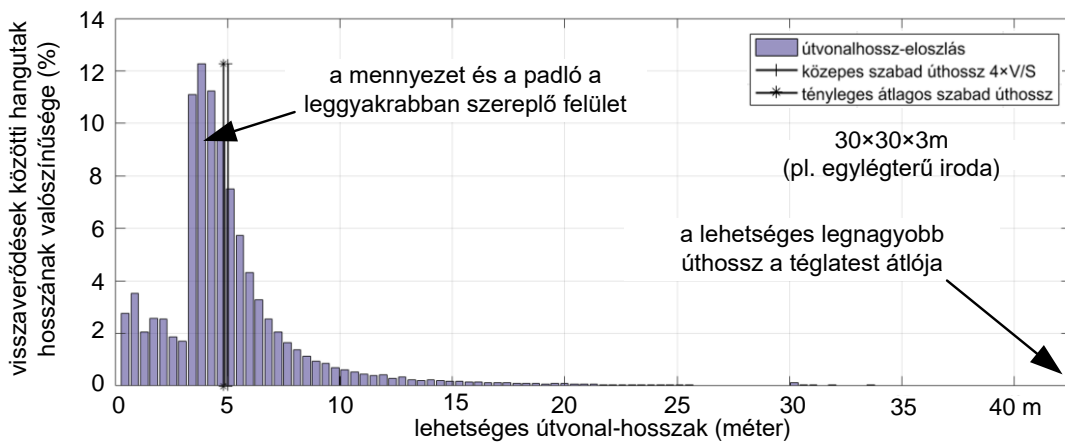
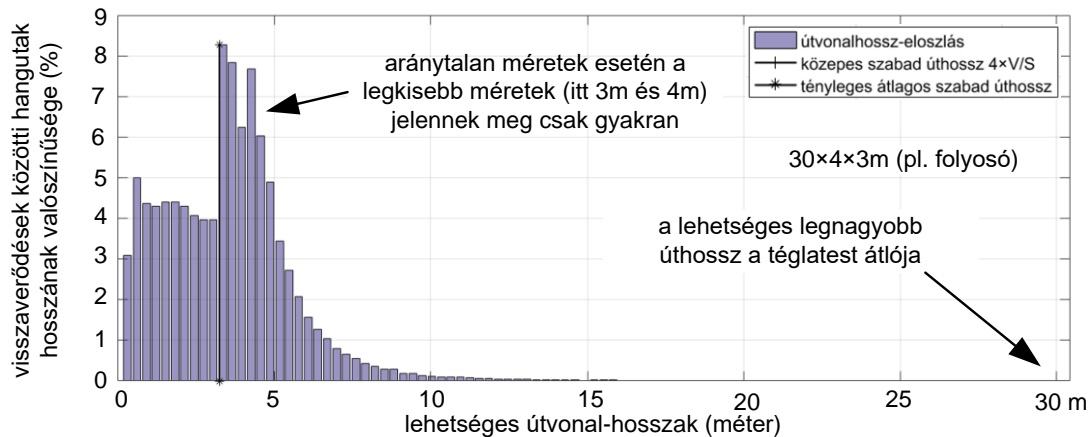
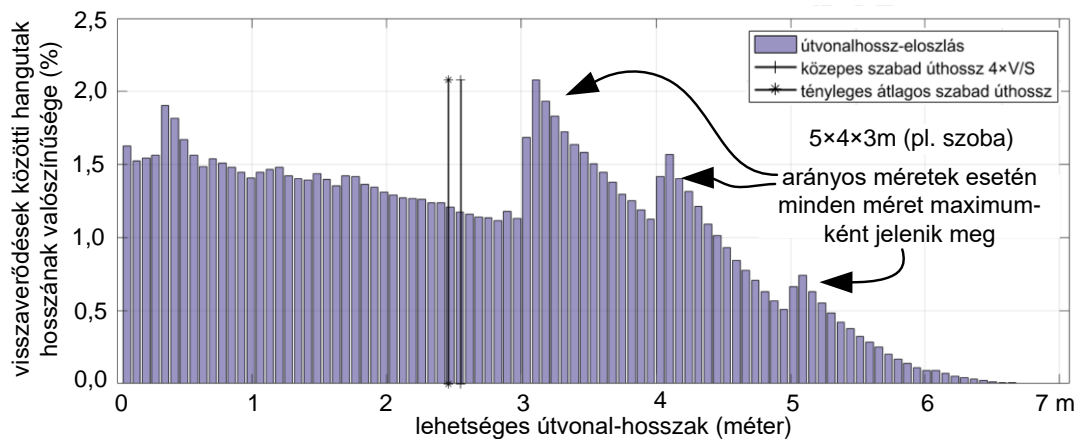
A lecsengés modelljei

A lecsengés hossza a visszaverődések közötti időtől és a csillapítástól függ, de a 3-2. és 3-3. ábrák azt feltételezik, mintha a visszaverődések között mindig ugyanakkora idő telne el. A gyakorlatban kétféle modellt alkalmaznak az egyszerűsített számításoknál:

- a Sabine-féle lecsengési modell azt feltétezi, hogy minden felület minden időpillanatban a felülettel arányos mértékben, beesési iránytól független mértékben nyeli el a beeső hangot;
- az Eyring-féle lecsengési modell a visszaverődések gyakoriságát egyenletesnek feltételezi, a gyakoriságot két visszaverődés – így egyben két visszaverődés elnyelés – között megtett átlagos szabad úthosszal ($l_{\text{átlag}}$) jellemzi (mint 3-2. vagy 3-3. ábra), az elnyelés itt is a beesési iránytól független.

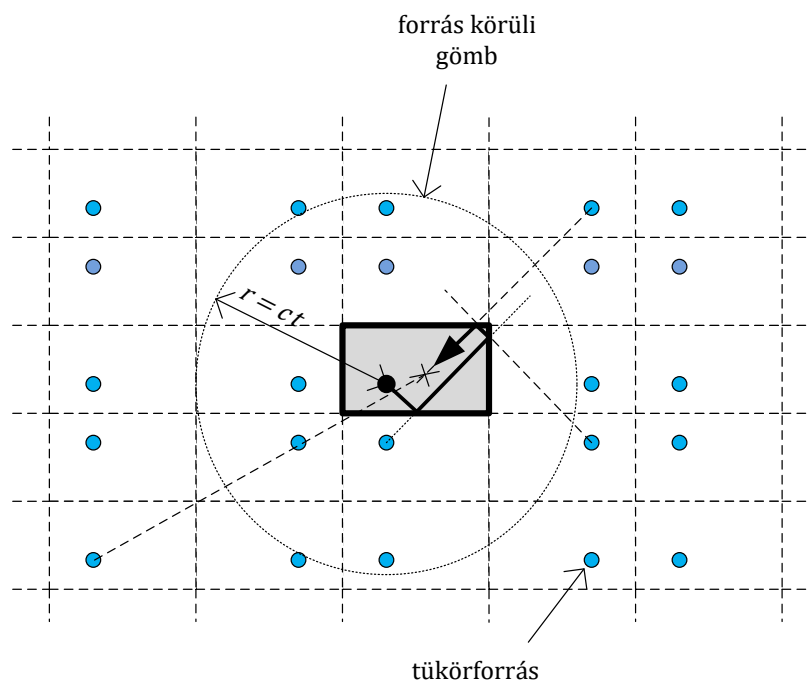
Az átlagos visszaverődések közötti szabad úthossz közelítése $l_{\text{átlag}} = 4 \cdot V/S$. A valóságban a visszaverődések közötti úthosszak valószínűségi eloszlása összetettebb. A gyakoriságra néhány különböző, a valóságban előforduló teremérettel a 3-5. ábra mutat számított példákat.

Az eredményekből megfigyelhető, hogy az eloszlás maximumokat mutat a helyiséget jellemző oldalhosszaknál, mindig a legkisebb oldalhossz határozza meg a leggyakoribb visszaverődési útvonalhosszt, az egyszerűen számolt közepes szabad úthossz elegendően pontos közelítés, illetve a közepes szabad úthossznál kb. $2,5 \times$ nagyobb útvonalhosszak valószínűsége elhanyagolható.



3-5. ábra: A visszaverődések közötti szabad úthosszak valószínűsége különböző oldalarányú téglatest-alakú helyiségeknél.

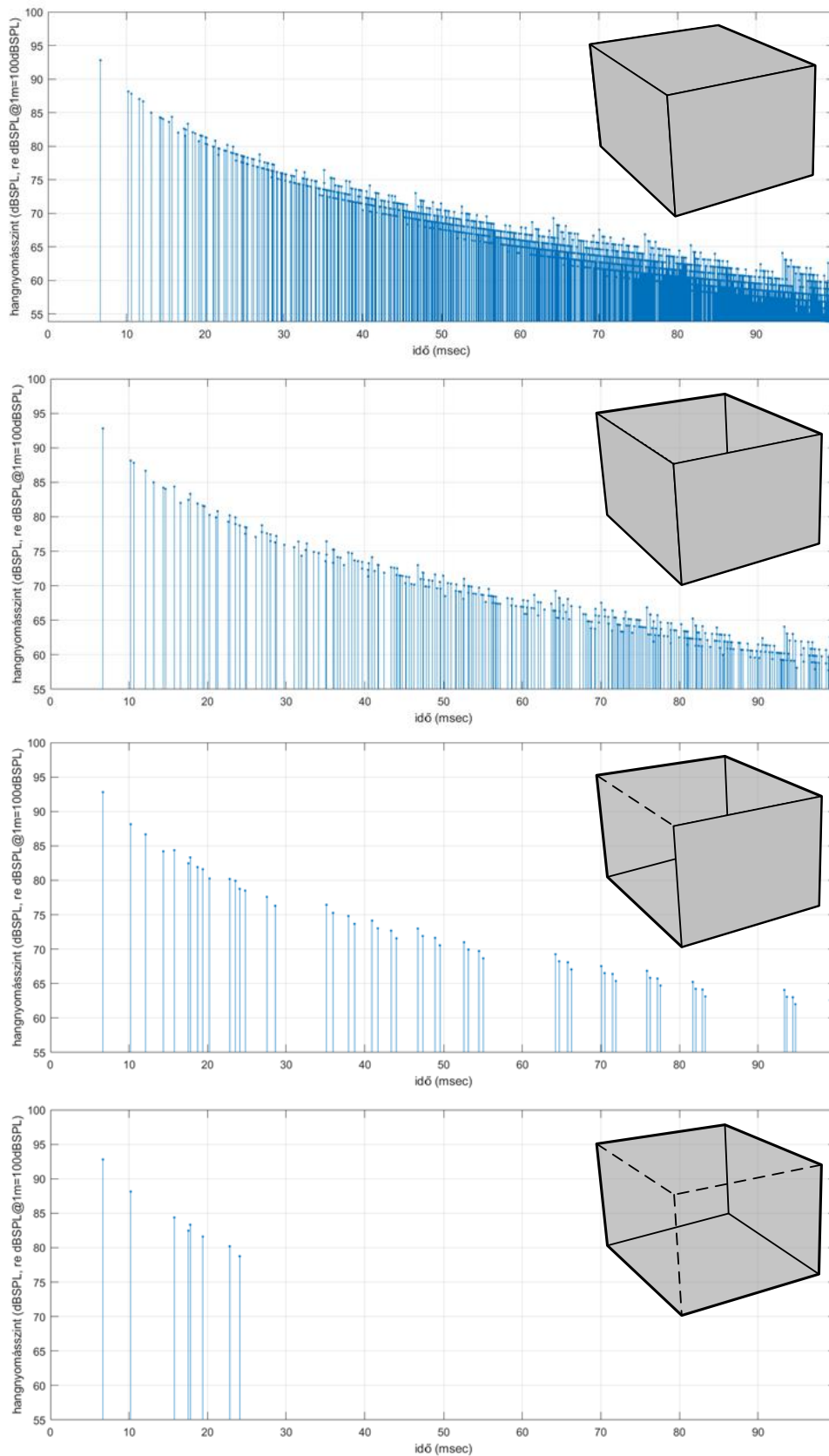
A visszaverődések sűrűsége nem állandó, mert kivételes esetektől eltekintve a visszaverődések sűrűsége folyamatosan nő. A 3-6. ábra a „tükörforrások” módszerét téglatest alakú helyiséggel szemlélteti. A modell szerint a sík kemény felületekről vett visszaverődéseket úgy lehet tekinteni, mintha azok tükörként ismételnék az eredeti forrást. Ez analóg azzal, mintha egy tükörfalú helyiségben kapcsolnánk be egy lámpát: a lámpa és annak tükörképei is tovább tükröződnek végtelenszer, a tükörképek pedig szabályos rács pontjaiba rendeződnek. A modell alapján a hangforrás megszólalásától számított t idő múlva már egy ct sugarú gömbben összesen $N=4(ct)^3\pi/(3V)$, tükörforrás található, azaz ennyi visszaverődéssel lehet számolni a helyiségben. Mivel így a visszaverődések száma t^3 -el arányos, a visszaverődések sűrűsége t^2 -el arányos.



3-6. ábra: A visszaverődések számának számításához használt tükörforrások modellje téglatest alakú helyiségeknél (pl. felülnézet).

A folyamat eredményeként az egyes visszaverődések közötti különbség gyorsan csökken és rövid idő múlva az egyes visszaverődések már nem különböztethetők meg. A lecsengésnek ezt a szakaszát már utózengésnek nevezzük.

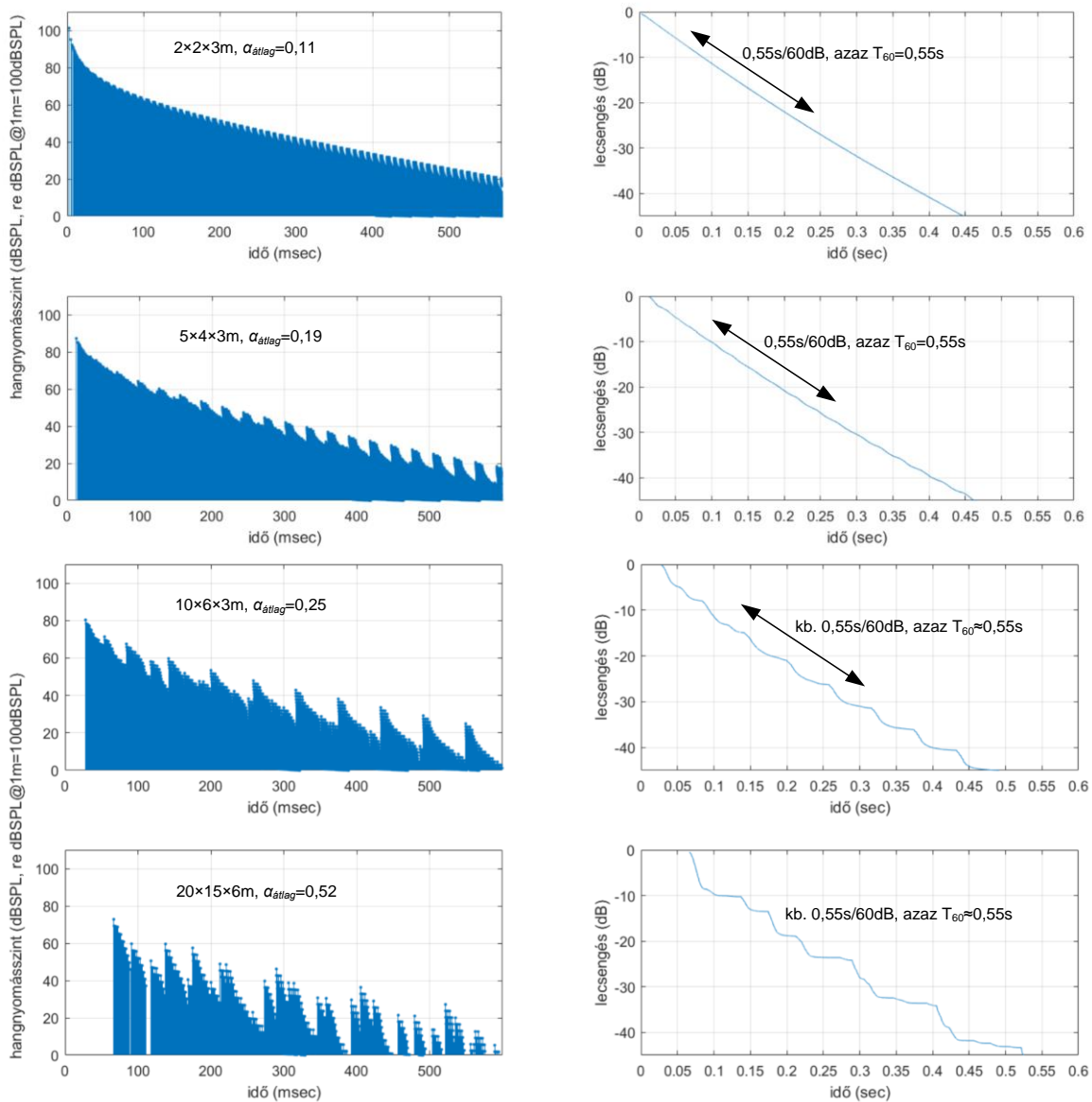
A 3-7. ábra tükörforrás-moddellel számolt teremválaszokat mutat, amikor minden felület azonosan 0,20 hangelnyelést képvisel, majd előbb a mennyezeten, aztán az egyik oldalfalon, majd az egyik végfalán állítunk be 1,00 hangelnyelést. Az 1,00 hangelnyelés azt jelenti, hogy a felületről nincs visszaverődés, mintha nem lenne ott felület, a helyiség abban az irányban nyitott lenne.



3-7. ábra: A visszaverődések időbeli sorrendje (echogram) egy $5 \times 4 \times 3$ m helyiségben, amikor az elnyelés minden felületen 0,20, majd a mennyezetén, aztán egy oldalfalon, végül egy végfalon állítunk be 1,00 hangelnyelést (megnyitjuk a falat).

Látható, hogy a visszaverődések sűrűsödéséről csak akkor beszélhetünk, ha minden irányból van visszaverődés. Amint egyes irányokból kikapcsoljuk a visszaverődést (tökéletes hangelnyelő kerül a felületre vagy eltűnik a felület), a visszaverődési mintázat „kiürül”, végül már nincs is lecsengés, csak véges számú visszaverődés.

A 3-8. ábra azt mutatja, hogy különböző térfogatú, de azonos utözengési idejű helyiségek lecsengési folyamata eltérő. A nagyobb térfogatú teremben a visszaverődések ritkábbak, ezért ugyanahhoz az utözengési időhöz nagyobb felületi hangelnyelés szükséges (ha csak a hangelnyelést méretezzük). Emellett a hangelnyelő felületek térbeli eloszlása befolyásolja a lecsengés egyenletességét is. A térfogathoz választott túl rövid lecsengési idő egyenetlen lecsengéshez vezethet.

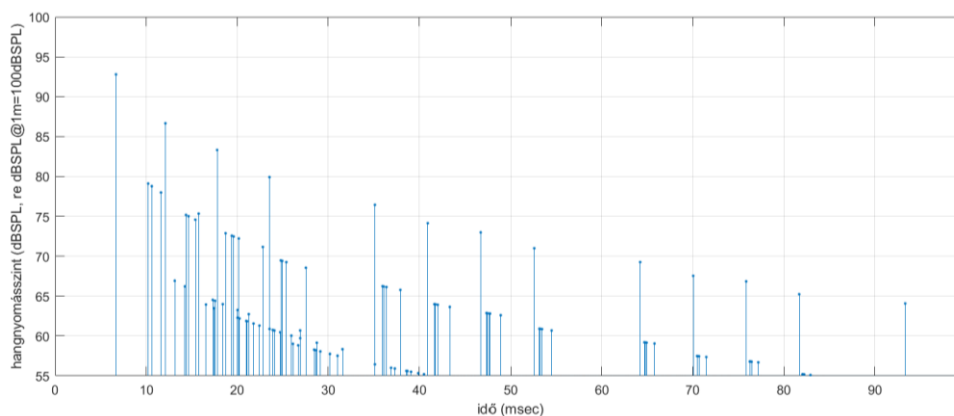


3-8. ábra: A geometriai visszaverődések időbeli sorrendje (echogram) és energialecsengési görbe különböző méretű, térfogatú helyiségekben, ha az utözengési idő közel azonos (eltérő mintázat, eltérő visszaverődési sűrűség, eltérő hangerő).

A teremakusztikai minőséget tehát önmagában az utózengési idő nem írja le maradéktalanul, az utózengési idő alkalmasságának megítéléséhez (értékeléséhez is) legalább a térfogat ismerete is szükséges.

A fénytechnikához hasonlóan az akusztikában is használatos a „diffúz” kifejezés a hangzásra. Ezt általában úgy lehet leírni, hogy az egyes visszaverődések nem különböztethetők meg egymástól és minden irányból azonos valószínűséggel azonos intenzitású hangok (visszaverődések) érkeznek, a helyiségen belül minden pozícióban.

Ha erős hangelnyelés kerül egy-egy felületre, a diffúznak tekinthető zengő szakasz később épül fel, mert az első visszaverődéseknél a véletlen irányú visszaverődések egy része eltűnik a hangelnyelés miatt. Szélsőséges esetben, ha a visszaverő felületek nem produkálnak elég sok véletlen visszaverődést, a zengő szakasz helyett csak egy elkülönülten hallható szabályosan ismétlődő hangsorozat (ún. „csörgő visszhang”) lesz hallható (ld. 3-9. ábra).



3-9. ábra: A visszaverődések időrendben (echogram) egy 5×4×3 m helyiségben, ha az oldalfalakra kerül 0,90 hangelnyelés, de a mennyezet és a padló hangelnyelése 0,20.

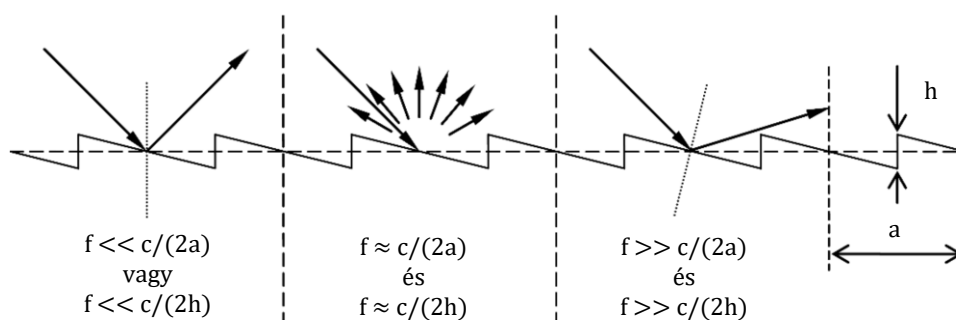
A Sabine vagy az Eyring modell azt feltételezik, hogy a felületek hangelnyelő hatása a beesési iránytól független. A valóságban a visszaverődésnél az energiaveszteség (elnyelés) a beesési iránytól erősen függ. A gyakorlatban a szélsőséges eseteket kivéve viszonylag hamar kialakul egy közel diffúz hangtér, ezért a lecsengés egészének hosszát jellemző paraméterek számításánál elegendő az irányoktól független (különböző irányokból számolt és átlagolt) úgynevezett *diffúztéri hangelnyelési tényezővel* számolni.

A termékek adatszolgáltatásában megadott hangelnyelési tényezők jellemzően diffúztéri hangelnyelési tényezők (meghatározásuk zengőszobában, az MSZ EN ISO 354 szabvány szerint történik).

A hangelnyelés beesési szögtől való függésével nagy és sík felületekkel határolt helyiségekben, illetve a lecsengés korai szakaszának fontossága esetén érdemes számolni.

A diffúz visszaverődés és az utózengés

A diffúz utózengés kialakulását a visszaverődések természetes sűrűsödésén túl a diffúz visszaverődések⁴ is segítik. A diffúz visszaverődéseket a felületek szabálytalanságai és a felületek véges mérete okozzák, a hullámhossz és a szabálytalanság méretének viszonya alapján (ld. 3-10. ábra). Ráadásul a már egyszer véletlenszerűen visszavert hang a továbbiakban már csak véletlenszerű marad, így a diffúz visszaverődéseknek köszönhetően általános esetben a szabályos visszaverődések sűrűsödésétől függetlenül már korábban is diffúz hangtér alakulhat ki.



3-10. ábra: A diffúz visszaverődés szemléltetése⁵: a) ha a hullámhossz nagyobb, mint a szabálytalanság, akkor a visszaverődésben nem jelenik meg a szabálytalanság; b) ha a hullámhossz összemérhető a szabálytalanság méretével, a visszaverődés közel véletlenszerű; c) ha a hullámhossz kisebb, mint a szabálytalanság a visszaverődés pontosan leköveti a szabálytalanság alakját

Az utózengési idő számítása

A korábban említett Sabine-féle és Eyring-féle modell is diffúz hangteret feltételez, mert csak diffúz hangtér esetén lehetnek igazak az általánosító, statisztikus középértékeken alapuló számítások.

A Sabine-féle képlet:

$$T_{Sabine} = \frac{24 \cdot \ln(10) V}{c A} \approx 0,161 \cdot \frac{V}{A} \quad (3-1a)$$

⁴ A „diffúz” visszaverődéseknek itt a nem geometriai („non specular”) visszaverődéseket tekintjük az egyszerűség kedvéért, de a szakmában kétféle paraméter használatos. A nem geometriai módon visszavert hangot szórt (scattered) hangnak és mennyiségi paraméternek (scattering coefficient) tekintik és zengő térben mérik (ld. MSZ EN ISO 17497-1). A szórt hang egyenletességét (irányfüggetlenségét), azaz minőségét fejezi ki a diffúzitási tényező (diffusion coefficient), amit szabad vagy félszabad-hangtérben mérnek (ld. MSZ EN ISO 17497-2).

⁵ (M. Vorländer, 2014)

ahol c a hangterjedési sebesség (kb. 343 m/s szobahőmérsékleten), V a helyiség térfogata, A pedig az egyenértékű elnyelési felület (mértékegysége m^2)

$$A = \alpha_1 \cdot S_1 + \alpha_2 \cdot S_2 + \dots + \alpha_n \cdot S_n \quad (3-1b)$$

ahol $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ az egyes felületek diffúztéri hangelnyelési tényezője, S_1, S_2, \dots, S_n pedig ugyanezen felületek mérete (m^2). Azért nevezzük egyenértékű hangelnyelési felületnek, mert megadja, hogy a helyiségben lévő összes felület hangelnyelése hány m^2 teljesen elnyelő felülettel egyenértékű.

Az utózungési idő a frekvencia függvényében változik, mivel a hangelnyelési tényezők és a levegő hangelnyelése is függ a frekvenciától. A méretezésnél ezért az utózungési időt minden frekvenciasávban ellenőrizni és számolni kell.

A Sabine-féle modell azt feltételezi, hogy minden felület minden pillanatban a felületével arányosan nyeli el a minden irányból beeső hangot.

Az Eyring-féle képlet:

$$T_{Eyring} = \frac{24 \cdot \ln(10)}{c} \frac{V}{-S \cdot \ln(1 - \alpha_{\text{átlag}})} \approx 0,161 \cdot \frac{V}{-S \cdot \ln(1 - \alpha_{\text{átlag}})} \quad (3-2a)$$

ahol $\alpha_{\text{átlag}}$ az átlagos diffúztéri hangelnyelési tényező

$$\alpha_{\text{átlag}} = \frac{\alpha_1 \cdot S_1 + \alpha_2 \cdot S_2 + \dots + \alpha_n \cdot S_n}{S} = \frac{A}{S} \quad (3-2b)$$

ahol S a helyiség határolásainak összes felülete.

Az Eyring-féle modell azt feltételezi, hogy a felületek az átlagos diffúztéri elnyelési tényezőnek megfelelő arányban csillapítják a lecsengést minden közepes szabadúthossz megtételekor. Az Eyring-képlet jól közelíti a Sabine-képletet, ha az átlagos diffúztéri elnyelési tényező kicsi. Az Eyring-képletet érdemesebb használni, ha csillapítottabb helyiségben méretezünk ($\alpha_{\text{átlag}} > 0,30$).

Ha a feltételezések közül bármelyik nem igaz, akkor a Sabine-képlet vagy az Eyring-féle képlet alkalmazása elméletileg hibás. Bár már az Eyring képlet is majdnem 90 éves, manapság is jelennek meg újabb szakmai cikkek, amik a klasszikus képletek érvényességét és pontosságát vizsgálják, újabb kiegészítésekkel látják el. A gyakorlatban mégis számos esetben bizonyított, hogy még bonyolult geometriák esetén is elfogadhatóan jó közelítést ad a Sabine vagy az Eyring-képlet (tanulságos összehasonlító cikk ⁶).

Ennek az az oka, hogy általában van valamilyen szabálytalanság a felületeken, berendezés vagy dísz tárgyak törnek meg a felületek síkságát. Ha a visszavert

⁶ (R. Neubauer, 2001)

hangenergia akár csak 5%-át is eléri már a diffúz visszaverődések aránya, akár 100 ms-on belül felépülhet a diffúz utózengés túlsúlya. Párhuzamos és sík felületekkel határolt, berendezetlen vagy csak egyes felületeket erős hangelnyelő burkolattal kezelve viszont a statisztikus közelítések félrevezető eredményt adnak.

A statisztikus közelítést az MSZ EN 12354-6:2004 a térfogataránnyal egészíti ki:

$$T_{Sabine} = \frac{24 \cdot \ln(10) V}{c A} \approx 0,161 \left\langle \frac{s}{m} \right\rangle \cdot \frac{V}{A} (1 - \Psi) \quad (3-3a)$$

ahol

$$\Psi = \frac{\sum V_{tárgy}}{V} \quad (3-3b)$$

és

$$V' = (1 - \Psi)V \quad (3-3c)$$

ahol $V_{tárgy}$ a helyiség térfogatában elhelyezett tárgyak térfogata és azt fejezi ki, hogy helyiség térfogatából tárgyak által elfoglalt térfogat nem vesz részt az utózengésben. Ha a térfogat-arány kisebb, mint 0,1, a számítás egyszerűsítése érdekében elhagyható.

A statisztikus közelítés alkalmazásának korlátaira az MSZ EN 12354-6:2004 konkrét feltételeket is felsorol:

- szokásos alakú terek: egyik mérete sem nagyobb bármely másik méretének ötszörösénél (pl. folyosók, egylégterű irodák kizárása);
- egyenletesen elosztott hangelnyelés: két szemközti határoló felület hangelnyelési tényezőinek aránya nem nagyobb, mint 3, kivéve ha a térben szóródást okozó térbeli alakzatok vannak (pl. berendezetlen és egyenlőtlenül burkolt helyiségek kizárása);
- nincs túl sok berendezés: a térfogatarány kisebb, mint 0,2 (pl. bútorokkal zsúfolt helyiségek kizárása).

A fenti feltételek alapján az ésszerűen berendezett helyiségek közül csak az aránytalan oldalhosszakkal jellemezhető helyiségek esetén mondható ki biztosan, hogy a statisztikus közelítések félrevezető eredményt adhatnak.

Egyszerűsége okán a Sabine-féle közelítésre épülnek a zajosságot vagy hangszigetelést számító szabványos alapösszefüggések. Ezeket a 2.2. fejezetben mutatjuk be.

A határoló felületeken kívül hangelnyelést képvisel a levegő és hangelnyelést képviselnek a bútorok is, amiket a számításnál figyelembe kell venni:

- levegő hangelnyelése;

$$A_{levegő} = 4mV' \quad (3-4)$$

ahol m a levegő csillapítási tényezője⁷

- bútorzat vagy térbe nyúló alakzatok hangelnyelése $\Delta A_{tárgy}$ az adott tárgy vagy térbe nyúló alakzat egyenértékű hangelnyelése;
- emberek hangelnyelése ΔA_{ember} az 1 fő bent tartózkodó által képviselt egyenértékű hangelnyelés, $N \cdot \Delta A_{ember}$ pedig az elnyelés, ha a bent tartózkodók száma N

Az összes módosított hangelnyelés így:

$$A' = A + \Delta A_{tárgy} + N \cdot \Delta A_{ember} \quad (3-5)$$

Ezeket a kiegészítéseket a (3-1a) összefüggésben felhasználva:

$$T_{Sabine} = 0,161 \cdot \frac{V'}{A' + A_{levegő}} \quad (3-6)$$

A (3-2a) összefüggésben felhasználva

$$T_{Eyring} = 0,161 \cdot \frac{V'}{-S \cdot \ln(1 - \alpha_{átlag}) + \Delta A_{tárgy} + N \Delta A_{ember} + A_{levegő}} \quad (3-7)$$

ahol $\alpha_{átlag} = A' / S$ az összes elnyelés a határolás felületeire elosztva.

Az adott utózungési időhöz szükséges hangelnyelés mennyiségét ($A_{szükséges}$) bent tartózkodók nélkül a fentiek átrendezéséből számolhatjuk:

$$A_{szükséges, Sabine} \geq 0,161 \cdot \frac{V'}{T_{max}} - 4mV' - \Delta A_{tárgy} \quad (3-8a)$$

ahol T_{max} a kívánt (megengedett) legnagyobb utózungési idő.

$$A_{szükséges, Eyring} \geq S \cdot (1 - e^{-A_{szükséges, Sabine}/S}) \quad (3-8b)$$

ahol S a helyiség határolásainak felülete.

Ha $V \leq 400 \text{ m}^3$ és a belmagasság legfeljebb 3,5 m, a 0,5 s-nál nem rövidebb utózungési időkre a Sabine és Eyring-féle számítás között 10%-nál kisebb az eltérés. A Sabine-féle számítás nagyobb hangelnyelést ad, tehát biztonságosabban használható, ha a követelmény maximális utózungési idő, de túlcillapításhoz vezethet, ha a minimális utózungési idő is követelmény.

Felújítás vagy teremakusztikai korrekció esetén a szükséges többlet-hangelnyelés a korábbi (T_2) és a kívánt (T_1) utózungési időkből számolható, ha a zengő térfogat és a berendezés nem változik:

$$\Delta A_{szükséges} \geq 0,161 \cdot V \cdot \left[\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right] \quad (3-9)$$

⁷ ld. MSZ EN ISO 12354-6, MSZ EN ISO 9613-1

frekvencia (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	8000	NRC
jellegetes felületek diffúztéri hangelnyelési tényezője (α) oktávsávonként								
sima beton, üveg, vakolt tégl	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,04	0,00
parketta, PVC	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05	0,06	0,06	0,05
padlószőnyeg	0,02	0,06	0,14	0,37	0,60	0,65	0,65	0,30
vakolatlan tégl	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,07	0,07	0,05
4cm vtg. üvegyapot közvetlenül felületen	0,25	0,75	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,95
4cm vtg. üvegyapot 16cm légréssel	0,63	0,90	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
üvegyapot alapú bontható álmennyezet 200mm összvastagságban	0,55	0,80	0,90	0,85	0,95	0,95	0,95	0,90
6% perforált gipszkarton álmennyezet 200mm összvastagságban, légrésben ásványgyapottal	0,45	0,50	0,45	0,35	0,30	0,30	0,25	0,40
16% perforált gipszkarton álmennyezet 200mm összvastagságban, légrésben ásványgyapottal	0,50	0,70	0,80	0,70	0,60	0,55	0,45	0,70
függöny (200...300g/m ² , 100% redőzés, 10...20cm légrés)	0,20	0,30	0,40	0,50	0,65	0,65	0,65	0,45
nyitott ablak (>1m ²)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
bent tartózkodó emberek becsült hozzáadott egyenértékű elnyelési felülete bútorozáshoz és burkolatokhoz képest (m²/fő)								
férfi álló helyzetben, tipikus	0,05	0,16	0,25	0,58	0,86	1,03	1,29	-
ülő személy nem kárpitozott széken (kb. 0,5fő/m ²)	0,15	0,30	0,40	0,45	0,55	0,55	0,55	-
ülő személy részlegesen kárpitozott széken (kb. 0,5fő/m ²)	0,10	0,15	0,20	0,25	0,25	0,25	0,25	-
ülő személy teljesen kárpitozott széken (kb. 0,5fő/m ²)	0,05	0,05	0,05	0,10	0,10	0,15	0,15	-
kisgyermek (<8 év)	0,05	0,10	0,15	0,20	0,30	0,25	0,25	-
iskolás gyermek (<11 év) tanulóasztalnál ülve	0,05	0,10	0,20	0,35	0,40	0,45	0,45	-
középiszkolás gyermek (>11 év) tanulóasztalnál ülve	0,10	0,15	0,35	0,50	0,50	0,55	0,55	-
tárgyak hozzáadott egyenértékű elnyelési felülete bútorozáshoz és burkolatokhoz képest (m²/db)								
1,2x1,2m függesztett üvegyapot alapú négyzet alakú panel	0,60	1,20	2,07	3,20	2,93	2,83	2,80	-
Ø1,2m függesztett üvegyapot alapú kör alakú panel	0,47	0,94	1,62	2,51	2,31	2,23	2,20	-
1db fa szék háttámlával, kárpitozás nélkül	0,04	0,02	0,02	0,03	0,04	0,02	0,02	-
1db fa szék háttámlával, tömött kárpitozással	0,10	0,20	0,25	0,30	0,35	0,35	0,35	-
levegő teljesítménycsillapítási tényezője (m) a hőmérséklet és a páratartalom függvényében (mértékegység Neper/m, ld. vonatkozó képlet)								
10°C, 30...50% páratartalom	0,0001	0,0002	0,0005	0,0011	0,0027	0,0094	0,0290	-
10°C, 50...70% páratartalom	0,0001	0,0002	0,0005	0,0008	0,0018	0,0059	0,0211	-
10°C, 70...90% páratartalom	0,0001	0,0002	0,0005	0,0007	0,0014	0,0044	0,0158	-
20°C, 30...50% páratartalom	0,0001	0,0003	0,0006	0,0010	0,0019	0,0058	0,0203	-
20°C, 50...70% páratartalom	0,0001	0,0003	0,0006	0,0010	0,0017	0,0041	0,0135	-
20°C, 70...90% páratartalom	0,0001	0,0003	0,0006	0,0011	0,0017	0,0035	0,0106	-

3-2. táblázat: Példák az utózenngési idő számításához használt elnyelési tényezőkre.

Az utózenngési időket jellemzően a 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz és 4 kHz oktávsávokban számolják, mert az építészetben alkalmazott és minősített anyagok diffúztéri hangelnyelési tényezőit ezeken a frekvenciákon publikálják a gyártók. Nem kizárólag zenei alkalmazásnál, de jelentősége lehet a 63 Hz-es oktávsávnak és a 8 kHz-

es oktávsávnak is. A beszédátvitelt (STI paraméter, ld. 3.4. fejezet) például a 125 Hz...8 kHz oktávsávokban kell számolni. Az esetlegesen hiányzó adatokat tapasztalati úton vagy hasonló anyagok ismert jellemzői alapján lehet kipótolni, becsülni. Különböző anyagok, szerkezetek hangelnyelésére a 3-2. táblázat mutat példát (a halványított érték becslés).

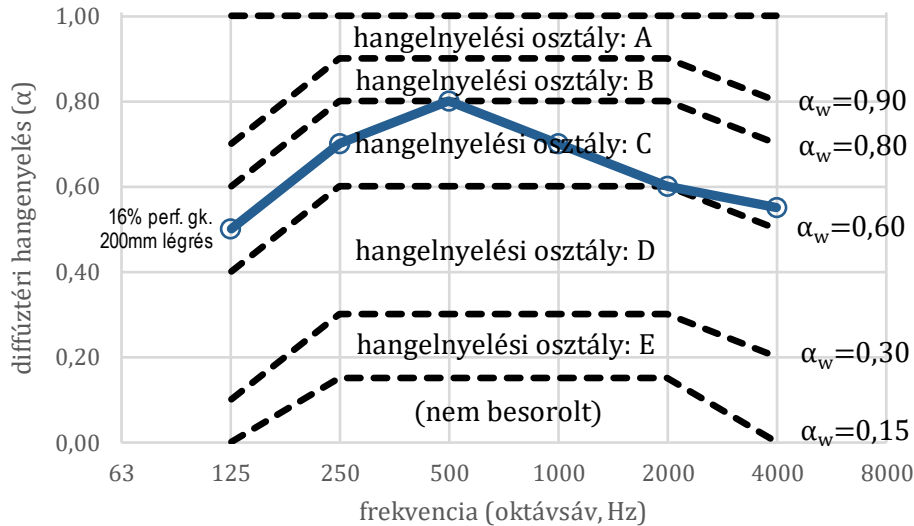
Kényelmi okokból a hangelnyelési tényezők esetében léteznek egyszámados jellemzők (ld. 3-3. táblázat):

- α_w (súlyozott diffúztéri hangelnyelési tényező, MSZ EN ISO 11654): azt a középértéket adja meg, amivel egy súlyozógörbét eltolva a görbéhez képest rosszabb (kisebb) hangelnyelések összege kisebb, mint 0,10; ha az így illesztett görbéhez képest a kisebb, közepes vagy nagyobb frekvenciákon nagyobb a hangelnyelés, akkor a középérték mellett az (L), a (M) vagy (H) jelet kell feltüntetni;
- NRC (noise reduction coefficient, ASTM C423): a diffúztéri hangelnyelési tényező 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz és 2 kHz értékeinek számtani átlaga a legközelebbi 0,05 értékre kerekítve. Ezzel rokon de ritkán használt paraméter az SAA (sound absorption average), ami 200 Hz...2500 Hz tartományban 1/3 oktávsávos hangelnyelési tényezők számtani átlaga.

Szintén kényelmi okokból létezik az utózengési időre egyszámados jellemző, ez a közepes utózengési idő (T_{mean} vagy T_m). Ha másként nem említik, akkor a közepes utózengési időt az 500 Hz és 1 kHz oktávsávokban számolt vagy mért utózengési idők számtani átlaga. A közepes utózengési idő nem szabványos mennyiség, ezért előfordul, hogy eltérően értelmezik (pl. 250 Hz és 2 kHz vagy akár 4 kHz oktávsávokat is figyelembe veszik).

Elsősorban zenei felhasználásnál és nagy hangerejű beszédérthetőségi elvárásnál (pl. hangosított beszéd) lehet indokolt az utózengési idő frekvenciafüggésére is követelményt előírni. Többféle toleranciaséma fordul elő, ezekre mutat példát a 3-11. ábra. Az ábrákon a szaggatott minimum és maximum értékek közötti terület az elfogadott tartományt jelöli.

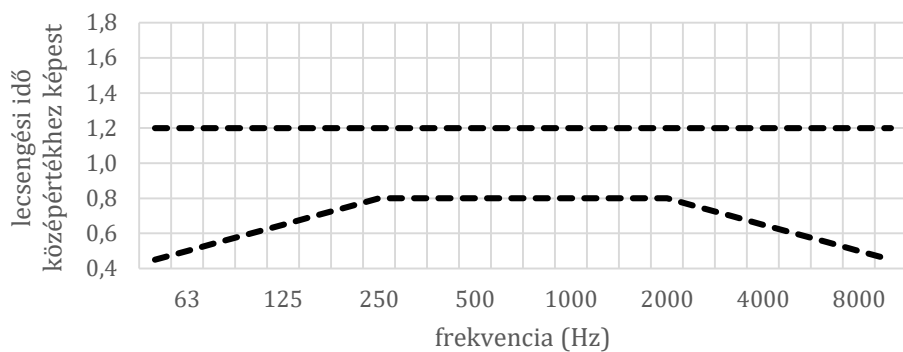
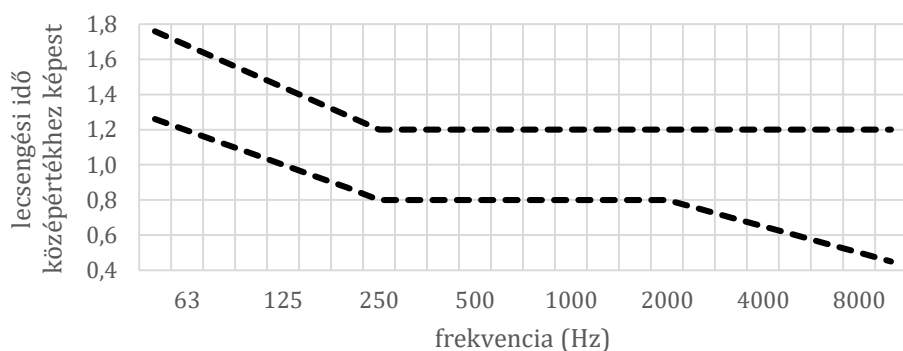
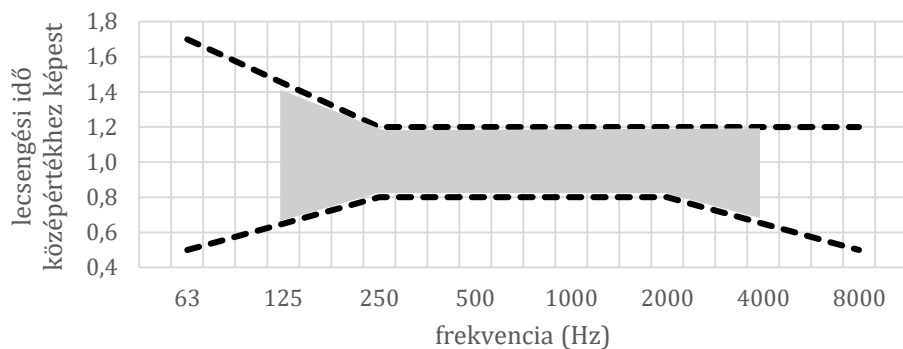
A frekvenciafüggéssel együtt is az utózengési idő csak a lecsengés hosszáról ad információt, a lecsengés milyenségéről és minőségéről nem.



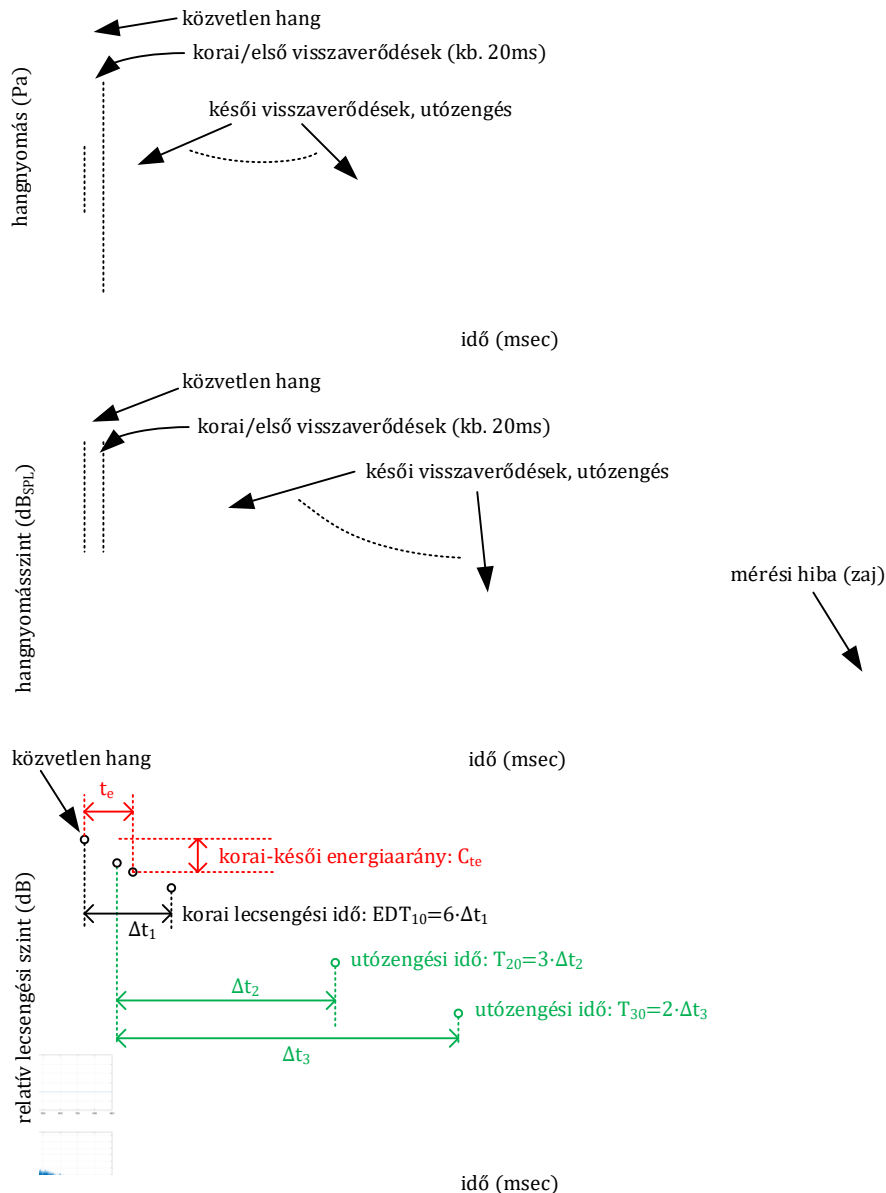
MSZ EN ISO 11654				ASTM423
hangnyelési osztály	α_w	értékelés		NRC, SAA
A	0,90...1,00	különösen hangnyelő	extremely absorbing	0,75...1,00
B	0,80...0,85			
C	0,60...0,75	nagyon hangnyelő	highly absorbing	0,50...0,70
D	0,30...0,55	hangnyelő	absorbing	
E	0,15...0,25	gyengén hangnyelő	hardly absorbing	0,25...0,45
nem besorolt	0,00...0,10	visszaverő	reflecting	0,00...0,20

3-3. táblázat: Az egyszámadatos hangnyelési tényezők megfeleltetése és besorolása (tájékoztató összehasonlítás).

A lecsengés karakterét jól jellemzi a lecsengési görbe, amit a mért vagy számított impulzusválaszból lehet származtatni. Az impulzusválasz a rövid impulzusra adott teremválasz, a helyiség két pontja (adó és vevő) között értelmezhető (ld. még az ellenőrző mérésekről szóló rész). Felépítése hasonló, mint a 2.7. és 2.8. ábrák impulzus-sorozata. Egy mért impulzusválaszt és az impulzusválaszból számolt lecsengési görbét mutat a 3-12. ábra. Az ábrán a lecsengési görbe és az impulzusválasz jellegzetes elemeit is jelöltük.



3-11. ábra: Példák az utószengési idő frekvenciafüggésére alkalmazott toleranciasémákra
 (fent: DIN 18041:2016 általános,
 középen: ÖNORM B8115-3:2005 zenei előadóterem,
 lent: ÖNORM B8115-3:2005 zenei próbaterem vagy beszéd).



3-12. ábra: Mért impulzusválasz és abból származtatott lecsengési görbe a jellegzetes elemek jelölésével. Az EDT_{10} , T_{20} , T_{30} paramétereiből bővebben a 2.4. fejezet szól.

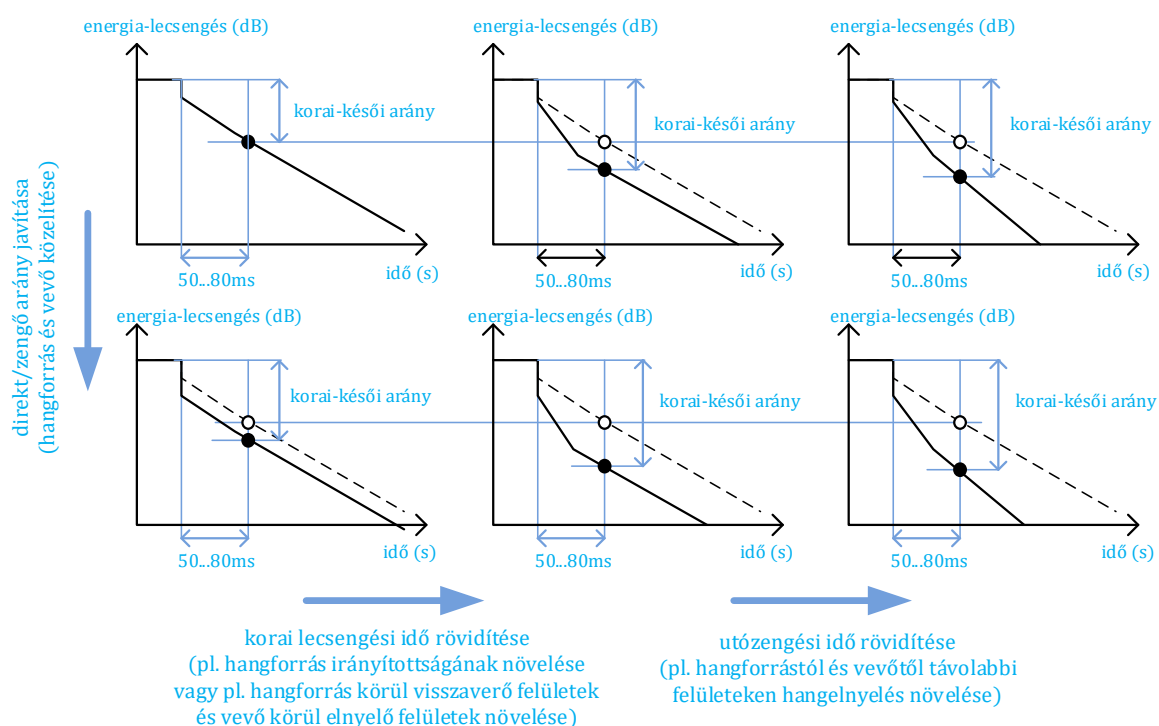
Megfigyelések szerint a hangtisztaság a korai és a korait követő késői energiák arányával áll összefüggésben: minél több energia érkezik a teremválasz korai szakaszában a későihez képest, annál tisztább a hangzás. Ennek az az egyszerű magyarázata, hogy a közvetlen hangot követő első visszaverődéseket hallásunk még az eredeti hanggal összefüggésben kezeli. A késői visszaverődések viszont már csak zajként viselkednek, elfedik a részleteket.

A hangtisztaság a lecsengési görbén egyetlen pontot jelöl ki, a közvetlen hangot követő 50 ms (beszéd hangtisztaság) vagy 80 ms (zenei hangtisztaság) távolságban. Minél lejjebb van ez a pont, annál nagyobb a korai-késői energiaarány (a közvetlen hangot

követő 50...80 ms és az azt követő hangenergia aránya, ld. 3-12. ábra), annál jobb a hangtisztaság. Az 50 ms és 80 ms a szakmában elfogadott konszenzusos érték, a hasznosnak tekintett korai és zavarónak tekintett késői energiák közötti határ a valóságban nem ennyire éles és határozott.

A korai-késői energiaarányt nem csak a visszaverődésekkel és a lecsengés hosszával lehet szabályozni (ld. 3-13. ábra):

- ha kisebb a forrás és a vevő távolsága, a közvetlen hang aránya is nagyobb, ami javítja a hangtisztaságot
- ha irányítottabb a hangforrás és a vevő felé néz, nagyobb energiarezs jut a közvetlen hangra, mint amennyi az egyéb irányokba indul és visszaverődésként kerül a vevőhöz.



3-13. ábra: A hangtisztaság (korai-késői energiaarány) javítás lehetőségeinek szemléltetése az energia-lecsengési görbén (ld. 3-12. ábra).

A természetes hangforrások általában kevésbé irányítottak, ezért lehet például a beszédhang hangosításával irányítottabb mesterséges hangforrással javítani a hangtisztaságot teremakusztikai beavatkozás nélkül.

A hangtisztaság tehát nem csak a helyiség teremakusztikai viszonyaitól függ (ld. 3-1. táblázat), ezért csak a hangforrás és a vevő/hallgató helyének és jellegzetességeinek megadása mellett írható elő teremakusztikai paraméterként.

A beszédérthetőség a hangtisztasággal rokon paraméter, azzal összefüggésbe hozható, de számos nem teremakusztikai jellemzőt (pl. háttérzajszint, stb.) is figyelembe vesz. A beszédérthetőséget jellemző paramétereket a 3.4. fejezet tárgyalja részletesebben.

A visszaverődések a hangforrás hangját felerősítik. Ez a folyamatos zajforrásoknál a zajszint-emelkedését okozza, de ez az erősítés például a rövid ideig tartó hanghatásokból álló beszéd esetében előnyös is lehet a jel-zaj viszony javítására. Ezt a támogatást jelentő erősítést többféle paraméter is jellemzi (ld. 3.4. rész).

3.2. Alapkövetelmény: zajosság

Egy hangforrás ideális szabad térben kialakuló hangnyomásszintje a távolság függvényében, ha a levegő hangelnyelésével nem számolunk (nem túl nagy a távolság) és ha a hangforrás mérete (kiterjedése) kicsi a távolsághoz képest:

$$L_p = L_w + 10 \cdot \log_{10} \frac{n \cdot Q}{4r^2 \pi} \approx L_w + 10 \cdot \log_{10} n \cdot Q - 20 \cdot \log_{10} r - 10,9 \text{ dB} \quad (3-10)$$

ahol L_p a hangnyomásszint, L_w a hangteljesítményszint, Q a hangforrás irányítotttsága, r pedig a hangforrástól vett távolság, n pedig a zajforrások darabszáma, ha a zajforrásokat elég messziről vizsgáljuk ahhoz, hogy kiterjedésében egy zajforrásnak lehessen tekinteni.

Ugyanez a hangforrás zárt térben, pl. egy teremben működtetve a klasszikus statisztikus teremakusztikai közelítések szerint a következő hangnyomást eredményezi

$$L_p = L_w + 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{n \cdot Q}{4r^2 \pi} + \frac{4}{R} \right) \quad (3-11)$$

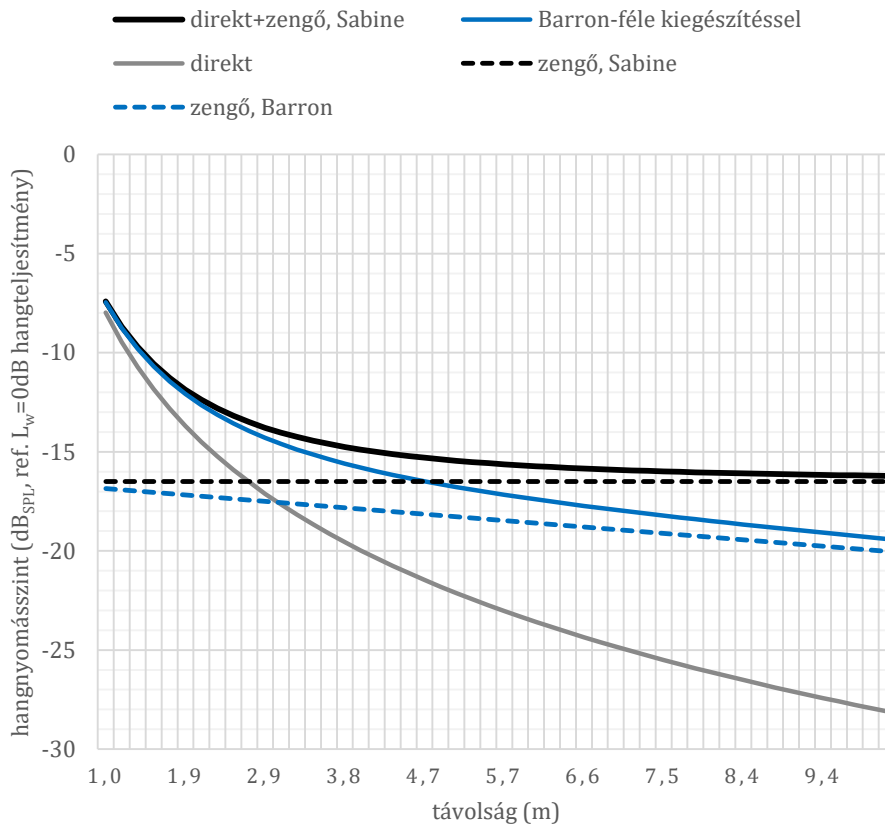
ahol R az úgynevezett teremállandó:

$$R = S \frac{\alpha_{\text{átl.}}}{1 - \alpha_{\text{átl.}}} = \frac{S \cdot A}{S - A} \quad (3-12)$$

ahol S a helyiség összes felülete, $\alpha_{\text{átl.}}$ az átlagos diffúztéri hangelnyelési tényező, A az egyenértékű hangelnyelési felület. Az összefüggésben tehát a távolságtól függő közvetlen hang mellett megjelenik a zengő hang, ami csak a hangelnyeléstől függ, a távolságtól és a hangforrás irányítotttságától viszont nem függ. Ha a felülethez képest kicsi a hangelnyelés ($A \ll S$), akkor $R \approx A$ közelítéssel egyszerűsíthető a számítás.

Az összefüggés jelentését a 3-14. ábra szemlélteti. Látható, hogy a közvetlen hang és a zengő hang egy adott távolságnál közel azonos, ezt „kritikus távolságnak” vagy a teremakusztikai értelemben vett közeltér-távoltér határának nevezzük:

$$\frac{4}{R} = \frac{Q}{4r_c^2 \pi} \Rightarrow r_c = \sqrt{\frac{Q \cdot R}{16\pi}} \quad (3-13)$$



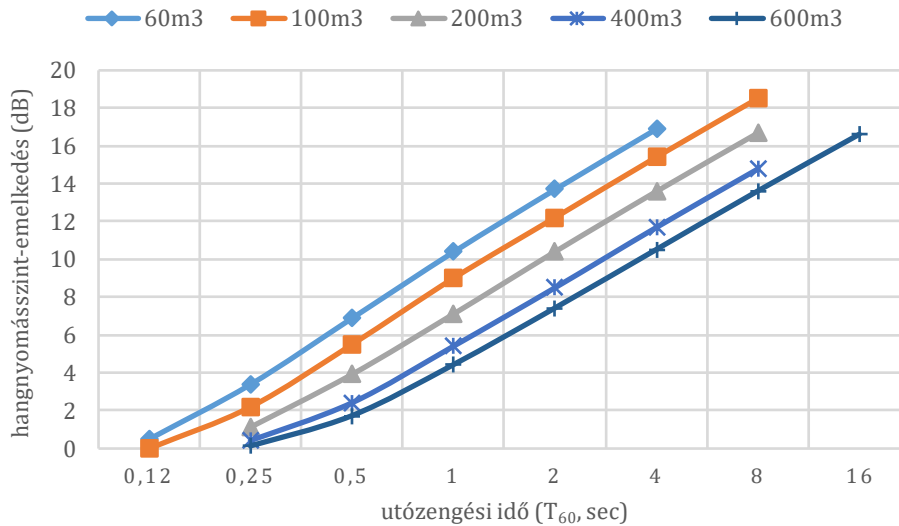
3-14. ábra: A hangnyomásszint alakulása a távolság függvényében statisztikus közelítések alapján ($Q=2$).

Megfigyelések szerint a zengő energia a hangforrástól távolodva csökken. Például a (3-11) összefüggéshez képest a valóságot jobban közelítheti az alábbi összefüggés⁸:

$$L_p = L_w + 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{n \cdot Q}{4r^2\pi} + \frac{4}{R} \cdot 10^{\frac{-0,11 \cdot A \cdot r}{V}} \right) \quad (3-14)$$

ahol r a hangforrástól vett távolság, V a térfogat, A az egyenértékű hangelnyelési szám, R a teremállandó és Q a hangforrás irányítottsága. Ha $Q=2$, a 3-15. ábra mutatja különböző térfogatok esetén az utószó hangidő és a zajosság összefüggését.

⁸ (Barron, 2015)



3-15. ábra: A térben átlagolt hangnyomásszint-emelkedés várható mértéke a térfogat és utózenngési idő függvényében, statisztikus összefüggések alapján.

Ahol a helyiségen belül szabályos kiosztásban vannak elhelyezve zajforrások (egy egylégterű iroda álmennyezetén például 7×7 m pozíciókban), a zaj hatását a zajforrásra eső „saját” térfogatra kell számolni, mert a szomszédos zajforrások úgy viselkednek, mintha tükörforrások lennének (ld. 3-16. ábra), az oldalfalak hangelnyelő hatása a kialakuló zajszintre pedig minimális.

Ilyen esetben az átlagos zajszint közelítő számítása:

$$L_p = L_w + 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{Q}{4r^2\pi} + \frac{4}{R'} \right) \quad (3-15a)$$

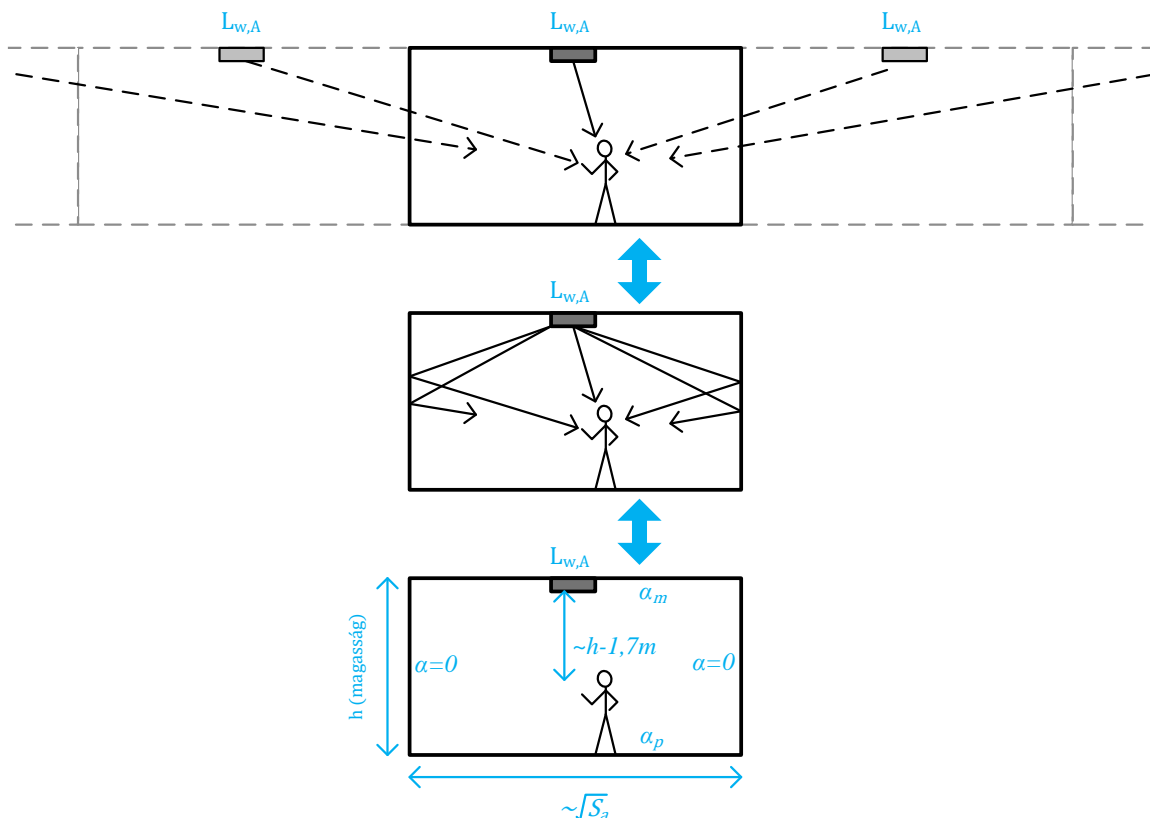
ahol a teremállandó

$$R' = (2 \cdot S_a + 4 \cdot h \cdot \sqrt{S_a}) \frac{\alpha_p + \alpha_m}{1 - \frac{\alpha_p + \alpha_m}{(2 \cdot S_a + 4 \cdot h \cdot \sqrt{S_a})}} \quad (3-15b)$$

ahol S'_a az 1db zajforrásra eső alapterület, h a belmagasság, α_p a padló diffúztéri hangelnyelése, α_m pedig a mennyezet hangelnyelése.

A fenti összefüggésekben az r forrástól vett távolság lehet a zajforráshoz legközelebbi védendő pozíció (pl. mennyezeti fan-coil egységhez legközelebbi munkahely, pl. $r \geq h - 1,7$ m) vagy a közepes szabad úthossz fele 1 db zajforrásra eső térfogatából számolva:

$$r' = 2 \frac{V}{S'} = \frac{1}{\frac{2}{\sqrt{S_a}} + \frac{1}{h}} \quad (3-15c)$$



3-16. ábra: A helyiségben egyenletesen elosztott zajforrások együttes hatásának egyszerűsített modellje.

A fenti összefüggések pesszimista becslésként jól használhatók, amíg az alapterület kicsi a belmagassághoz képest (pl. $S_a < 15 \cdot h^2$). Ha az alapterület nagy a belmagassághoz képest, az oldalfalak jelentősége lecsökken, a mennyezet és a padló jelentősége megnő és a hangelnyelés/visszaverődés szögfüggésének jelentősége is megnő.

3.3. Alapkövetelmény: hangszigetelés

A léghanggátlási szám (R) szerkezeti jellemző. Ideális laboratóriumi körülmények között pl. az 1.1. ábra szerint építve az alábbi összefüggés mutatja meg, hogy a beeső hangteljesítmény ($W_{beeső}$) mekkora része sugárzódik le a szerkezet ($W_{lesugárzott}$) a másik felületén.

$$R = 10 \cdot \log_{10} \frac{W_{beeső}}{W_{lesugárzott}} \quad (3-16a)$$

A látszólagos léghanggátlási szám azt az állapotot jellemzi, amikor az ismert léghanggátlással bíró szerkezetet véges léghanggátlású szerkezetekbe építik be.

$$R_{látszólagos} = 10 \cdot \log_{10} \frac{W_{beeső}}{W_{lesugárzott} + W_{kerülőutas}} \quad (3-16b)$$

A helyszíni léghanggátlási szám a látszólagos léghanggátlási számhoz képest a helyszíni beépítési, szerkezeti hibákkal gyengített állapotot jellemzi:

$$R' = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{W_{bees\acute{o}}}{W_{lesug\acute{a}rzott} + W_{ker\acute{u}l\acute{o}utas}} \right) - \Delta R_{be\acute{e}p\acute{i}t\acute{e}si} \quad (3-16c)$$

A helyszíni léghanggátlási számmal jelzett szerkezetek végül a vevő oldalon lesugározzák az átengedett hangenergiát, ami a visszaverődések miatt felerősödik. Ez alakítja ki végül a hangszigetelés érzetét jellemző hangnyomásszint-különbséget:

$$D = L_{adó} - L_{vev\acute{o}} = R' - 10 \cdot \log_{10} \frac{S}{A} \quad (3-17)$$

ahol $L_{adó}$ a zavaró helyiségben mérhető hangnyomásszint, $L_{vev\acute{o}}$ a védendő helyiségbe jutó (áthallatszódo) hangnyomásszint, S a közös határolás felülete, A pedig a vevő helyiségben jelen lévő egyenértékű hangelnyelési szám. A léghanggátlás csak közvetlenül határos helyiségek esetén értelmezhető, a hangnyomásszint-különbség viszont tetszőleges helyiség-párok esetében értelmezhető.

Hasonló összefüggéssel jelenik a helyiségbe jutó lépéshangnyomásszint számításánál a vevő helyiségben jelen lévő hangelnyelés a lépéshangszigetelést jellemző szerkezeti paraméter mellett (MSZ EN 12354-2):

$$L_i = L'_n - 10 \cdot \log_{10} \frac{A}{A_0} \quad (3-18)$$

ahol L'_n a szabványos lépéshangnyomásszint (szerkezeti jellemző, kerülő utas átvittel), L_i a vevő helyiségben kialakuló lépéshangnyomásszint, A a vevő helyiségben jelen lévő egyenértékű hangelnyelési felület, A_0 pedig a vonatkoztatási elnyelési felület (általában $A_0 = 10 \text{ m}^2$).

A helyiségbe a homlokzaton át bejutó hangnyomásszint (L_{2A}) összefüggésében (MSZ 15601-2):

$$L_{2A} = L_{1AM} - (R_w + C_{tr})' + K_h + 10 \cdot \log_{10} \frac{S_h}{A} \quad (3-19a)$$

ahol L_{1AM} a homlokzatra eső mértékadó hangnyomásszint, $(R_w + C_{tr})'$ a homlokzati szerkezetek eredő helyszíni léghanggátlása közlekedési zaj ellenében, K_h a távolsági tényező (pl. ha a beeső zajterhelést a homlokzattól 2 m távolságban értjük $K_h = 3 \text{ dB}$), S_h a homlokzati felület, A pedig a védendő helyiségben jelen lévő hangelnyelési felület.

Ha a hangelnyelési felület a homlokzat méretezésekor nem ismert, a hangelnyelési felületre adható becslés:

$$A = 0,326 \cdot V \quad (3-19b)$$

ha a helyiség jól berendezett lakószoba,

$$A = 0,163 \cdot V \quad (3-19c)$$

egyébként (legfeljebb 200 m^3 tanterem, kórterem, gyengén berendezett lakószoba).

Látható, hogy a hangszigetelés számításáról és méréséről szóló minden alapösszefüggésben megjelenik a hangelnyelés, mint teremakusztikai jellemző.

Fontos megállapítások:

- a laboratóriumi és gyártmány-adatlapokon található értékekhez képest a hangszigetelést a beépítési környezet (kerülő utas átvitelek), a beépítés minősége (kivitelezési hibák, anyaghibák) és a vevő helyiségben kialakuló visszaverődések hatásai együtt rontják le;
- a hangszigetelést jellemző mennyiségek (lépéshangnyomásszint, hangnyomásszint-különbség) a vevő (védendő) helyiségben jelen lévő hangelnyelés mennyiségétől is függenek;
- a hangelnyelési szám csak akkor helyettesíthető az utózengési idővel, ha a hangelnyelési szám és az utózengési idő közötti összefüggés (pl. Sabine vagy Eyring) feltételei fennállnak.

Megfigyelések ^(9,10) szerint azok a paraméterek, amiket a lecsengés korai szakasza határoz meg, sokkal inkább függenek a beépített hangelnyelés mennyiségétől (pl. egyenértékű hangelnyelési szám), mint az utózengési időtől.

Ennek az az oka, hogy az utózengési idő valójában a lecsengés késői szakaszát jellemzi csak igazán, amikor a lecsengés már eleve diffúz vagy nagy valószínűséggel már közel diffúz. A hangtisztaságot vagy akár a kialakuló hangnyomásszintet viszont elsősorban a korai visszaverődések erőssége határozza meg.

Szélsőséges esetekben tehát (pl. párhuzamos felületek, aránytalan helyiség-méreték, berendezetlen vagy gyéren berendezett helyiség), a zajszint csökkentése és a hangtisztaság is jobban kifejezhető a hangelnyelési számból, mint az utózengési időből, mivel az elnyelési szám és az utózengési idő közötti egyszerű összefüggések (pl. Sabine-féle képlet) nem érvényesek. Természetesen ilyen esetben is a hangelnyelés minél egyenletesebb eloszlására kell törekedni, hogy a lecsengés korai szakaszának alakulása ne legyen túlságosan helyfüggő.

A zajosságról szóló összefüggésekben ezért csak az egyenértékű elnyelési szám, a felület és a térfogat lett feltüntetve, de ezek diffúz hangtér valószínűsége esetén átszámíthatók az utózengési időre is.

⁹ (J. Zander, 2013)

¹⁰ (J. Harvie-Clark, 2014)

3.4. Komfort követelmények

A teremakusztikai hatások minőségét leíró paraméterek közül a hangelnyelés és diffúznak tekinthető hangtér esetén a késői utózengési idő a zajossággal áll összefüggésben, így az építmények minőségét meghatározó alapkövetelményeknek tekinthetők.

Az egyéb teremakusztikai paramétereket inkább komfort-jellegű paramétereknek nevezhetjük. A leggyakrabban ezek a hangtisztasággal és a visszaverődések által okozott erősítéssel állnak összefüggésben. Léteznek ennél kisebb részletekkel vagy irányfüggéssel számoló paraméterek, amik inkább speciális helyzetekben (színházak, koncerttermek, stúdiók, stb.) fontosak, tárgyalásuk túlmutat a tervezési segédlet keretein.

A hangtisztaság a korai-késői energiaaránytal áll összefüggésben, a lecsengésben a közvetlen hangtól számolt időpillanat („korai/késői küszöbidő,”) előtti és utáni szakaszok energiájának arányát jelenti. A küszöbidő jellemző értékei:

- zenei jel hangtisztasága esetén általában 80 ms;
- beszéd-jel hangtisztasága esetén általában 50 ms;
- kisgyermek beszéd-jel hangtisztaság érzete esetén rövidebb, mint 50 ms (pl. ¹¹ szerint 35 ms).

A hangtisztasági paraméter (C, azaz „clarity”) számítása:

$$C_{t_e} = 10 \cdot \log_{10} \frac{E_0^{t_e}}{E_{t_e}^{\infty}} \quad (3-20)$$

ahol $E_0^{t_e}$ a közvetlen hang és attól számított t_e időn belül érkező visszavert hangenergia (korai hangenergia), $E_{t_e}^{\infty}$ pedig a közvetlen hang után t_e idővel és az után érkező összes hangenergia (késői hangenergia).

A jobb hangtisztasághoz rövidebb lecsengés vagy irányított hangforrás szükséges. A hangforrás irányítottságára akkor támaszkodhat a számítás, ha a hangforrás helyzete és iránya jellemző vagy rögzített. A hangforráshoz vagy hallgatóhoz legközelebbi felületek kisebb, a távolabbi felületek nagyobb elnyelése az irányítottsághoz hasonlóan a korai lecsengést rövidítik, azaz a hangtisztaságot javítják. A hangforráshoz vagy vevőhöz nagyon közel helyezett visszaverő felületek a hangforrás vagy vevő irányítottságát javítják¹².

¹¹ (J. Whitlock, 2008)

¹² Kis léptékben tulajdonképpen ez történik, amikor a kezünkből tölcseért formálva beszélünk vagy ha a kezünket a fülünk mögé tesszük.

Ha a hangforrás helye, helyzete, iránya változó, lényegében csak a hangelnyelés mennyiségével (közvetve az utózengési idő hosszával) lehet a helyiségre jellemző hangtisztságot szabályozni. Egy frontális tanteremben vagy előadóteremben a hangforrás és a vevők helyzete általában rögzített, amit dobogó, emelvény vagy a hallgatók helyén lépcsős lelátó hangsúlyoz. Viszont ilyen esetekben is csökkenti az előadó pozíciójának hangsúlyát, ha a hallgatók felelete vagy párbeszéde is fontos eleme a tanórának vagy előadásnak.

A hangtisztságot csak azt fejezi ki, hogy a lecsengési folyamat mennyire korlátozza a hangjel kivehetőségét, miközben gyakran ennél jelentősebb hatása van a zajosságának, ami a hangforrástól távolabb a hangjelnél is nagyobb lehet.

A beszédérthetőség és a bizalmasság ezért figyelembe veszik a hangforrás szintjét, a háttérzajszintet, a hangforrás távolságát is. A beszédérthetőség jobb, ha a beszédhangra jellemző jelek jobban kivehetők a hasznos és zavaró teremakusztikai hatások és a zavaró zajok mellett. A bizalmasság jobb, ha a közeli beszédhangra jellemző jelek kevésbé kivehetők, így kevésbé zavarók. A beszédérthetőség és a bizalmasság ilyen értelemben ezért egymás ellentétei.

A beszédérthetőséget a digitális mérés technikai elterjedése előtt felolvasással, több hallgató bevonásával vizsgálták. Gyakran értelmetlen szavak vagy szótagok azonosíthatóságát értékelték. Az ilyen vizsgálatok hosszadalmasak és nehézkesek, ezért kellett mérhető és a szöveg vagy beszédérthetőség tesztekkel jól összefüggő paramétereket keresni.

Történetileg először csak a háttérzaj jelentőségét vizsgálták (pl. SIL paraméter¹³), majd a beszédhangjel és a háttérzaj jel/zaj frekvenciában súlyozott viszonyát (pl. SII paraméter¹⁴). Később az utózengés hatását pl. a hangtisztsági paraméterek, az utózengési idő és háttérzaj együttes hatását a hasznos/zavaró energiaarányok (pl. U₅₀ paraméter¹⁵) alkalmazásával vizsgálták.

A beszédérthetőség kifejezésére legelterjedtebben használt paraméter az STI (speech transmission index, azaz „beszédátviteli index”, vagy röviden „beszédátvitel”). Az STI eredendően szinuszos modulációk gyengüléséből számol a beszédérthetőségre jellemző 0,00 és 1,00 közötti értéket. Emiatt az STI a hangrendszerekre jellemző nemlineáris torzításokat¹⁶ is figyelembe tudja venni. Ha a nemlineáris torzítások elhanyagolhatóak, az STI közvetett módon az impulzusválaszból is számolható. Az STI

¹³ Speech Interference Level, az 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz és 4 kHz oktávcsívekben mért háttérzajszint dB értékének számtani átlaga (SIL₄). (Beranek, 1947)

¹⁴ (ANSI, 1997 (R2017))

¹⁵ (Bradley, Predictors of Speech Intelligibility in Rooms, 1986)

¹⁶ pl. túlvezérlés, meghibásodás, dinamikasabályozás, automatikus szintezés

elméletéről, számításáról, méréséről, javasolt követelmény-értékeiről az MSZ EN 60268-16 szabvány szól.

Az STI számítása az alábbi tényezőket veszi figyelembe:

- beszédhang szintje a hallgatónál, korrekcióval figyelembe véve a túl halk vagy túl hangos beszédhang érthetőségét;
- háttérzaj szintje a hallgatónál: a háttérzaj szintje elsősorban a beszédhangjel szintjéhez képest számít; ha a beszédhangjel szintje legalább 10...15 dB-vel nagyobb, mint a háttérzaj szintje, akkor a háttérzaj hatása elhanyagolható;
- utózenngési idő (inkább korai lecsengési idő): a rövidebb lecsengés, jobban irányított hangforrás rövidebb korai lecsengést, nagyobb hangtisztságot jelent;
- a fentiek frekvenciafüggése: általában a mélyebb hangok nagyobb aránya rontja a beszédérthetőséget, de például a férfi és a női beszédhangok érthetőségének megítélése is eltérő.

Az STI értékek jelentését a 3-4. táblázat mutatja. A számított vagy mért értékek értelmezésénél a szabvány ezen felül útmutatást ad időskorúak, idegen anyanyelvűek, gyengén hallók eseteire is.

Az STI paraméter teljes számítása 7 db oktávsávban (125 Hz...8 kHz) oktávsávonként 14 db modulációs frekvencia (0,63...12,5 Hz, 1/3 oktávsávonként) esetén vizsgálja a $7 \times 14 = 98$ db modulációs átvitelt. Helyszíni méréseknél, különösen hangrendszereknél a teljes STI számítást közel 99% pontossággal közelíti a STI-PA módszer, ami a 98 db helyett csak 14 db modulációs átvitelt számol.

Az STI erősen korrelál a C_{50} paraméterrel¹⁷ és az U_{50} paraméterrel¹⁸, ezért megfelelő körülmények között egyenértékűen használhatók.

értékelés	STI	CIS	$C_{50,w}$	U_{50}	PB word
kiváló	0,75...1,00	0,88...1,00	>+8dB	> +7,5dB	> 98%
jó	0,60...0,75	0,78...0,88	+2...+7dB	+3,0...+7,5dB	93...98%
elfogadható	0,45...0,60	0,65...0,88	-4...+1dB	-1,5...+3,0dB	80...93%
gyenge	0,30...0,45	0,48...0,65	-7...-5dB	-6,0...-1,5dB	60...80%
rossz	0,00...0,30	0,00...0,48	<-8dB	<-6,0dB	<60%

3-4. táblázat: A beszédérthetőséget jellemző paraméterek értékeinek összevetése¹⁹.

¹⁷ (Marshall, 1994)

¹⁸ (Choi, 2017)

¹⁹ CIS = common intelligibility scale, ld. MSZ EN 50849:2017, C_{50} ld. MSZ EN ISO 3382-1, „PB word” = fonetikusán kiegyenlített szóértés találati aránya

Amikor az a cél, hogy ne legyen érthető a beszéd (pl. egylégterű iroda munkahelyei között), a zavarás vagy elkülönültség kifejezésére lehet használni azt a távolságot, amin túl a beszédérthetőség egy adott értéknél rosszabb (pl. $STI < 0,50$ a zavaró hatás, $STI < 0,20$ pedig a teljes beszéd diszkréció feltétele lehet²⁰).

Az itt tárgyalt beszédérthetőségi mutatók számos helyzetfüggő szempontot nem vesznek figyelembe (pl. kétfülű hallás javító hatása, adaptáció, időben változó zajhatások, forrás és zaj harmonikus tartalma), de éppen ezért alkalmasak a beszéd érthetőségét zavaró hatások általános és robusztus jellemzésére.

A beszédérthetőséggel összefüggő kérdéseket többek között az MSZ EN 60268-16 szabvány (meghatározás, mérés és számítás) és az MSZ EN ISO 9921 szabvány (ergonómia, beszédkommunikáció értékelése).

A helyiség teremakusztika erősítését (G , gain) a visszaverődések nélküli hangnyomásszinthez hasonlítva lehet kifejezni (MSZ EN ISO 3382-1:2009):

$$G = L_p - L_{p,10m} \quad (3-21)$$

ahol L_p a helyiségben mért hangnyomásszint a visszaverődésekkel és a közvetlen hanggal, $L_{p,10m}$ pedig ugyanazon hangforrás visszaverődések nélküli közvetlen hangnyomásszintje 10 m távolságban.

Amikor azt kell kifejezni, hogy minél kevésbé zavarjon egy hangforrás a környezetében (pl. egylégterű iroda), akkor a beszédátvitel távolságfüggésén kívül a hangnyomásszint, azaz a visszaverődések szintjének távolságfüggését érdemes vizsgálni²¹.

3.5. A teremakusztikai követelmények elemei

A teremakusztikai követelmény-rendszerek különböző koncepciói, trendjei a már létező szabványok előírásain és feltételrendszerein érhetők tetten.

A követelmények formájának rögzítésénél az alábbi alapelvekhez javasolt igazodni:

- a követelmény egyértelműen meghatározott állapotra vagy körülményekre vonatkozzon;
- a követelmény nemzetközi szabványokban meghatározott paramétereket vagy azokból számolható paramétereket alkalmazzon;
- a követelmény megbízhatóan számolható és mérhető paramétereket alkalmazzon;

²⁰ MSZ EN ISO 3382-3: 2012: distraction distance (r_D), privacy distance r_P)

²¹ pl. MSZ EN ISO 3382-3: 2012 szabvány szerinti "spatial decay rate of speech" ($D_{2,s}$) paraméter

- a követelmény adjon egyértelmű állásfoglalást arról, hogy mi az elfogadható és mi a nem elfogadható eredmény;
- a követelmény adjon egyértelmű állásfoglalást arról, hogy az elfogadható eredményen túl milyen tendencia kívánatos a jobb eredmény érdekében.

A követelményeket többek között a fentiek miatt is javasolt számszerű formában megadni. Ezt azért kell külön megemlíteni, mert vannak olyan törekvések, hogy különböző minőségi osztályokat betűjelekkel különböztessenek meg. Az egy-egy betűjelhez tartozó paraméterek, értéktartományok szubjektív megítélése azonban nem egyértelműen elfogadott szakmai körökben sem.

A követelmény milyen helyiségtípusra vonatkozik

A követelmények konkrét értéke a helyiségek típusától függően változik. Alapvetően három csoportot lehet viszonylag egyértelműen megkülönböztetni, a helyiségek rendeltetése, elsődleges funkciója alapján, növekvő szigorúsággal:

- a teremakusztikai hatásoknak a hangszigetelést, zajcsökkentést kell támogatni;
- a teremakusztikai hatásoknak a beszédkommunikációt kell támogatni;
- teremakusztikai hatásoknak a zenei megszólalást kell támogatni.

Fontos, hogy a helyiségek rendeltetése legyen a követelmények meghatározása szempontjából döntő, mert a helyiségek elnevezése sokféle lehet, de a rendeltetés viszonylag könnyen azonosítható. Előfordulhat a rendeltetések keveredése is (pl. zenei tanterem), ami egyszerre többféle követelményszintet igényelhet. Ilyenkor kompromisszumot érdemes keresni vagy olyan elemeket kell alkalmazni, amikkel a teremakusztikai viszonyok utólag is hangolhatók (pl. függönyözés).

Ami általánosságban a követelményrendszerekre igaz:

- a rövidebb utózenési idő szigorúbb követelménynek számít, több odafigyelést és nagyobb költséget kévisel;
- az utózenési idő követelményét a térfogat függvényében szokás megadni;
- a beszédhang és zenei hang megszólalásához is a követelmény az elfogadható legnagyobb és legkisebb utózenési idővel jellemezhető.
- a zenei megszólalást a beszédhang megszólalásánál hosszabb lecsengés vagy utózenés támogatja jobban.

A 3.3. fejezetben az utózenési időre vonatkozó különböző ismert követelményrendszerekről esik szó.

A leggyakrabban előforduló helyiségtípusként ebben a segédletben az alábbiakat vizsgáljuk:

- tanterem, előadóterem: a méretezés célja a zajcsökkentésen túl a minél jobb beszédérthetőség és az előadó komfortja;
- óvodai, bölcsődei foglalkoztató: a méretezés célja a zajcsökkentésen túl a minél jobb beszédérthetőség, figyelembe véve a kisgyermekekre jellemző sajátosságokat;
- tárgyaló: a méretezés célja a zajcsökkentésen túl a minél jobb beszédérthetőség, a prezentációs vagy telekommunikációs eszközök megszólalásának támogatása;
- iroda: a méretezés elsődleges célja a zajcsökkentés;
- egylégtérű iroda: a méretezés célja a zajcsökkentés és a munkahelyek közötti zavaró áthallások csillapítása.

A követelmény milyen állapotra vonatkozik

A legtöbb szabvány bent tartózkodók nélküli állapotra ad követelményt. Előfordul azonban olyan szabvány is, ahol a követelmény részlegesen telt (bent tartózkodókkal értett) állapotra vonatkozik. Ez csak annyiban előny, hogy a használati állapotot jellemzi. Azért komoly probléma viszont, mert csak becsléssel számolható és mert méréssel közvetlenül ritkán ellenőrizhető. Például ha sikerül is 75% teltségű helyiséget mérni, a bent tartózkodók ruházata és mérete akkor is bizonytalanság.

A tapasztalatok alapján a helyiségek állapotát a berendezettség (mobiliák), a „belakottság” (dísz tárgyak, növények, használati tárgyak, stb. jelenléte²²), valamint a bent tartózkodók jelenléte írja körül legegyszerűbben. Ezek mindegyike a diffúzió növelésével, hangelnyelés bevitelével az üres állapothoz képest rövidebb lecsengést eredményeznek.

A teremakusztikai követelményrendszerben ezért ésszerű az alábbi feltételeket alkalmazni:

- Üres, berendezetlen helyiséget azért nem érdemes vizsgálni, mert egyrészt nem üzemzerű, másrészt a berendezetlen helyiségekben nagy valószínűséggel nehezen alakul ki a diffúz zengés, így a berendezetlen állapot mérése és a számítása is bizonytalan. Ennek ellenére előfordul, hogy ellenőrző

²² A szakirodalom jellemzően csak a berendezett (“furnished”) és nem berendezett (“unfurnished”) állapotokat különbözteti meg, de tapasztalatok alapján a berendezett (helyesebben „bútorozott”) állapothoz képest jelentős hatása van a normál üzemi állapotban figyelembe vehető elemeknek (dísz tárgyak, növények, használati tárgyak, polcokon könyvek, stb.) is.

méréseket még berendezetlen állapotban kell végezni és az így kapott eredményeket emiatt fenntartásokkal kell kezelni.

- Berendezett helyiség esetén a helyiség funkciójára jellemző berendezésekkel kell számolni (padok, asztalok, paravánok), de ezt a méretezésnél minél pontosabban körül kell írni. Akkor is ez az eljárás javasolt, ha a helyiség elrendezése nem rögzített és számolni kell akár a gyakori átrendezéssel.
- A használati tárgyak és dísz tárgyak jelenléte egyes esetekben a normális üzemi állapot részét képezik (pl. óvoda vagy bölcsőde szőnyegek, plüss állatok, játékokkal tömött polcok), ezért nem hagyhatók teljesen figyelmen kívül. Másrészt viszont egy épület átadásánál végzett ellenőrző mérésnél nem valószínű, hogy ezek már jelen lennének, így a követelményeket is javasolt a nem belakott állapotra alkalmazni.
- A bent tartózkodókkal együtt értett állapot a várható üzemi állapotok szempontjából hasznos információ, azonban nem lehet garanciát vállalni sem arra, hogy minden üzemi helyzetben lesz legalább 50% vagy 75% bent tartózkodó, sem arra, hogy a bent tartózkodók pontosan a becslésekben alkalmazott elnyelést képviselik. A követelményeket azért javasolt bent tartózkodók nélküli állapotra előírni, mert az ellenőrizhető, számolható és a tényleges üzemi állapotra "pesszimista" becslést ad (minden bent tartózkodó jelenléte csökkenti az utózungési időt).

A követelmény milyen paramétereket alkalmaz

Az utózungési idők közül a T_{20} (T_{5-25}), esetleg T_{30} (T_{5-35}) késői utózungési idők használata praktikus, mert

- a korai lecsengési idő a hangforrást és a hangforráshoz vagy vevőhöz legközelebbi felületek jellemzőitől függ jobban, tehát a helyiség egészét kevésbé képviseli;
- a későbbi (-35 dB utáni lecsengést figyelembe vevő) utózungési idők helyszíni adottságok (elsősorban háttérzaj miatt) nehezebben mérhetők és a teremakusztika érzeti jellemzőivel kevésbé állnak összefüggésben, mert a lecsengési görbe -35 dB utáni szakasza már csak kis mértékben befolyásolja a zajszintet és a hasznos jelhez képest csak hosszabb szünetekben érzékelhető.

Az utózungési idő frekvenciafüggése a gyakorlatban csak olyan esetekben fontos, ahol a beszédkommunikáció vagy zenei minőség is fontos. Egyéb esetekben praktikusabb önmagában a közepes utózungési idő (T_m) használata, mert csak ritkán fordul elő annyira aránytalan frekvenciafüggés, amit a közepes utózungési idő zajosság szempontjából nem jellemez kellő pontossággal.

Méréstechnikai szempontból praktikus az 500 Hz és 1 kHz frekvenciasávokból számolt közepes utózungési idő (T_{m2}) alkalmazása, mert ezekben a sávokban egyszerű gerjesztő jelek (pl. taps, lécek összeütése, stb.) is jól alkalmazhatók.

Szabványokban alkalmazzák Az 500 Hz, 1 kHz és 2 kHz frekvenciasávokból számolt közepes utózungési időt (T_{m3} vagy T_{mf}). Előfordul még a 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz és 2 kHz frekvenciasávokból számolt közepes utózungési idő (T_{m4}), ami még egyszerű gerjesztő jelekkel de már bizonytalanabban mérhető.

Ugyanakkor a tapasztalatok alapján a közepes utózungési idő számításánál a több frekvenciasáv bevonása nem szigorúbb elvárás és a frekvenciafüggés egyenletességét sem jellemzi jobban, mint a T_{m2} vagy akár a $T_{500\text{ Hz}}$. Ennek az az oka, hogy jellemzően a nagyobb frekvenciák felé csökken az utózungési idő.

A követelményeknél alkalmazható az egyenértékű hangelnyelés paramétere is (A , azaz „area” MSZ EN ISO 12354-6 szerint), elsősorban olyan helyzetekben, ahol a zajcsökkentés az elsődleges cél.

A követelmények között alkalmazhatók a hangtisztasági elvárások. A beszédátvitel előírása csak akkor nem hiba, ha feltételként a hangforrás helye, helyzete, iránya, irányítottága és ezek mellett a hangforrás szintje, valamint a háttérzaj szintje is meg van adva.

Különösen egylégterű irodákban alkalmazhatók a zavaró hatáshoz tartozó legkisebb távolságok és a hangnyomásszint távolságtól való függésének előírása.

3.6. A teremakusztikai tervezés eszközei

A teremakusztikai tervezés eszközei általánosságban:

- dokumentáció (terv vagy szakvélemény)
- számítási módszerek
- hangtechnikai eszközök, anyagok adatlapjai, adatbázisok.

Dokumentáció

A teremakusztikai szakági tervdokumentáció vagy szakvélemény minimálisan szükséges tartalmi követelményeiről a kamarai útmutatásokat kell figyelembe venni.

Számítási módszerek

Amint az elméleti bevezetőben látható, többféle egyszerűsített számítási eljárás áll rendelkezésre és hivatkozhatunk szabványra (pl. MSZ EN ISO 12354-6) is. Sokszor

azonban az egyszerűsített összefüggések csak korlátozott érvényességgel, fenntartásokkal használhatók.

Legegyszerűbb esetben bizonytalanság esetén korábbi, méréssel ellenőrzött, megvalósult munkák használhatók sablonként, hivatkozásként.

Ha a helyiség egybefüggő, méretei arányosak, elrendezése és a hangelnyelésben részt vevő felületek eloszlása közel egyenletes, akkor nagy valószínűséggel alkalmazhatók a statisztikus közelítések és a legtöbb teremakusztikai paraméter jól becsülhető csak az utózengési időből is akár.²³

Ha a fenti egyszerű módszerek nem alkalmazhatók, a rendelkezésre álló 3D teremakusztikai modellező szoftverek használhatók. A piacon beszerezhető modellező szoftverekkel és alkalmazásukkal kapcsolatban viszont ki kell emelni néhány fontos szempontot.

Csak olyan szoftver alkalmazása ajánlott, ami

- független szakirodalmi hivatkozásokban is szerepel;
- nem csak a geometriai visszaverődésekkel, hanem a diffúz visszaverődésekkel és a hangforrások irányfüggésével is számol legalább a 125 Hz...8 kHz oktávsávokban;
- lehetővé tesz egyedi geometriák, egyedi hangforrás és vevő pontokból vagy felületekből álló elrendezések, egyedi anyagminőségek, egyedi környezeti feltételek (páratartalom, hőmérséklet) beállítását és szerkesztését;
- legalább a hangnyomásszinteket, a visszaverődések időbeli lefolyását, a szabványos utózengési időket, a hangtisztaságot és a beszédérthetőségi mutatókat képes bemutatni önálló pontokban vagy felületeken számolt eredményekkel.

A szoftverek használatakor javasolt figyelembe venni az alábbiakat:

- A geometriai teremakusztikai modellezésnél általában nem ajánlott és nem indokolt az építészeti geometriai részleteket aprólékosan lekövetni, mert az a számítási idő növekedéséhez és a számítási bizonytalanságok növekedéséhez vezethet. A geometria kidolgozottsága és a számítás pontossága közötti összefüggésekről az adott szoftver leírásában kell tájékozódni.
- A sugárkövetéses, nyalábkövetéses módszereknél gyakran alkalmaznak a lecsengési késői szakaszában a sugarak vagy nyalábok véges száma vagy a diffúz zengő tér számítása miatt korrekciókat, ezek azonban csak akkor

²³ (Skålevik, 2010)

működnek jól, ha a geometria matematikai értelemben zárt. Pontos számítási eredmény ilyen közelítésnél csak akkor fogadható el, ha a geometria zártságát a szoftver képes ellenőrizni, a zárt geometria térfogatát a szoftver pontosan számolja.

- A modellek pontossága legalább annyira függ a modellben használt anyagminőségek megfelelő alkalmazásától, mint a modellben alkalmazott számítási eljárástól. Amennyiben másként nem nyilatkozik a szoftver gyártója, a szabványos mérési eljárással, az anyag vagy szerkezet által nyilatkozott anyagminőségekkel javasolt csak számolni.
- A geometriai modellek számítási eredménye nagyon érzékeny lehet a felületek diffuzitásának beállítására. Ha a felületminőségek beállításánál túl kicsi diffuzitást alkalmazunk, a ténylegesen várhatónál lényegesen hosszabb lecsengéseket jósolhat a modell. Mivel egységesen értelmezhető és kezelt paraméterek jelenleg nem állnak rendelkezésre, minden esetben javasolt beállításokról a szoftverek gyártójának ajánlásait követni.
- Ha a szoftver nem tudja kezelni a hangelnyelés szögfüggését, a lapos szögben érintett elsődleges visszaverő felületek hangelnyelő hatását a szoftver túlbecsülheti, ami a lecsengés korai szakaszát kifejező paraméterekben (pl. beszéd-hangtisztaság, korai lecsengési idő) okozhat eltérést.
- A szoftverek használatának ajánlott módjáról és korlátairól minden esetben a szoftver leírásában, a szoftverre hivatkozó szakirodalmi adatok alapján kell tájékozódni.

A tervezési segédletben bemutatott számítások és a gyakorlatban alkalmazott számítási módszerek feltételezik, hogy a lecsengő hang nem koncentrálódik egy-egy kitüntetett frekvenciára, azaz nincs rezonancia-hatás. Ez a feltétel akkor igaz, ha a rezonancia-frekvenciák olyan közel vannak egymáshoz, hogy energetikai szempontból már nem lehet megkülönböztetni őket. Ezt a feltételt fejezi ki a Schroeder-frekvencia

$$f_c = 2000 \cdot \sqrt{\frac{T_f}{V}} \quad (3-22)$$

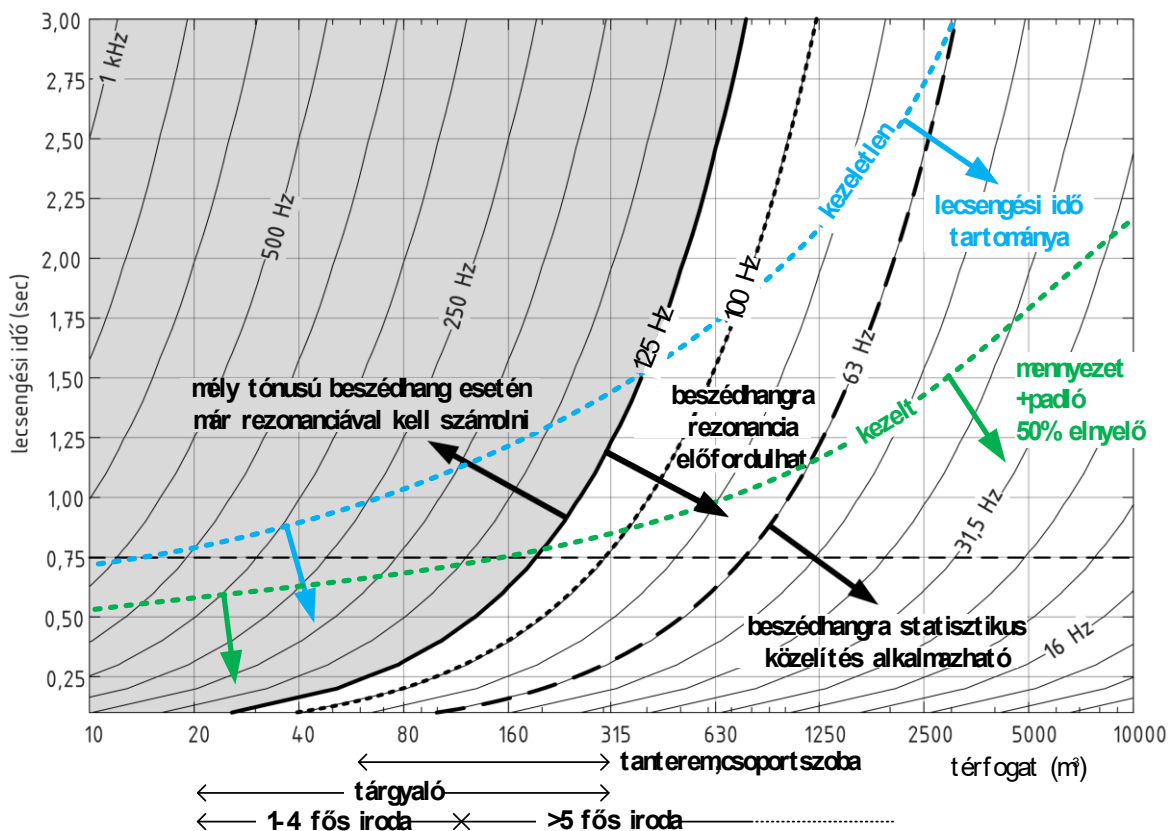
ahol T_f az adott f frekvenciasávra jellemző utözengési idő és V a zárt helyiség térfogata. Ha $f > 2f_c$, akkor az f frekvenciasávban a statisztikus közelítések biztonsággal alkalmazhatók. Ha $f < f_c$, akkor nagy valószínűséggel számolni kell a rezonanciák hatásával (erősen helyfüggő és frekvenciafüggő lecsengés) ²⁴.

²⁴ (Skålevik, Schroeder Frequency Revisited, 2011)

A 3-17. ábra ezt az összefüggést mutatja különböző térfogatok és utózungési idők esetén. Az ábrán a hangelnyelő felületek nélkül és már közepes mértékben csillapított állapotban várható legnagyobb utózungési időt is feltüntettük.

A gyakorlatban az alábbiakat érdemes megjegyezni:

- a rezonancia zavaró hatása hosszabban tartó mély hangokra alakul ki, ami a beszélt hangjelre nem jellemző;
- ha $T > V/100$, akkor a beszédhang mélytónusú tartományában (125...250 Hz) a rezonancia-hatással számolni kell;
- ha $T < V/250$, akkor beszédhangra a helyiségben a rezonanciákkal nagy valószínűséggel nem kell számolni, a statisztikus közelítések elfogadhatók.



3-17. ábra: A Schroeder-frekvencia a térfogat és utózungési idő függvényében, a statisztikus közelítések érvényessége a rezonancia-hatások szempontjából.

A rezonancia-hatásokra viszont számítani kell, ha az épületben vagy a helyiségben olyan gépészeti vagy elektromos berendezés működik, ami kis frekvencián (mély hangon) folyamatos tonális (búgó) hangot produkál. A helyiségben kialakuló teremakusztikai rezonancia miatt előfordulhat, hogy a védendő helyiségben erősen helyfüggő a zavaró hatás és a zajforrás helye nehezen azonosítható. Az ilyen problémát nem teremakusztikai eszközökkel, hanem elsősorban a zajforrás csillapításával, áthelyezésével kell kezelni.

Anyagminőségek

Teremakusztikai szempontból leegyszerűsítve a helyiségek határoló felületeinek minőségéről és a helyiségbe tervezett számottevő méretű felületekről kell információkat gyűjteni.

A hangelnyelő képességről számos irodalmi adat áll rendelkezésre és a teremakusztikai méretezésben használt anyagok, szerkezetek, felületek adatlapjaiból is jól lehet tájékozódni.

Ha a felület nem sík, a nem geometriai visszaverődések arányáról (szórt visszaverődésekről) frekvenciasávonként adhat információt a diffuzitási tényező. Egészen ritka kivételektől (pl. diffúzorok) eltekintve ilyen adatok rendszerint nem állnak rendelkezésre. Ráadásul az erre vonatkozó szabvány²⁵ ellenére a diffuzitási tényezőről szóló adatokat egyelőre fenntartással javasolt kezelni.

A hangelnyelők szerkezete és működésük mechanizmusai szempontjából az alábbi fő típusokat lehet megkülönböztetni:

- pórusos hangelnyelők

A pórusos hangelnyelő felületek felülete nem légtömör, a hanghullám az anyag szerkezetébe jut és a pórusos jelleg miatt energiát veszít. A pórusos hangelnyelő szerkezetek működését a pórusos anyag áramlási ellenállása, a pórusos anyag vastagsága és a pórusos anyag mögött kemény felülettel lezárt légrés mérete szerint lehet vizsgálni.

A pórusos hangelnyelő anyagok jellemzően szélessávú hangelnyelő burkolatok (ld. 3-18. ábra). A hatásosság a kisfrekvenciás tartományban a légréstől és anyagvastagságtól, közepes és nagyfrekvenciás tartományban az áramlási ellenállástól és anyagvastagságtól függ.

Pórusos hangelnyelő anyagok például: üvegyapot, ásványgyapot, nyitott cellás szivacs, kendergyapot, fagyapot, nyitott cellás fémhab vagy műanyag hab, sűrű szövésű de nem zárt szövetek és filcek.

- perforált vagy réses rezonátorok

A rezonátorok jellemzően olyan szerkezetek, amikben a helyiség felé néző felületen vastagabb tömör anyagban lyukak vagy rések azaz perforációk, a perforált felület mögött pedig egy nagyobb üreg vagy légrés található. A

²⁵ MSZ EN ISO 17497-2: Acoustics — Sound-scattering properties of surfaces — Part 2: Measurement of the directional diffusion coefficient in a free field

vastagabb anyag perforációiban lévő levegő tömege és a bezárt légrés rugalmassága adott frekvencián rezonál, amit a perforációhoz közel helyezett pórusos anyaggal csillapítva hatékony hangolt hangelnyelést lehet elérni.

A perforált vagy réses rezonátorok jellemző felépítését és hangelnyelésének karakterét a 3-18. ábra mutatja. A hangolás és a hangelnyelés mértéke a rezonátor geometriájától függ, de a hangolási frekvencia fölött és alatt általában a rezonátorok közepes vagy gyenge hangelnyelő felületnek minősülnek.

Perforált vagy réses rezonátorok például: perforált gipszkarton, perforált falemez, deszkákból vagy lécekből alkotott réses szerkezetek.

- membrán rezonátorok

Ha egy bezárt légrés előtt nem tökéletesen merev zárt lemez található, a hanghullám hatására a lemez mozgásba jön és a lemez tömege, merevsége, valamint a bezárt levegő rugalmassága függvényében rezonátorként működik. A rezonátor csillapítását az üreg csillapítása és a felület mozgására eső veszteségek határozzák meg.

A hatásmechanizmus hasonló a perforált vagy réses rezonátorokhoz, azonban mivel a lemez tömege kisebb, mint a perforált vagy réses rezonátorok lyukaiban található levegő tömege, a lemez-rezonátorok lényegesen kisebb frekvenciákon és gyengébb hatásfokkal működnek.

A membrán rezonátorok jellemző felépítését és hangelnyelésének karakterét a 3-18. ábra mutatja. A hangolás és a hangelnyelés mértéke a szerkezet geometriájától függ, de a hangolási frekvencia fölött és alatt általában a rezonátorok közepes vagy gyenge hangelnyelő felületnek minősülnek. Ha a felületi tömeg nagy vagy a felület nagyon merev, a membrán rezonátor inkább visszaverő felületnek tekintendő.

Membrán rezonátorok például: tömör gipszkarton légrés előtt, tömör faburkolat légrés előtt, ide értve a tömör felülettel lezárt dobozokat, álmennyezeteket vagy akár falakat, álmennyezeteket, födémeket is.

- visszaverő felületek

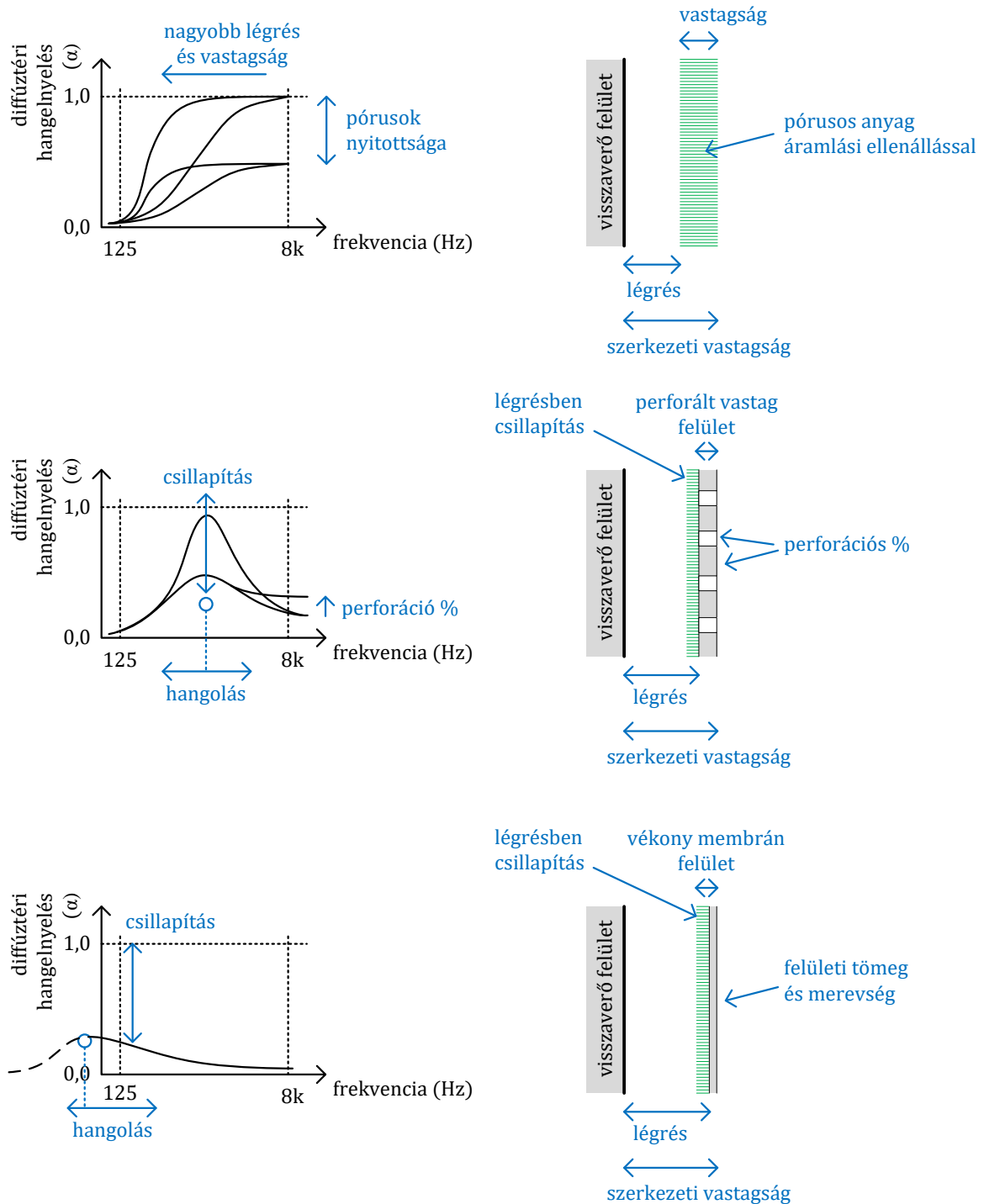
A visszaverő felületek a beeső hangenergia legnagyobb részét visszaverik.

Visszaverő felületnek kell tekinteni az épített nagy tömegű szerkezeteket és az ahhoz szorosan kötődő, nem pórusos felületképzéseket is.

- hangáteresztő felületek.

A hangáteresztő felületek az elnevezésnek megfelelően viselkednek, azaz minimálisan befolyásolják a hanghullám terjedését. Gyakran hangáteresztő vagy közel hangáteresztő felületeket használnak a sérülékeny hangelnyelő felületek védelmére.

Hangáteresztő felületnek minősülnek a laza szövésű hálók, erősen perforált fémlemezek.

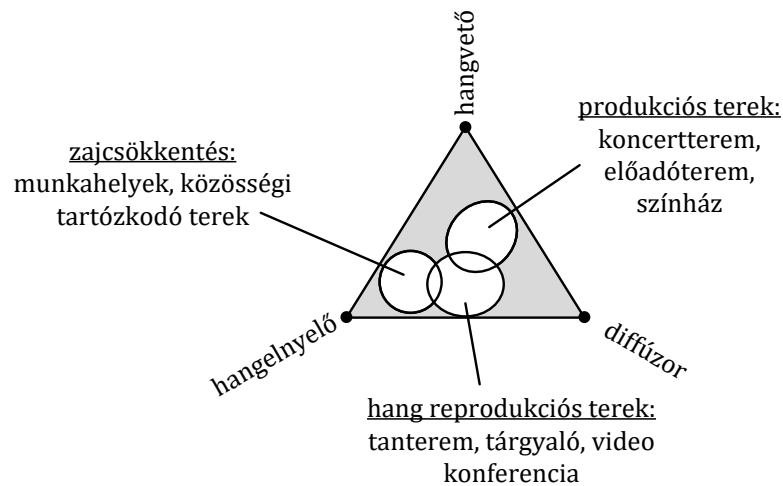


3-18. ábra: A hangelnyelő szerkezetek jellemző felépítése és hangelnyelési karaktere.

Ahol erős visszaverődésre vagy a hangenergia terelésére van szükség, hangvisszaverő felületeket, hangvetőket lehet használni. A hangvetőkre általában jellemző, hogy kevésbé diffúz visszaverődéseket produkálnak és pozíciójukat, helyzetüket geometriai

szerkesztéssel határozzák meg a lehetséges hangforrás és hallgató pozíciók figyelembe vételével.

Szemléletesen a hangvető, hangelnyelő és diffúz visszaverődéseket produkáló felületek szükségességét a 3-19. ábra mutatja.



3-19. ábra: A hangvetők, hangelnyelők és diffúzorok használatának jelentősége különböző méretezési helyzetekben (D'Antonio nyomán).

Az eltérések észlelhetősége

A beavatkozások költséghatékonyságának kifejezésére használható annak vizsgálata, hogy a mérhető (objektív) akusztikai paraméterek milyen számszerű eltéréseit lehet észlelni. Az éppen észlelhető eltérés mértékegysége a JND (just noticeable difference), amit az ISO 3382 szabványsorozat több teremakusztikai paraméter esetében is rögzít:

- utózungési idők esetében 1 JND az utózungési idő 5% eltérésének felel meg;
- erősítést kifejező paraméterek (pl. G) esetében 1 JND a paraméter 1 dB eltérésének felel meg;
- hangtisztaságot kifejező paraméterek (pl. C₅₀) esetében 1 JND a paraméter 1 dB eltérésének felel meg²⁶.

Érdeemes megjegyezni azonban, hogy ezek a szabványban rögzített észlelhető eltérések kisebbek, mint amit a gyakorlatban, különösen a képzetlen hallású alanyok esetében megfigyelhetünk. Az utózungési idő esetében például átlagos alanyok esetében inkább 10...20% körüli eltérés az, ami biztonsággal észlelhető^{27 28}. A beszédérthetőség

²⁶ Az MSZ EN ISO 3382-1:2009 A.1 táblázatában a D₅₀ paraméter szerepel, amire 1 JND eltéréshez a D₅₀ paraméter 0,05 eltérését rögzíti, ez a hasznos és D₅₀ esetében tipikus 0,30...0,80 értéktartományban C₅₀ paraméterre átszámolva kb. 1 dB eltérésnek felel meg.

²⁷ (M. G. Blewins, 2013)

²⁸ (Karjalainen, 2001)

szempontjából pedig a beszédhang-jel és a háttérzaj viszonyában (jel/zaj viszony) a 3 dB eltérés érzékelhető biztonsággal²⁹, ami a beszédátvitelre (STI) közelítő összefüggéssel átszámolva 0,09...0,16 körüli eltérést jelenthet.

A tervezési szempontoknál az érdemi javulást jelentő eltéréseket vizsgálva tehát valószínűsíthető, hogy csak az elméletben észlelhetőnek tekintetnél nagyobb eltéréseket érdemes fokozatokban kifejezni (pl. JMD, just meaningful difference).

3.7. A teremakusztikai ellenőrzés eszközei

A teremakusztikai ellenőrzés megvalósulás előtt számítással lehetséges. Kritikus esetben javasolt többféle számítási módszer vagy akár modellezési (szoftveres vagy fizikai modell) eljárás összehasonlítása, mert ezzel a bizonytalanságok vagy a bizonytalanságok oka felderíthető.

A teremakusztikai ellenőrzés biztos módszere a helyszíni mérés. A hangelnyelési tényező illetve teremakusztikai viszonyok mérését több szabvány tárgyalja vagy érinti:

- MSZ EN ISO 354: Akusztika. A hangelnyelés mérése zengő szobában (ISO 354:2003)
- MSZ EN ISO 10534-2: Akusztika. Hangelnyelési tényező és impedancia meghatározása állóhullámú csőben. 1. rész: Állóhullámarányt alkalmazó módszer (ISO 10534-1:1996)
- MSZ EN ISO 10534-2: Akusztika. Hangelnyelési tényező és impedancia meghatározása állóhullámú csőben. 2. rész: Átviteli függvényt alkalmazó módszer (ISO 10534-2:1998)
- MSZ EN ISO 3382-1: Akusztika. Helyiségek akusztikai jellemzőinek mérése. 1. rész: Előadótermek (ISO 3382-1:2009)
- MSZ EN ISO 3382-2: Akusztika. Helyiségek akusztikai jellemzőinek mérése. 2. rész: Utózengezési idő általános rendeltetésű helyiségekben (ISO 3382-2:2008)
- MSZ EN ISO 3382-3: Akusztika. Helyiségek akusztikai jellemzőinek mérése. 3. rész: Egyterű irodák (ISO 3382-3:2012)

A teremakusztikai mérések főbb típusai:

- kikapcsolt folyamatos zaj utáni lecsengés közvetlen értékelése: amikor egy folyamatos zajt kikapcsolunk, a kikapcsolás után a visszaverődésekből megmaradó lecsengés közvetlenül értékelhető, a zajforrás visszakapcsolásával és kikapcsolásával (kapcsolt zaj) a mérés megismételhető;

²⁹ (W. M. Whitmer, 2016)

- rövid idejű impulzus utáni lecsengés közvetlen értékelése: egy rövid idejű impulzus (pl. taps, koppanás, elpukkasztott lufi, pisztolylövés, szikra) hatására a visszaverődésekből az impulzusválasz nyerhető ki, de a rövid idejű zajhatás általában kis energiája vagy frekvencia-sávkorlátozottsága miatt a mérés pontosságát a mérési körülmények és háttérzajok korlátozhatják;
- impulzusválasz mérése ismert mérőjelből: ha ismert a mérőjel, akkor a mérőjelre adott válaszból a pontos impulzusválasz számítással kinyerhető.

A fenti mérési módszerek közül jelenleg az utóbbi a legegyszerűbb, de egyben a legkörülményesebb is. A gyakorlatban kézi műszerrel kapcsolt zajra vagy rövid idejű impulzusra adott teremválaszból az utózungési idő megbízhatóan számolható. Ha nem csak az utózungési időt kell mérni, a részletesebb számítás vagy speciális mérési elrendezések szükségesek. Előfordul, hogy a beszédérthetőség egyszerűsített számítása (pl. STIPA) közvetlenül mérhető kézi műszerrel is.

A helyszíni méréseket a helyszíni körülmények közül elsősorban a mérés időpontjában meglévő állandó vagy változó háttérzaj befolyásolja. Ha a háttérzaj nem tonális jellegű (nincs határozott hangmagassága) vagy nem ismétlődő (pl. kattogás), akkor a mérések ismétlésével lehet a háttérzajok hatását kiszűrni.

Egyetlen teremakusztikai mérés csak egy hangforrás és egy mikrofon pozíció közötti állapotot jellemez, ezért a helyiség egészének jellemzéséhez a mérést több hangforrás és több mikrofon pozíció esetére is ajánlott elvégezni. A mérések javasolt minimális száma és a javasolt pozíciói a vonatkozó szabványokból olvasható ki. Az eredményekből az átlagos érték, a szórás vagy akár az értékek gyakorisága (valószínűsége) fejezhető ki.

4. A teremakusztikai szempontok a gyakorlatban

Az elméleti bevezetőből látható, hogy a teremakusztikai szempontok és méretezés nem csak az építmények alapvető követelményeire hatnak, hanem az általános minőségérzetet és a helyiségek használhatóságát is befolyásolják. Különösen fontos a megfelelő teremakusztikai hangolás azokban a helyiségekben, amik rendeltetésüknél fogva beszédkommunikációról szólnak.

A teremakusztikai szempontrendszer jelenlegi állapotát tükrözi a kötelező előírások rendszere, ami a magyarországi szabályozási viszonyok között egyelőre csak közvetetten utal arra, hogy a teremakusztikai méretezéssel is foglalkozni kell (ld. 4-1. táblázat).

A nemzetközi példák, évtizedek óta használatban lévő teremakusztikai szabványok tapasztalatai ugyanakkor alátámasztják, hogy akár szabályozási viszonyoktól függetlenül is foglalkozni kell a teremakusztikai méretezéssel, mert a nem megfelelő teremakusztikai viszonyok a helyiségek rendeltetészerű használatát korlátozhatják vagy lehetetlenné tehetik, ráadásul egészségügyi kockázatokat hordoznak.

Különösen az oktatásban van jelentősége a teremakusztikai minőségnek, mert tapasztalatok alapján megfelelő teremakusztikai viszonyok között az oktatók terhelése csökken, a diákok tanulmányi eredményei javulnak, valamint a diákok és oktatók stressz-állapota is javul³⁰, amit akár a pulzusszám csökkenésén is lehet látni³¹.

Irodai, munkahelyi környezetben elsősorban a zajcsökkentés és a munkahelyeket érő zavaró hatások (külső zajok, szomszédos munkahelyek) csökkentése a cél. Tapasztalatok alapján a munkavállalókat érő akusztikai zavaró hatások gyakoribb megbetegedéseket, magasabb stressz-állapotot okoznak, miközben a munkavállalók koncentrációja csökken, a hiba-arány pedig megnő. A gyakorlatban hazai viszonyok között irodaépületeknél gyakran már a megrendelő kéri a teremakusztikai hangolást a korábbi rossz tapasztalatok, az anyavállalat előírásai vagy valamilyen nemzetközi minősítés (pl. BREEAM, LEED) okán.

Ebben a fejezetben a szakmai szempontokat, a nemzetközi trendeket és a hazai építészetben tapasztalt jelenlegi állapotokat mutatjuk be.

³⁰ (D. Channing, 2012)

³¹ (Dolejší, 2016)

rendelet vagy szabvány	épület helyiségeiben						épület szerkezetein		épület helyiségei között		környezetből épületbe		épületből környezetbe				
	teremakusztika lecsengési idő	egyb szempontok	üzemi - HVAC	üzemi - használati	zajszint	szabadidős	közlekedési	rezgésszint		léghang	lépéshang	közlekedési	zajszint	egyéb	üzemi és szabadidős	üzemi és szabadidős	
								padló	szervezet								zajszint
MSZ 2080	X	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
27/2008. KVM- EüM rendelet	-	-	X	X	X	X	X	X	X	-	-	-	-	-	X	X	
MSZ 15601-1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	X	-	-	-	-	-	
MSZ 15601-2	-	-	-	-	-	-	X	X	X	-	-	X	-	-	(X)	-	
MSZ 13018	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
ISO 2603	X	-	X	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-	-	-	-	
ISO 4043	X	-	X	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-	-	-	-	
MSZ EN 15251	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
CR 1752	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
EN60286-16	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
szempontok összefüggései																	
helyiség zajossága	X	-	X	X	X	X	X	X	X	-	X	X	X	X	-	-	-
helyiség belüli hangtisztaság	X	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
helyiség belüli beszédérthetőség	X	X	X	X	X	X	X	X	X	-	-	X	X	X	-	-	-
helyiség zenei minősége	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	-	-	-
helyiség bizalmassága	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	-	-	-
környezetvédelem	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	X	
épületek jellemző szerkezetei																	
homlokzati falak, nyílászárók, zárófödémek	-	-	-	X	X	X	X	X	X	-	-	X	X	X	X	-	-
épületen belüli válaszfalak és nyílászárók (falattörésekkel, szerelvényekkel)	-	-	-	X	(X)	(X)	(X)	(X)	(X)	-	X	(X)	(X)	(X)	(X)	(X)	-
födémek és padlószervezetek	-	-	(X)	X	(X)	(X)	(X)	(X)	(X)	X	(X)	X	-	-	-	-	X
burkolatok, felületképzések	X	X	(X)	(X)	(X)	(X)	(X)	(X)	(X)	-	(X)	(X)	(X)	(X)	-	-	-
tartószerkezet, alapozás, padlószervezetek	-	-	-	(X)	(X)	(X)	(X)	(X)	(X)	X	-	-	-	-	-	-	-
épületgépészet, épületvillamosság	-	-	-	X	(X)	(X)	(X)	(X)	(X)	X	-	-	-	-	X	X	X
hangrendszerek	-	-	-	-	X	(X)	(X)	(X)	(X)	(X)	-	-	(X)	(X)	(X)	(X)	(X)
Megjegyzés:																	
X - közvetlen és elsődleges összefüggés																	
(X) - közvetett, másodlagos vagy más hatásokkal együtt érvényesülő összefüggés																	

4-1. táblázat: Építészeti akusztikai szempontok és rendeletek, szabványok viszonya
(nem teljes körű, csak tájékoztató áttekintés).

4.1. A teremakusztikai méretezés hatásai

A helyiségben tartózkodók nem csak megtapasztalják, hanem folyamatosan alkalmazkodnak is az akusztikai körülményekhez. Ez olyan mindennapi helyzetekben érhető tetten, mint ahogyan az előadó megemeli a hangját és másként hangsúlyozza a hangokat, ha nagyobb az alapzaj, vagy ahogyan a zengőbb étteremben hangosabban beszélgetnek egymással az emberek (Lombard-hatás).

A teremakusztikai szempontból is méretezett helyiségek csendesebbek, komfortosabbak, jobban használhatók, kevésbé stresszes környezetet jelentenek. Számos tanulmány mutatta ki, hogy

- a hallgatóság a jobb teremakusztikai körülmények között jobb beszédérthetőséget tapasztal, jobban tud figyelni az előadásra, kevésbé érvényesülnek a zavaró hatások;
- az előadók kevésbé érzik megerőltetőnek a beszédet, ami annál fontosabb, minél több időt töltenek előadással (pl. tanárok);
- a dolgozók komfortosabbnak érzik a munkakörnyezetet, különösen, ha a helyiségben egyszerre többen is dolgoznak vagy gyakori a beszélgetés, telefonálás.

A teremakusztikai minőség tehát lényegesen befolyásolja a koncentráció, a pihenés, a produktivitás és az egészségmegőrzés esélyeit. A teremakusztikai méretezésnek életvédelmi célja csak olyan szituációkban van, ahol veszélyes üzem mellett a beszédkommunikációra kell támaszkodni. Kiürítési útvonalakon előírt vészhangrendszer méretezésénél például igazolni kell a megfelelő beszédérthetőséget, ami sok esetben csak teremakusztikai beavatkozással érhető el, csupán elektroakusztikai (hangrendszer) megoldásokkal nem.

A teremakusztikai méretezés a helyiségek méretére és alakjára is hatással lehet, de általában a helyiség alaprajzát a használhatóság, a helyiség belmagasságát egyéb szabályozások vagy körülmények (adottság, OTÉK előírásai, stb.) határozzák meg, a leggyakoribb szituációkban a teremakusztikai méretezésnek ezekhez kell alkalmazkodni.

A teremakusztikai méretezés eredményeként megjelenhetnek

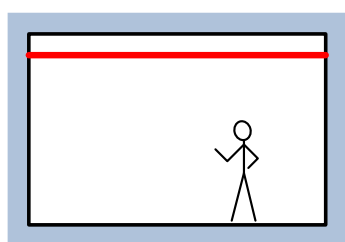
- hangelnyelő burkolatok;
- emelvények;
- hangelnyelő vagy hangárnyékoló hatású mobiliák;
- terem alakra vagy méretre vonatkozó előírások.

Ha a teremakusztikai beavatkozások költségeit nézzük, csak a burkolatok megléte képviselhet számottevő költségtöbbletet a teremakusztikai szempontból kezeletlen helyiségekhez képest. A burkolatok mennyisége és minősége műszaki értelemben teremakusztikai méretezési feladat, amit gyakran más szakágai műszaki vagy esztétikai szempontjai írnak felül. A hangelnyelő burkolatok kiválasztásánál a nem akusztikai szempontok között előfordulhatnak az alábbiak:

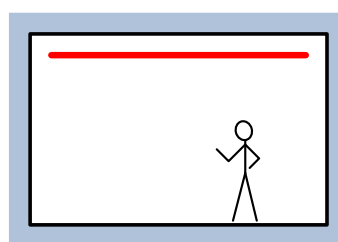
- látszó felületi megjelenés
A látszó felületi megjelenés építészeti és belsőépítészeti kérdés, az esztétikai igény pedig talán a költséget leginkább befolyásoló szempont.
- mechanikai állékonyság:
A pórusos anyagok gyakran sérülékenyebb felülettel rendelkeznek, ez alól talán csak a cementkötésű fagyapot és a préselt fémforgácsból készült lapok kivételek. A pórusos anyagok elé mechanikai állékonyság javítása érdekében ezért hangáteresztő felületeket (pl. >70% perforált fémlemez vagy expandált fémlemez, feszített fémhálót) lehet tenni. Ha az építészeti koncepció támogatja, a pórusos anyagok elé nagyobb mértékben áttört fém vagy fa rács helyezhető (pl. optikai mennyezetek). Ritkább, de létezik keményített üveggapot lemez, ami akár labdaállósági elvárásoknak is megfelel, miközben a látszó felület egy szövet kasírozás.
A perforált szerkezetek és a membránok felépítésüknél fogva kevésbé sérülékenyek.
- tűzvédelem
A hangelnyelő szerkezetek és anyagok többsége nem éghető vagy nehezen éghető. Természetesen, ha esztétikai szempontok miatt fa alapanyagok is szerepelnek a szerkezetben, körültekintőbben kell választani. A mennyezetre szánt szerkezetek többsége tűzvédelmi szempontok szerint minősített szerkezet.
- áttörtség (gépészet)
Gyakran előfordul, hogy a gépészet építészeti okokból nem látszó szerelvényekkel kénytelen számolni. Az áttört felületek, perforált szerkezetek elszívásra és elárasztásos befúvásra alkalmasak lehetnek.
- javíthatóság
Elsősorban az üzemeltetés szempontjából kedvezőbb a bontható, roncsolás nélkül szerelhető megoldások választása. A moduláris szerkezetek előnye az is, hogy sérülés esetén elég a modul (pl. álmennyezeti elem) cseréje, ami általában nem igényel különösebb szakértelmet.
- szerkezeti vastagság
A szerkezeti vastagság a kisfrekvenciás (mély hang) hangelnyelő képességgel függ össze leginkább. A felületre ragasztott vékony burkolatokhoz képest a

légréssel szerelt ugyanolyan burkolat minimális költségtöbbséggel lényegesen hatékonyabb megoldást jelent.

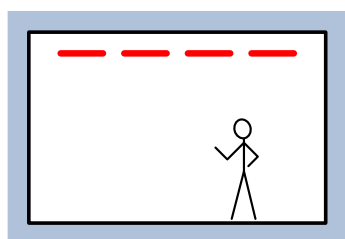
Előfordulhat ugyanakkor, hogy a szerkezeti öszvastagságot korlátozza más szempont. Például ha a helyiség előírt belmagassága 3,0 m, egy faltól falig épített álmennyezet utólagos beépítése már nem magától értetődő. Ilyenkor érdemes megfontolni azokat a megoldásokat, amik a szerkezeti belmagasságot nem csökkentik, de hatásos hangelnyelő felületet képeznek (pl. baffle, cloud, canopy, ld. 4-1. ábra).



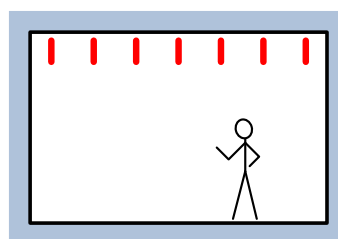
faltól falig álmennyezet



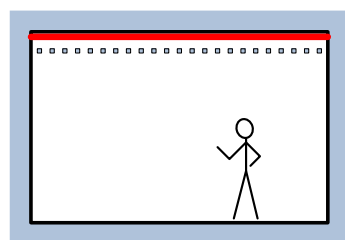
átszellőztetett álmennyezet



álmennyezeti szigetek
(island, cloud, canopy)



hangelnyelő lamellák
(baffle)



optikai álmennyezet

4-1. ábra: Mennyezeti hangelnyelő szerkezeti koncepciók.

4.2. A hazai szabályozás helyzete

A segédlet írásakor nincs olyan rendelet vagy szabvány, ami alapján a teremakusztikai méretezés kötelező volna. A teremakusztikai követelményekről szóló szabvány viszont előkészületben van.

Az épületen belüli hangszigetelési követelményekről szóló MSZ 15601-1 szabvány a léghanggátlásra R_w+C (laboratóriumi) és R'_w+C (helyszíni) mértékeket alkalmaz, amik a teremakusztikai hatástól függetlenül csak a határoló szerkezeteket jellemzik. A lépéshangszigetelés követelményére alkalmazott L'_{nw} mérték viszont a vevő helyiség teremakusztikai minőségétől is függ, tehát a teremakusztikai adottságokat itt figyelembe kell venni.

A teremakusztikai hatásokat a zajvédelmi számításoknál is figyelembe kell venni, mert gyakran a zajszint-követelmények (pl. szabadidős és üzemi zajra 27/2008. rendelet, közlekedési zajra MSZ 15601-2:2000 szabvány, gépészeti zajra MSZ EN 15251 szabvány) teremakusztikai beavatkozás nélkül nem is volnának tarthatók.

4.3. Szakmai ajánlások

Tantermek

A szakmai ajánlások szempontjából a legtöbbet és legrészletesebben tárgyalt szituáció a tantermi és előadótermi teremakusztikai minőség.

A tantermek teremakusztikai minőségét a szakirodalmak többsége a hallgatók szempontjából vizsgálja és az alábbi megállapításokra jut:

- A rövidebb utózungési idő kedvezőbb, mert a beszédérthetőség feltételei javulnak és csökken a külső forrásból bejutó és a helyiségben keletkező zajszint egyaránt.
- A túl rövid utózungési idő már előnytelen, mert az előadó hangereje (a terem támogatása) csökken.

A teremakusztikai minőségtől függetlenül fontos megállapítás^{32,33}, hogy a tantermek zajossága jellemzőbb probléma, mint a teremakusztika (hangtisztaság, beszédérthetőség), még ha a kettő össze is függ. A zajosság és a teremakusztika összefüggése összetett:

- a külső zajokat a teremakusztikai hatások felerősítik;
- a beszédértést zavaró hatásokat a beszélő ösztönösen a hangképzés alakításával és hangosabb beszéddel korrigálja (Lombard hatás), ezért hangosabban beszél az előadó és pl. csoportmunka esetén a diákok is.

³² (B. Rasmussen, 2012)

³³ (Bradley, 2009)

A fenti összefüggések eredményeként a környezeti zajok és a tantermen belüli zajok (pl. projektor zaja) magasabb tevékenységi zajokat és ebből fakadóan hangosabb beszédhangokat okoznak.

Elméleti számítások ³⁴ alapján ismert, hogy a hangtisztaság érdekében szükség van korai visszaverődésekre és a teremhang támogató hatására, így a legjobb beszédérthetőség 0,6...0,7 s utózungési idő esetén érhető el. Ha azonban azt is figyelembe vesszük, hogy feltehetően kisgyermekes esetén a beszéd hangtisztasághoz tartozó korai-késői időkorlát nem 50 ms, hanem annál kisebb (pl. 35 ms), e szempontok alapján a valamivel rövidebb (kb. 0,7×) utózungési idő is indokolt lehet.

Ha a tantermek teremakusztikai komfortját az előadó szempontjából is vizsgáljuk, közel hasonló eredményre lehet jutni. Az előadó szempontjából ³⁵ szerint mérvadó paraméterek az előadó saját fülénél mérhető utózungési idő (ami rövidebb, mint a teremben mérhető átlagos utózungési idő) és az abból származtatható hangtisztaság, valamint a beszédhangképzésre szánt erőfeszítés („vocal effort”) és a terem hangosító hatása („room gain”). A nagyobb utózungési idő általánosságban nagyobb teremhang-erősítést jelent, de egyben magasabb zajt és a hallgatók által keltett zajok is emelkednek. A rövidebb lecsengés ugyanakkor csökkenti a zajt és javítja a hangtisztaságot, de nagyobb erőfeszítést igényel az előadótól. Felmérések ³⁶ szerint a fülénél kb. 0,5 s utózungési idő biztosítja az előadó számára az optimumot.

A fenti ellentétes hatások lényegében egy optimumnak tekinthető tartományt jelölnek ki. A 4-2. ábrából leolvasható eredmények szerint:

- kb. 10 fő hallgató esetén 70...180 m³ térfogat és <0,50...0,65 s utózungési idő;
- kb. 20 fő hallgató esetén 120...200 m³ térfogat és <0,55...0,70 s utózungési idő;
- kb. 40 fő hallgató esetén 210 m³ körüli térfogat és <0,65...0,75 s utózungési idő.

tekinthetők optimális tartományoknak.

A 40 fő esetén számolt optimális tartomány is már nagyon kicsi, ezért tulajdonképpen a 40 főnél több hallgatót befogadó termekben a beszédérthetőségi elvárások és hangtisztaság szempontjából hangosítás telepítése ajánlott.

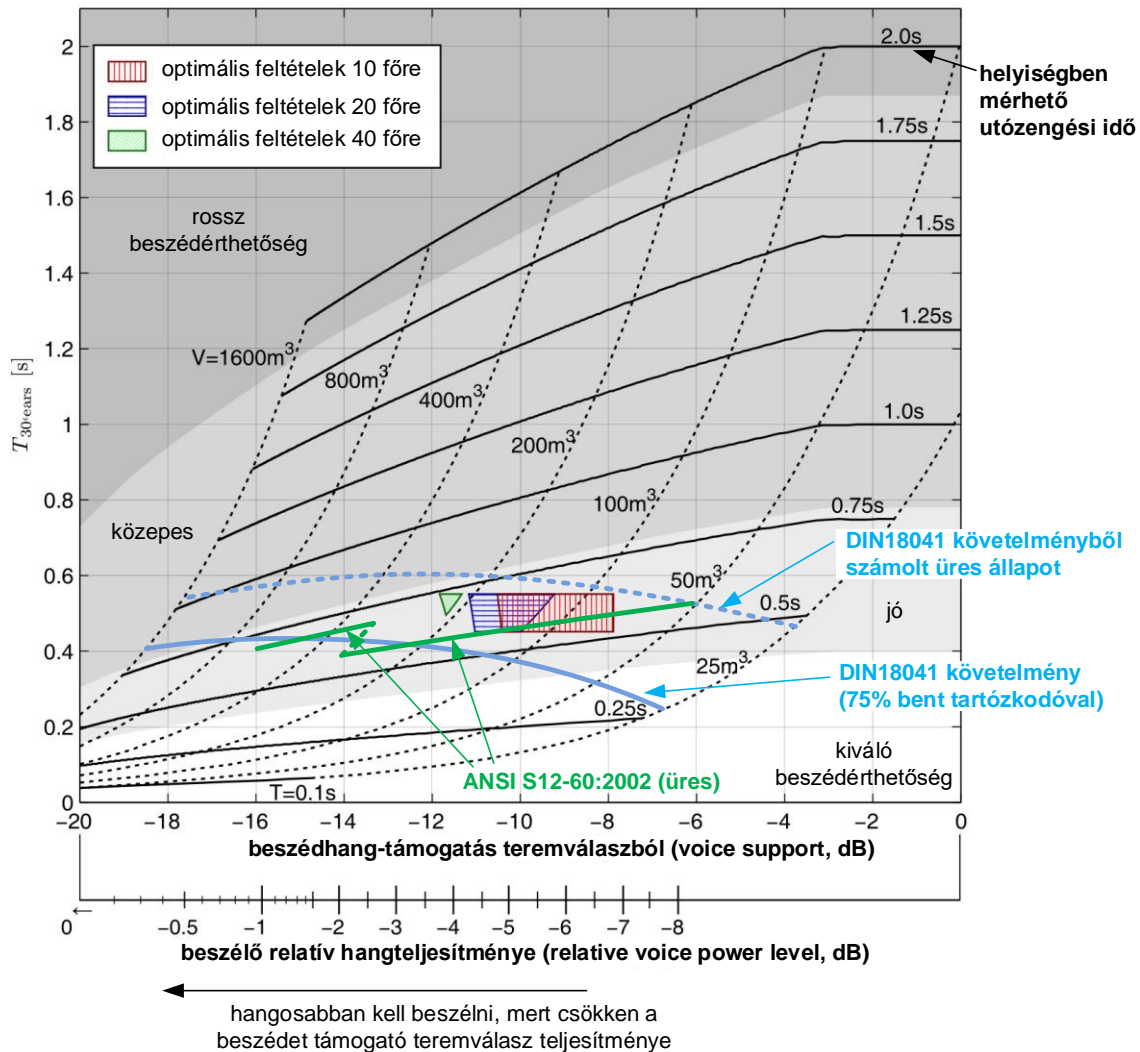
³⁴ (W. Yang, 2009.)

³⁵ (Pelegriń-García, 2011)

³⁶ (D. Pelegriń-García, 2014); a $D_{T40,ME}$ előadó fülénél mérhető utózungési idő optimuma a felmérés értékelése szerinti 0,45 s helyett az adatok alapján helyesbített regresszió szerint 0,50 s.

A fenti adatok természetesen normál üzemi állapotban, azaz bent tartózkodókkal, berendezett állapotokban érvényesek. Az üres, bent tartózkodók nélküli állapotban ezért várhatóan valamivel hosszabb utózengés is megengedhető.

A fentiekkel összhangban a helyiségek akusztikai viszonyai és a beszéd felismerés közötti összefüggést vizsgáló tanulmányok (pl. ³⁷) is azt sejtetik, hogy míg az utózengési idő fokozatos csökkentése 0,8 s alatt már nehezen kimutatható előnyt jelent, addig a háttérzaj további csökkentése tudja érdemben javítani az eredményeket.



4-2. ábra: Az optimális akusztikai feltételek összesítése az utózengési idő, a helyiség térfogata és a hallgatók száma alapján (Pelegrin-García).

Hasonló okokból, míg a hagyományos frontális előadókban 30...40 fő esetén a teremakusztikai hangolás tud segíteni, addig nagyobb odafigyelést igénylő foglalkozásoknál (pl. nyelvoktatás, sajátos nevelési igényű gyermekek) akusztikai

³⁷ (Wang, 2015)

okokból is ajánlott kisebb helyiségekben a kisebb csoportlétszámra törekedni. A „közös légterű” (open plan) foglalkoztatók kialakítása akusztikai szempontból nem ajánlott.

Irodák

Irodai környezetben az egyéni munkavégzést zavaró tényezők csillapítása, kooperatív terekben pedig a beszédkommunikáció támogatása a cél.

Általánosságban feladat a zajcsökkentés, mert a zajosság az irodai dolgozók munkakörülményeit vizsgáló tanulmányok között az elégedetlenség okaként rendszeresen az elsők között szerepel³⁸ (az asztal és a szék kényelmetlensége mellett). A zajosság összetevői közül is elsősorban a többi munkatárs munkavégzésével járó hangok és a beszéd jelent zavaró hatást. Ennek az az oka, hogy a hallás mechanizmusa akkor is az összefüggéseket keresi a zajban, ha arra egyébként nem szeretnénk figyelni.

A cellás irodahelyiségek esetében feltételezhető, hogy a helyiségben kevesen tartózkodnak és a zajcsökkentés érdekében alkalmazott hangelnyelés elégséges beavatkozás.

A tárgyalók és lényegében előadótermek esetében is a tantermekhez hasonló szempontokat kell érvényesíteni.

Irodaépületek esetében a szakirodalomban legtöbbször tárgyalt szituáció az egylégterű iroda („open plan office”). Az egylégterű irodákat például az MSZ 15601-1:2007 is úgy különbözteti meg, mint az „irodahelyiség, amelyben 5 személynél többen dolgoznak”.

Az egylégterű irodák esetét külön tárgyalja az MSZ EN ISO 3382-3 szabvány, amiben speciálisan a zavaró hatásokat kifejező paraméterek is szerepelnek (ld. 4-2. táblázat):

- $L_{p,S,4m}$: szabványos emberi beszéd hangnyomásszint 4 m távolságban, A-súlyozással (a hangforrás a szabványban megadott frekvenciafüggés szerint, $L_{w,A}$ 68,4 dB hangteljesítményű gömbi hangsugárzó).
- D_{2S} : hangnyomásszint-csökkenés a távolság kétszerese esetén (az A-súlyozott hangnyomásszint távolságfüggéséből számolt paraméter);
- r_D : zavarási távolság (az a szabványos emberi beszédhangforrástól mért távolság, ahol $STI < 0,50$);
- r_P : bizalmassági távolság (az a szabványos emberi beszédhangforrástól mért távolság, ahol $STI < 0,20$).

³⁸ (Leesman, 2016)

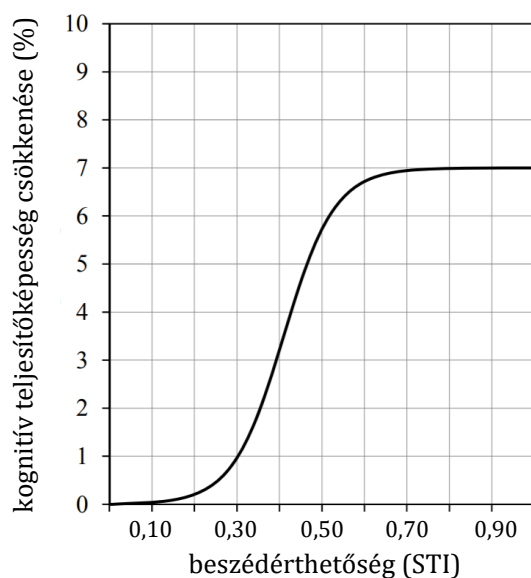
A paraméterek azt a megfigyelést fejezik ki, hogy a koncentráció képessége csökken, ha a többi munkahelyi felől jó a beszédérthetőség (ld. 4-3. ábra). A különböző kategóriákat és a hozzájuk tartozó jellemző paraméter-tartományokat a 4-2. táblázat foglalja össze.

kategória	MSZ EN ISO 3382-3		
	r_D	D_{2S}	$L_{p,S,4m}$
A	<5	>11	<48
B	5...8	9...11	48...51
C	8...11	7...9	51...54
D	11...15	5...7	>54
E	>15	<5	-

4-2. táblázat: Az egylégterű irodahelyiségekre vonatkozó akusztikai paraméterek jellemző tartományai és kategóriái (MSZ EN ISO 3382-3:2012).

Az egylégterű irodákban ezért az alábbi beavatkozásokkal érdemes számolni:

- hangelnyelés növelése a hangterjedés csillapítása érdekében (elsősorban mennyezet);
- munkahely-csoportok között hangárnyékoló minőségű magas bútorok (pl. polcok, paravánok) csillapítják az áthallást;
- munkahelyek között hangárnyékoló minőségű bútorok (pl. asztali paraván) csillapítják az áthallást;
- a háttérzajszint akár mesterséges és szabályozott emelése (határértéken belül), amivel a zavaró távolabbi beszédhang elfedhető.



4-3. ábra: A beszédátvitel és a beszéd zavaró hatásának összefüggése (Hongisto³⁹).

³⁹ (Hongisto, 2005)

Az újabban előforduló iroda helyiségtípusokra (pl. telefonáló fülke, videokonferencia helyiség) egyedi ajánlásokat lehet csak találni, de általánosságban a fokozottabb hangelnyelés, mennyezeten felül oldalfali hangelnyelő burkolatok, telekonferencia helyiségben pedig frekvenciafüggő tolerancia alkalmazása ajánlott.

4.4. A nemzetközi gyakorlat

Tantermek

A már létező nemzeti szabványok változatos követelmény-értékeket, alkalmanként frekvenciafüggő toleranciákat alkalmaznak (ld. 4-3. táblázat). Ritkán előfordul a beszédátviteli index is, mint követelmény. Általában a követelmények berendezett, de bent tartózkodók nélküli állapotra vonatkoznak.

Előfordul, hogy a követelmény alkalmazásánál csak a beépített bútorokat lehet figyelembe venni (ld. Finnország), vagy hogy a követelmény 75%-ban telt (bent tartózkodókkal számolt) állapotra vonatkozik (ld. Németország).

A követelmények általában térfogat-tartományokon belül állandók, de előfordul csak térfogattól függő követelmény is (pl. DIN, ÖNORM). A követelmények általában maximumot írnak elő és csak néhány esetben (pl. DIN és Decree 1995) ad meg a szabvány minimumot.

Az észak-európai országokban az energiahatékonysághoz hasonlóan a szabványok betűvel jelzett minőségi osztályokat is definiálnak, követve a helyi építési szabályozási rendszert.

Speciális tantermek (pl. zenei tantermek, nyelvi tantermek) esetén szigorúbb vagy jobban részletezett követelmények is előfordulnak.

ország	dokumentum	követelmény		megjegyzés
		lecsengési idő (s)	beszédérthetőség	
Franciaország	Decree 1995	0,4...0,8	-	-
Hollandia	Guidelines NEN5077	0,8	-	-
Svédország	Standard SS025268	$T_{m4} \leq 0,5 \dots 0,6$	-	Frekvenciasávonként max. 0,1s , 125Hz-en max. 0,2s túllépés megengedett.
Norvégia	Standard NS8175	0,6	-	-
Portugália	NBR 12179, 1992	0,6...0,8s (250...4000Hz); 1,0s (125...250Hz)	-	-
USA	Standard ANSI S.12.60	$T_{m3} < 0,6$ (<283m ³) $T_{m3} < 0,7$ (283...566m ³)	-	-
Anglia	Guidelines BB93	$T_{m3} < 0,6$ általános iskola, bölcsőde	-	A követelmény berendezetlen helyiségre vonatkozik.
		$T_{m3} < 0,8$ középiskola		
		$T_{m3} < 0,4$ hallássérültek, beszédterápia		
		$T_{m3} < 0,8$, kis előadó (<50 fő) $T_{m3} < 1,0$, nagy előadó (>50 fő)		
		$T_{m3} < 0,8$ egylégtérű tanuló	STI $\geq 0,60$	A követelmény berendezett helyiségre vonatkozik.
Ausztrália és Új-Zéland	Standard AS/NZS2107	$T_{m3} < 0,4 \dots 0,5$	-	-
Finnország	Standard SFS 5907:en	0,6...0,8 (250...4000Hz, +50% 125Hz)	Class A és B: STI $\geq 0,80$, Class C STI $\geq 0,70$	A követelmény maximális érték bármely frekvencián.
Németország	DIN 18041:2016	frontális tanterem (A3, 30...1000m ³): $T_{m2} = 0,32 \cdot \lg(V) - 0,17$ kooperatív tanterem (A4, 30...500m ³): $T_{m2} = 0,26 \cdot \lg(V) - 0,14$	-	A követelmény térfogatfüggő "céltérték", 75% bent ülő hatásával értendő, frekvenciafüggő tolerancia.
Lengyelország	Polska Norma PN-B-02151:2015	$T_{m3} < 0,6$ (<250m ³) $T_{m3} < 0,8$ (250...500m ³) $T_{m3} < 1,0$ (500...2000m ³)	STI $\geq 0,60$	-
-	BREEAM Hea05	ld. BB93	-	A követelmény berendezetlen helyiségre vonatkozik.
-	2015 LEED v4	$T_{m3} < 0,6$	-	-

megjegyzés:
- T_{m2} (500Hz és 1kHz), T_{m3} (500Hz, 1kHz és 2kHz), T_{m4} (250Hz, 500Hz, 1kHz és 2kHz) lecsengési idők számtani átlaga.
- csak tájékoztató áttekintés, konkrét követelményekről és részletekről a hivatkozott dokumentumból lehet tájékozódni.

4-3. táblázat: Tájékoztató áttekintés a tantermek teremakusztikai követelményeiről szóló nemzeti szabványokról és követelményekről.⁴⁰

Irodaépületek

Az irodaépületekre vagy más épülettípusok irodai helyiségeire vonatkozó követelmények is változatosak (ld. 4-4. táblázat). Általánosságban a tárgyalók és kisebb előadóterek esetében a tantermekéhez hasonló követelmény- és szempontrendszerek fordulnak elő, míg egylégtérű irodákban vagy nagyon erős hangcsillapítás vagy az ISO 3382-3 szabvány iránymutatásai vannak előírva.

Az egylégtérű irodákban a zavaró hatás számításánál (STI, vagy ISO 3382-3 szerinti r_D , r_P paraméterek) az akár mesterségesen is keltett háttérzaj szintjét is figyelembe kell venni. A maszkoló hatásnál figyelembe vehető zaj szintje természetesen nem lehet nagyobb, mint a vonatkozó határérték, ami jellemzően legfeljebb 40...45 dB L_{Aeq} .

⁴⁰ (W. Mikulski, 2011)

dokumentum	helyiségtípus	követelmény	megjegyzés
LEED	cellás iroda, telekonferencia helyiség, konferenciaterem	$T_{m3} < 0,6$	-
	egylégterű iroda maszkoló hangrendszer nélkül	$T_{m3} < 0,8$	-
	egylégterű iroda maszkoló hangrendszerrel	$T_{m3} = 0,8$	-
BREEAM és BB93	beszédcélú előadó	$T_{500\text{Hz}} < 0,37 \cdot \lg(V) - 0,22$	közelítő képlet, $V = 50 \dots 2000 \text{m}^3$
	video konferencia helyiség	$T_{m3} < 0,8$	oktatási létesítményekre
	iroda és tartózkodó	$T_{m3} < 1,0$	
SS02 52 68:2012	egylégterű iroda	$< 0,4$ (A, B, C, D)	Irodépületekre, berendezett állapotra. A követelmény 250Hz, 500Hz, 1kHz, 2kHz és 4kHz sávok mindegyikére értendő, a 125Hz sávban +20%-al lehet hosszabb a lecsengés.
	étkező, előtér, recepció, rendezvényterem, tartózkodó	$< 0,5$ (A, B), $< 0,6$ (C), $< 0,7$ (D)	
	iroda, kis konferenciaterem, pihenő, folyosó	$< 0,6$ (A, B), $< 0,8$ (C), $< 1,0$ (D)	
	tanári, tartózkodó	$< 0,5$ (A), $< 0,6$ (B, C), $< 0,8$ (D)	Oktatási épületre, berendezett állapotra. Értelmezés ld. fent.
	iroda, pihenő	$< 0,6$ (A), $< 0,8$ (B, C)	
WELL v1	egylégterű iroda	$< 0,5$	-
	konferenciaterem	$< 0,6$	
SFS5907:en	egylégterű iroda	$< 0,35 \dots 0,60$ ($h \leq 3\text{m}$) $< 0,40 \dots 0,60$ ($h > 3\text{m}$)	A (szigorúbb), B, C és D (enyhébb) kategóriák. A követelmény 250Hz, 500Hz, 1kHz, 2kHz és 4kHz sávok mindegyikére értendő legfeljebb 0,1s eltéréssel, 125Hz-en legfeljebb 0,3s eltéréssel.
	önálló irodahelyiség, konferen	$< 0,50 \dots 0,90$	
	video konferencia helyiség	$< 0,40 \dots 0,70$	
	kis előadó (max. 200m^3)	$< 0,60 \dots 0,90$	
	étkező, étterem	$< 0,70 \dots 1,00$	

4-4. táblázat: Tájékoztató áttekintés irodai helyiségek teremakusztikai követelményeiről szóló nemzeti szabványokról és követelményekről.

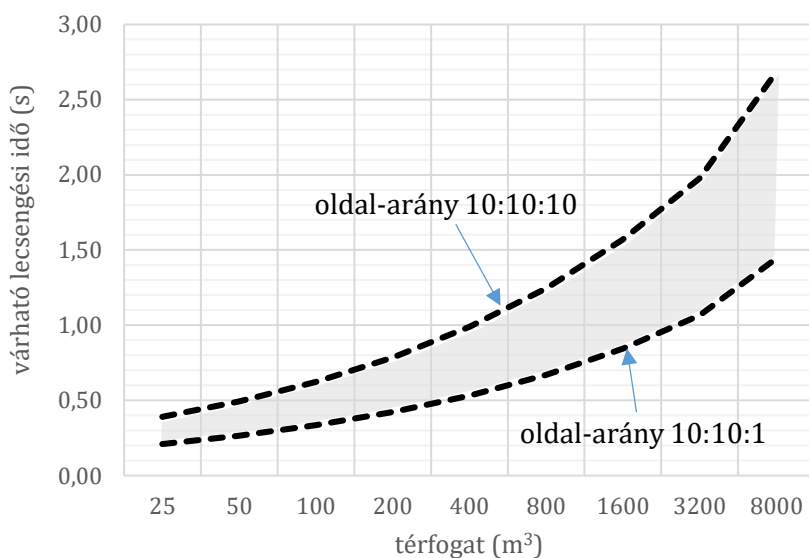
Általános előírások

Ahol nem a beszédérthetőség javítása vagy a beszédérthetőség rontása a cél, a teremakusztikai beavatkozás célja a zajcsökkentés lehet. Erre mutat példát az ÖNORM B 8115-3 szabvány (ld. 4-5. táblázat). A szabvány nem az utózengési időt, hanem az átlagosan beépítendő hangelnyelést írja elő külön a határoló felületekre épített hangelnyelésre és külön a berendezett állapotra vonatkozó hangelnyelésre számítva. Érdekeség, hogy a szabvány újabb kiadása valamivel enyhébb követelményt ír elő, mondván a 125 Hz-re vonatkozó előírás a tapasztalatok alapján indokolatlan költségtöbbletet jelentett.

Természetesen ez az előírás az utózengési időre is ad közvetett előírást, ami a Sabine-képlet alkalmazásának feltételei esetén a 4-4. ábra szerinti tartományt jelent.

követelmény		frekvencia (oktávsáv, Hz)					
B 8115-3	kiadás	125	250	500	1000	2000	4000
$\alpha_{\text{berendezett}}$	1996	0,30	0,30	0,35	0,35	0,35	0,35
	2005	-	0,25	0,30	0,30	0,30	0,30
$\alpha_{\text{határolások}}$	1996	0,20	0,20	0,25	0,25	0,25	0,25
	2005	-	0,20	0,25	0,25	0,25	0,20

4-5. táblázat: A zajcsökkentés céljára előírt minimális hangelnyelés (ÖNORM B 8115-3).



4-4. ábra: A Sabine-képlettel számolt utózengési idő, ha az átlagos elnyelés $\alpha_{\text{átlag}}=0,20$.

Jellemző, hogy zajcsökkentési céllal a közlekedők, lépcsőházak hangelnyelése vagy néha lecsengési ideje is követelményként szerepel.

4.5. A teremakusztikai paraméterek közötti összefüggések

Számos publikáció vizsgálta, hogy mik azok a paraméterek, amik az elvárható teremakusztikai minőséget már jól körülírják.

Ha a leggyakoribb helyiség-rendeltetéseket tekintjük, a különböző szabványokban és ajánlásokban jellemzően az alábbi paraméterek fordulnak elő:

- utózengési idő: T
- egyenértékű hangelnyelési felület: A
- beszédátvitel: STI
- hangtisztaság: C_{50}
- teremakusztikai erősítés: G
- zavarási távolság és diszkréciós távolság: r_D, r_P
- hangnyomásszint távolságfüggése: $D_{2,s}$

Az elméleti összefoglalóban szó esett arról, hogy a paraméterek egy része nem csak teremakusztikai jellemző (pl. STI, r_D, r_P) illetve hogy a paramétereket elméleti vagy tapasztalati összefüggésekkel más paraméterekből számítással lehet közelíteni.

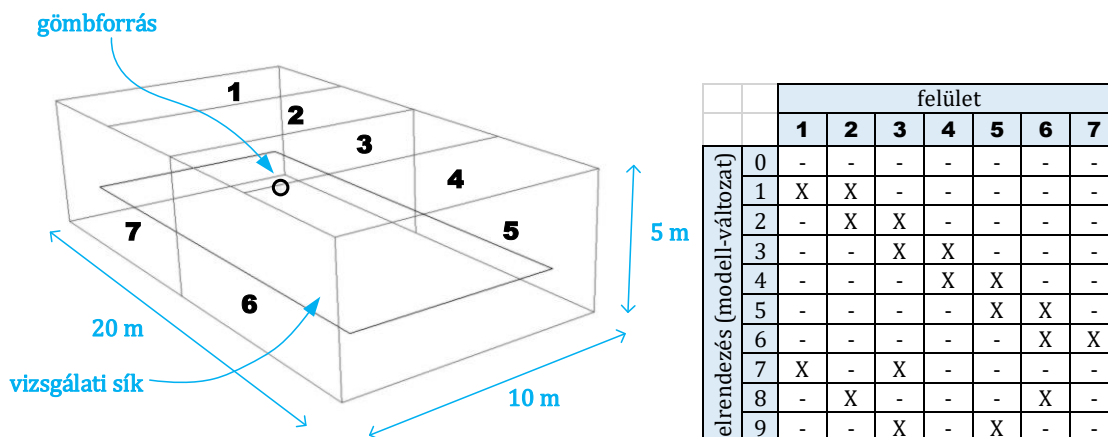
Az elméleti összefüggések gyakori korlátja, hogy diffúz hangteret feltételeznek. Ezért számos publikáció szól arról, hogy a mért utózengési idő milyen mértékben tér el az elméleti számításoktól és hogy az elméleti összefüggésekhez képest az utózengési idő mennyire nem jól jellemzi a többi paramétert.

A gyakorlatban ezért fontos kérdés annak vizsgálata, hogy szélsőséges esetekben a paraméterek milyen módon függenek egymástól.

A 4-5. ábra egy elméleti kísérletet mutat. Egy $20 \times 10 \times 5$ m méretű helyiség falait és mennyezetét 5×10 m méretű felületekre osztjuk és az összesen 14 db felületből mindig csak 2 db felületre helyezünk nagy hangelnyelést, a többi felületet visszaverőnek hagyjuk. Az elrendezés geometriáját és a vizsgált hangelnyelő burkolati elrendezéseket a 4-5. ábra szemlélteti. A számításokat minden változatra 0,05, 0,10 és 0,20 általános felületi diffuzitási tényező mellett is elvégezve az alábbi eredmények adódtak:

- a Sabine-féle utózengési időhöz képest a tényleges utózengési idő (T) jelentősen eltérhet (akár kétszeres is lehet), ha a diffuzitási tényező 0,20-nél kisebb;
- a teremakusztikai erősítés (G) a diffuzitási tényezőtől és az elrendezéstől nem függ, a számítások szerint csak a felületek összes hangelnyelésétől (A) függ;

- a beszédátviteli tényező (STI) a diffuzitási tényezőtől és az elrendezéstől kevésbé függ, a számítások szerint elsősorban a felületek összes hangelnyelésétől (A) függ;
- a beszédhangtisztaság (C_{50}) a diffuzitási tényezőtől kevésbé függ, a számítások szerint kisebb mértékben az elrendezéstől és elsősorban a felületek összes hangelnyelésétől (A) függ;
- az utózengési időhöz (T_{20}) képest az STI, G és C_{50} paraméterekkel sokkal jobban összefügg a korai lecsengési idő (EDT_{10}), egyben kevésbé függ az elrendezéstől és a diffuzitástól is;
- ha a 0,20 vagy nagyobb diffuzitás nem biztosítható, a legkisebb T értéket és a legnagyobb STI értéket, egyúttal a legkevésbé diffuzitás-függő eredményeket azok az elrendezések biztosítják, ahol a hangelnyelés egynél több felületen (pl. fal és mennyezet) kap helyet (4, 5, 6 elrendezés).



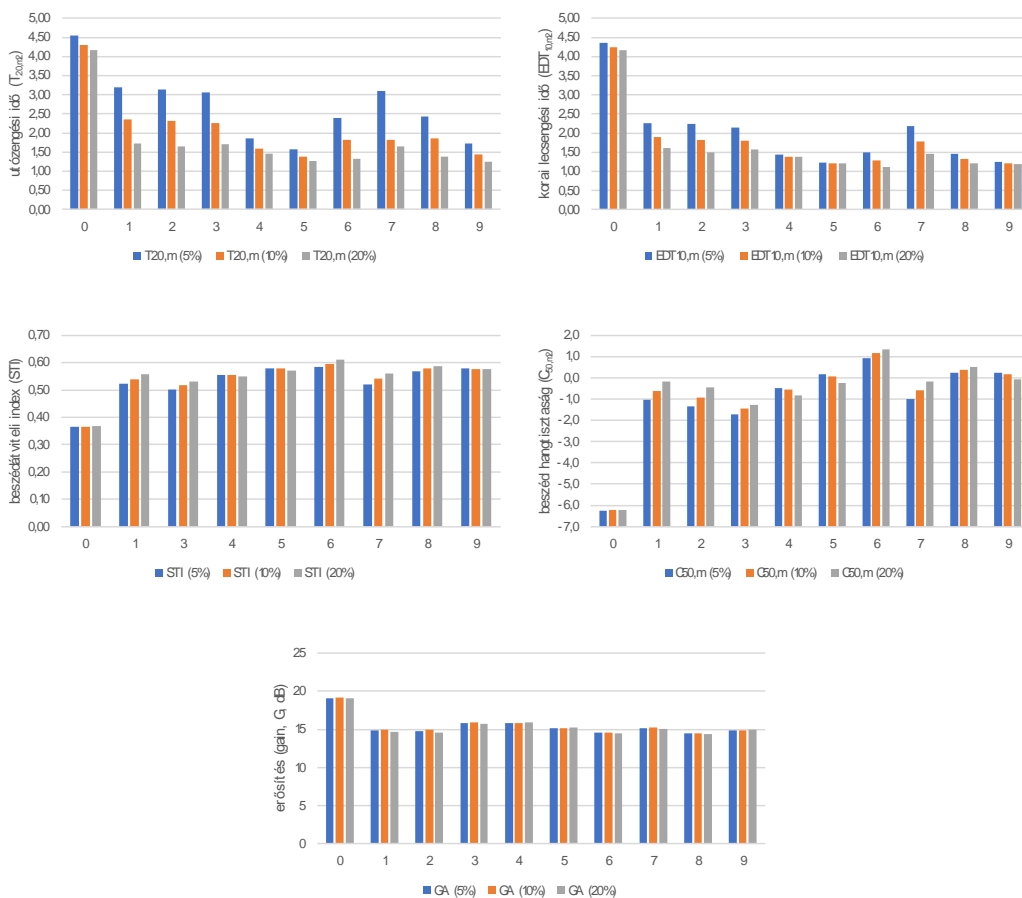
4-5. ábra: Az akusztikai paraméterek közötti összefüggések vizsgálatához használt modell geometriája és a különböző elrendezések azonosítása.

Az eredményekből sejthető, hogy a hangtisztaság és a helyiség teremakusztikai erősítése elsősorban a beépített hangelnyeléstől (A) függ és nem az utózengési időtől (T). A megállapítás természetesen csak arra azokra az esetekre érvényes, amikor a helyiség térfogata egybefüggő és a beépített hangelnyelés teljes felülete látszik a hangforrás felől, valamint a visszaverődések közötti szabad úthosszak nem túl nagyok⁴¹.

Az eredmények ugyanakkor arra is felhívják a figyelmet, hogy a Sabine-képlettel számolt utózengési idő a várható utózengési időre nézve alsó becslést ad, illetve hogy a jobb teremakusztikai hangtisztaság érdekében is javasolt a diffuzitást növelő

⁴¹ Ha 50 ms-on belül biztosan várunk minden irányból visszaverődést, akkor lehet azt mondani, hogy a közepes szabad úthossz ne legyen nagyobb, mint 25 ms azaz 343 m/s hangterjedési sebességet feltételezve 8,6 m. A 8,6 m-nél rövidebb szabad úthosszak a 3000 m³-nél kisebb térfogatú egybefüggő terekre jellemzők.

beavatkozások alkalmazása, ennek hiányában pedig javasolt a csak egy felületre koncentrált hangelnyelést képviselő elrendezések elkerülése.



4-6. ábra: A vizsgált akusztikai paraméterek alakulása a különböző elrendezéseknél és diffuzitási tényezőknél.

4.6. A tervezési segédletben felhasznált mérési eredményekről

A tervezési segédlet egyik célja az volt, hogy a vizsgált helyiségtípusokra jellemző hazai állapotokat elemezze és az eredmények alapján ne csak az új építésű helyiségekre, hanem a meglévő állapotok javítására is adjon javaslatot.

Az akusztikai minőséget a szabványok és ajánlások általában az utózenngési idő (T) és a beszédátviteli index paraméterekkel (STI) határozzák meg. A mérési eredmények gyűjtése egyúttal arra is lehetőséget ad, hogy az eredményeket a szakmai ajánlásokkal és már létező szabványok követelményeivel is összehasonlítsuk és e két paraméter összefüggéseit keressük.

A segédlet a mérési eredményeket tételesen nem mutatja be, de a mérési eredmények forrásairól és körülményeiről az alábbiakat érdemes kiemelni:

- a mérési eredmények több, egymástól független szakértőtől származnak;
- a mérési eredmények többféle mérési módszerből származnak (utózengei idő kapcsolt zajból, impulzusválasz MLS zajból, impulzusválasz szinuszos sweep jelből);
- a méréseknél alkalmazott hangforrások többféle típusa is előfordul (gömbi hangsugárzó, mikrofon felé fordított és mikrofontól elforgatott irányított hangsugárzó);
- az eredmények vegyesen teremakusztikailag hangolt és hangolatlan helyiségekről szólnak.

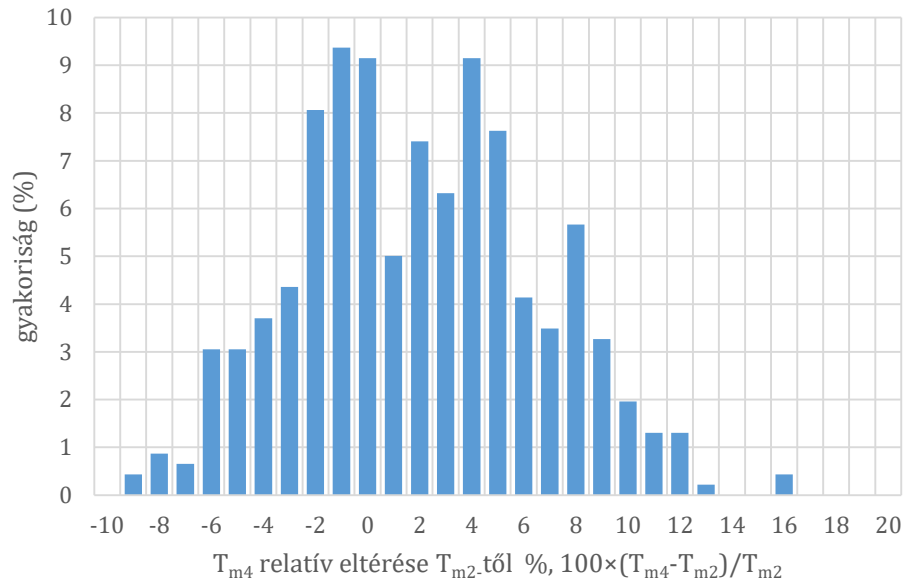
A $T_{20,m2}$ közepes utózengei idő mellett más közepes utózengei idők összefüggéseit is vizsgáltuk. Itt az volt a cél, hogy a különböző módokon számolt közepes utózengei idők közötti tényleges különbséget és a beszédátvitellel legjobb összefüggést keressük.

A 4-7. ábra valós mérésekből számolt T_{m4} és T_{m2} utózengei idők eltéréseinek eloszlását mutatja. Az eredmények szerint:

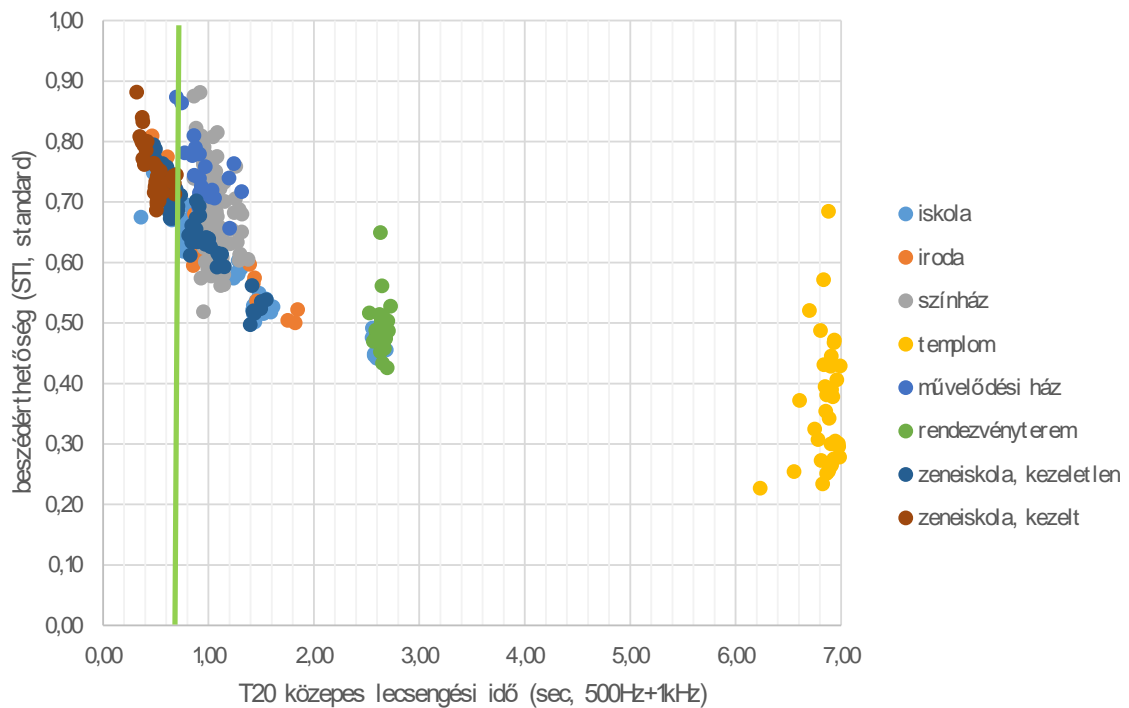
- a különböző módon számolt közepes utózengei idők között az összefüggések tekintetében minimális és nem karakteres az eltérés és akár a $T_{500\text{Hz}}$ egyetlen oktávsvárra vonatkozó utózengei idő is alkalmas lehet az állapotok általános jellemzésére a gyakorlatban
- az A-súlyozott impulzusválaszból számolt utózengei idő az egyéb középértékekhez képest szorosabb összefüggést mutat az A-súlyozott teremakusztikai erősítéssel (G_A) és a beszédátviteli index-szel (STI), egyszerűen és megbízhatóan mérhető, viszont nem szabványos mennyiség.

Az impulzusválaszt eredményező mérésekből a beszédérthetőséget is lehetett számolni, de a háttérzajról és gerjesztésnél használt hangnyomásszintről nincs információ, ezért a beszédátvitel számításánál a maszkoló hatások (spektrum, szint, jel/zaj-viszony) nem lettek figyelembe véve. Az így számított beszédátvitel valóban inkább csak a teremakusztikai viszonyokat, azon belül is a hangtisztaságot jellemzi.

A jellemző eredményeket a 4-8. ábra mutatja. A mérési eredmények szerint adott közepes utózengei idő mellett létezik olyan beszédátviteli érték, aminél várhatóan csak jobb beszédátvitel fordul elő (pl. ha a hangforrás irányítottabb vagy közelebb van a hallgatóhoz), de általában a rövidebb utózengei idő jobb beszédátvitelt tesz lehetővé.



4-7. ábra: A T_{m4} és T_{m2} utózungési idők közötti különbség T_{m2} -höz képest számolva, valós mérések alapján számolt eloszlás⁴². A számtani átlag +1,9%, a medián +1,8%, a szórás 4, %.



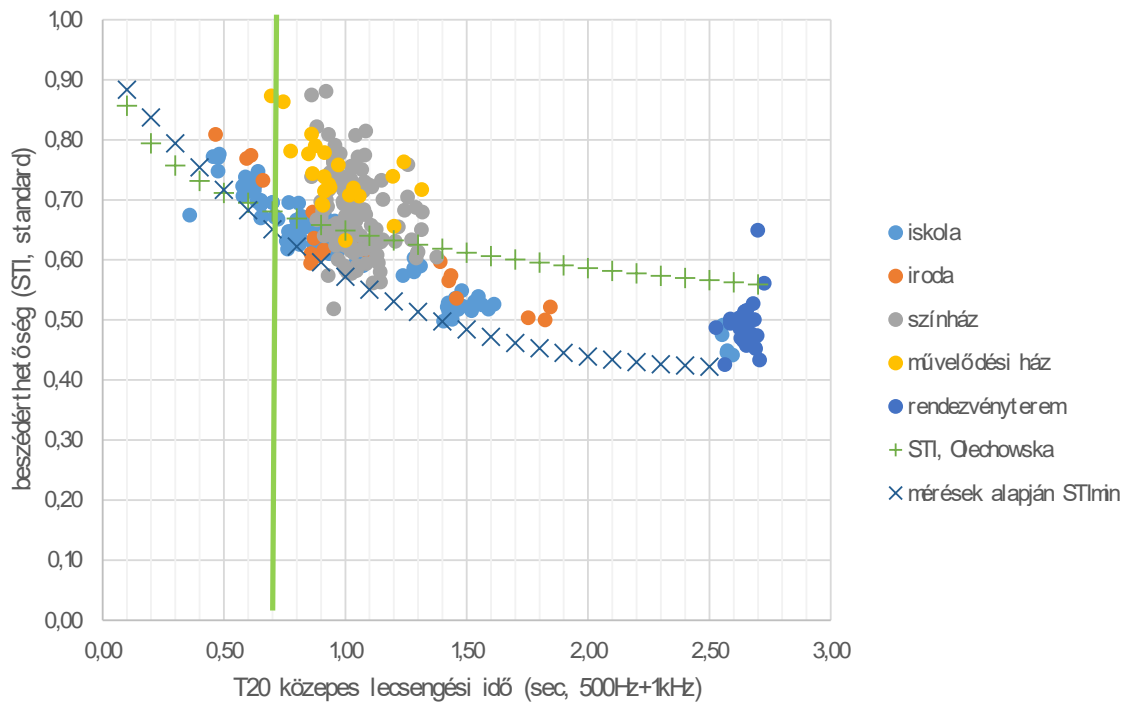
4-8. ábra: A beszédátviteli index és a mért $T_{20,m2}$ közepes utózungési idők összefüggése.

A 4-8. ábrán megfigyelt minimum-értékek alapján a valószínűsíthetően legrosszabb beszédátvitelre vonatkozó becslés (ld. 4-9. ábra), ha a háttérzaj és a beszédhangjel szintjének viszonyát nem vesszük figyelembe:

⁴² A tervezési segédlethez használt mérési eredményekről külön fejezet szól.

$$STI \geq -0,019 \cdot (T_{20,m2} - 3)^3 + 0,42 \quad (4-1)$$

ahol $T_{20,m2}$ az 500 Hz és 1 kHz frekvenciasávokból számolt közepes utózengési idő. Ha a beszéd-hangjel és a háttérzaj viszonya (jel/zaj viszony) romlik, a beszédérthetőség is csökken.



4-9. ábra: A legrosszabb beszédátviteli index becslése a közepes utózengési időből (becslés saját mérési eredmények alapján és más szakirodalmi ajánlás szerint).

Oktatási létesítmények eredményei

A 4-10. ábra az oktatási létesítmények helyiségeiben mért közepes utózengési időket a helyiségek térfogata függvényében ábrázolja. Látható, hogy a tipikus teremméretek legfeljebb 90 m^3 , $115 \pm 5 \text{ m}^3$, $160 \pm 15 \text{ m}^3$, $215 \pm 15 \text{ m}^3$ és $290 \pm 10 \text{ m}^3$ tartományba esnek, az utózengési idő szórása pedig minden térfogat-tartományban nagy.

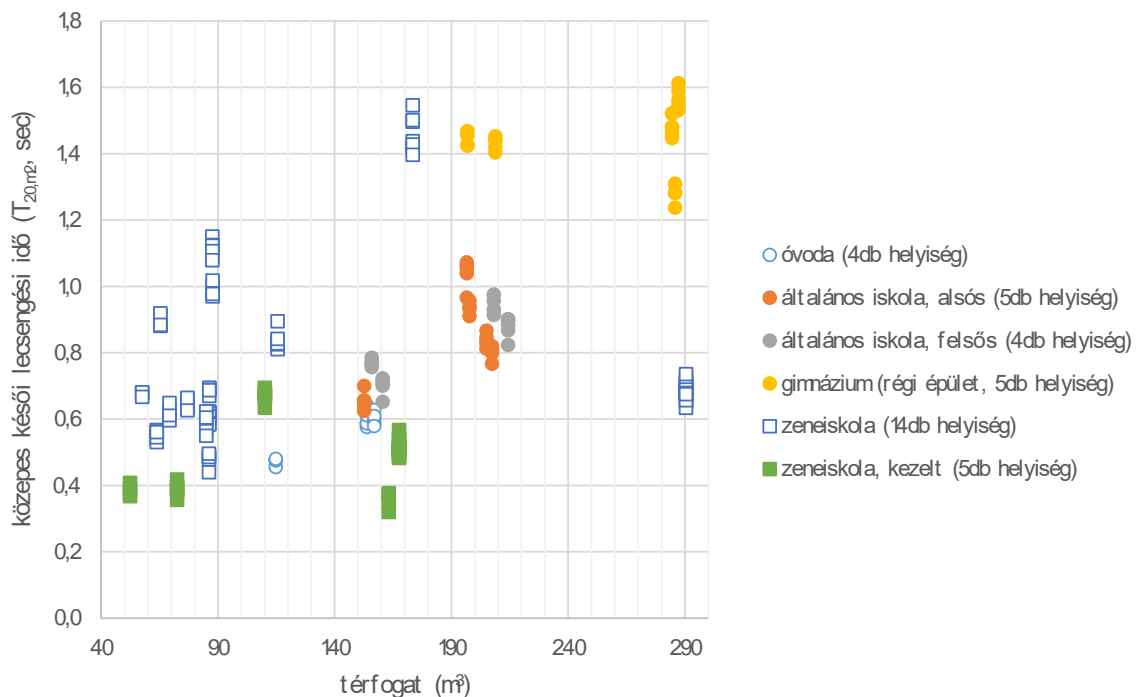
Az oktatási létesítményekben gyűjtött mérési eredményekből nyert egyéb tapasztalatok:

- a belakott, berendezett óvodai foglalkoztatók esetében teremakusztikai beavatkozás nélkül is jellemzően 0,60 s vagy rövidebb közepes utózengési időkre lehet számítani, elsősorban belakottság (puha anyagok, pl. plüss játékok, szőnyegek, függönyök, ágyak) miatt;
- a belakott, berendezett 3 m belmagasságú, teremakusztikai beavatkozás nélküli általános iskolai tantermek közül a $150 \dots 170 \text{ m}^3$ térfogatúakban

0,80 s-nál kisebb utózungési idő, a 200...230 m³ térfogatúakban viszont 0,70...1,10 s utózungési idő fordult elő;

- a nem belakott és csak részlegesen berendezett (padok és székek összetolva) 4,1 m belmagasságú kezeletlen tanterekben térfogattól függetlenül >1,2 s utózungési idők fordultak elő.

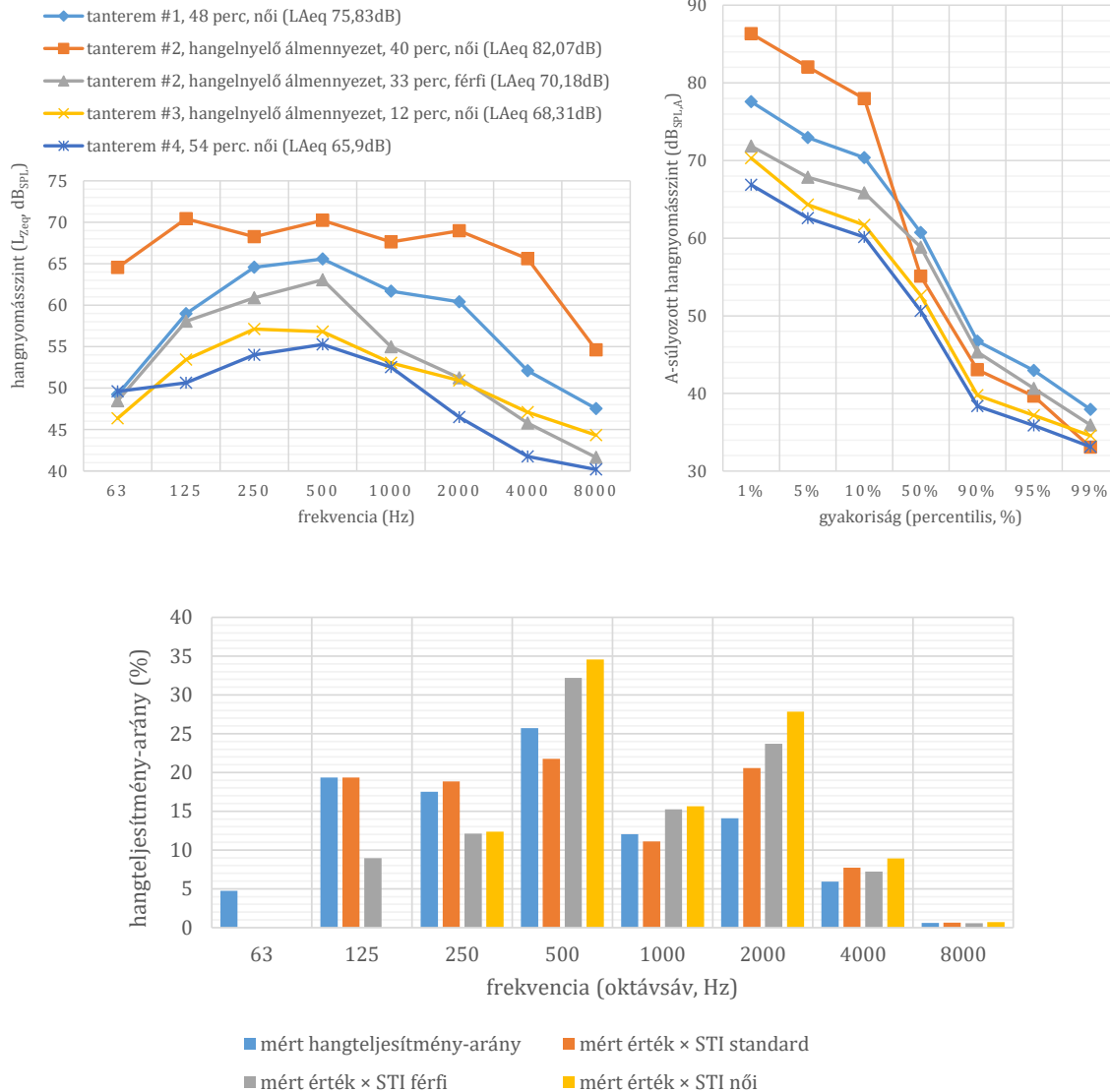
Az eredményekből látható, hogy **teremakusztikai kezelés (hangnyelző burkolatok) nélkül a tanteremre, kiselőadókra javasolt $T_{m2} < 0,70$ s ($STI_{min} > 0,65$, ⁴³) közepes utózungési idő berendezett de nem belakott állapotban és bent tartózkodók nélkül nem teljesíthető.**



4-10. ábra: A közepes utózungési idő a térfogat függvényében, mérési adatok alapján.

A háttérzajszint és a beszédátvitel viszonyát segít megérteni a tanterekben végzett hangnyomásszint-mérések értékelése. A 4-11. ábra 4 különböző tanteremben mért hangnyomásszintek spektrumait, valószínűségeit és a hangenergia-arányokat mutatja. A hangenergia-arányok alapján az 500 Hz-es komponens a legjelentősebb, aminek jelentőségét az STI (beszédátviteli index) számításánál használt súlyozó görbék még kiemelik.

⁴³ MSZ EN 60268-16 ajánlása szerint átlagos STI szórással csökkentett értéke tanterem esetén legyen nagyobb, mint 0,62.



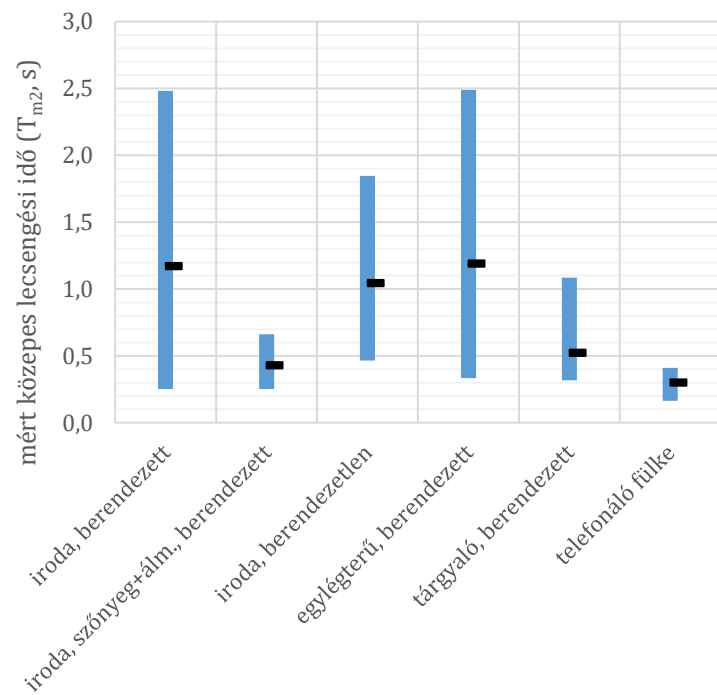
4-11. ábra: Tanterekben tanórák közben végzett hangnyomásszint-mérések⁴⁴ eredményei (fent balra: hangnyomásszint-spektrumok, fent jobbra: A-súlyozott hangnyomásszintek gyakorisága, lent: az összes mérésből képzett hangenergia-arány a beszédátvitel számításánál használt súlyozások figyelembe vételével).

Irodai létesítmények eredményei

Az irodai helyiségekre gyűjtött mérési eredmények (ld. 4-12. ábra) azt tükrözik, hogy előírás hiányában nagy szórást mutatnak az állapotok, illetve hogy ha padlószőnyeg és hangelnyelő álmennyezet szerepelt a tervekben, az általános teremakusztikai elvárások berendezett állapotban egyszerűen teljesülhetnek.

Egylégtérű irodákra vonatkozó részletes (MSZ EN ISO 3382-3 szerinti) mérési eredmények a segédlet írásakor csak korlátozottan állnak rendelkezésre.

⁴⁴ mérési adatok forrása: Alabárdos Zsuzsanna, 2017.



4-12. ábra: Irodai helyiségekben mért eredmények áttekintése.

5. Melléklet: fogalommagyarázat

Ebben a fejezetben a segédletben megjelenő akusztikai, teremakusztikai fogalmak megértését segítő magyarázatokat gyűjtöttük össze. A fogalmak egy részének a pontos definíciója a vonatkozó szabványokban megtalálható.

jel és zaj

A jel valamilyen fizikai jellemző időbeli változása, ami információt hordoz. Az akusztikában a hangnyomás jelét a fülünkkel, a rezgések jelét tapintással érzékeljük közvetlenül.

A zaj a hasznos információtól független zavaró jel. Gyakran zaj alatt a véletlenszerű zörejeket (pl. vízesés zaja közlekedés zaja) értjük csak, de zajnak tekinthető akár a zenei jel is, ha az zavaró.

hanghullám

A hanghullám a levegőt alkotó egymáshoz képest elmozdulni képes részecskék (folyékony közeg) rövid idejű összenyomódásával jellemezhető zavar. A hanghullámot legegyszerűbben a rövid idejű összenyomódás, azaz a légköri nyomáshoz képesti eltérés, másként hangnyomás írja le.

A zavar terjedési sebessége a hullámterjedési sebesség, ami szobahőmérsékleten kb. $c = 343 \text{ m/s}$.

decibel

A dB a 10-es alapú logaritmussal számított teljesítmény-arány („Bell”) tizedét („deci Bell”) fejezi ki:

$$a_{dB} = 10 \cdot \log_{10} \frac{W_1}{W_2} \quad (5-1)$$

Egy konkrét érték (és nem arány) kifejezéséhez meg kell nevezni azt a referenciaértéket, amihez képest az arányt megadjuk.

A fenti összefüggésből következik például, hogy két dB érték összeadva nem a két jel összegét, hanem a szorzatát fejezi ki.

hangnyomásszint („sound pressure level”, „SPL”)

A szabványos⁴⁵ hangnyomásszint a $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$ hangnyomáshoz viszonyított és dB (decibel) mértékben megadott szint:

$$L_{dB_{SPL}} = 10 \cdot \log_{10} \frac{p^2}{p_0^2} = 20 \cdot \log_{10} \frac{p}{p_0} \quad (5-2)$$

A 0 dB_{SPL} tehát a $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$ átlagos hangnyomásszintet fejezi ki, ami nagyjából megfelel a legkisebb érzékelhető hangnyomásszintnek („hallásküszöb”) is bizonyos frekvenciákon.

frekvencia és spektrum

A frekvencia egy ismétlődő jel ismétlődésének gyakoriságát fejez ki. A másodpercenként 1-szer ismétlődő jel gyakorisága 1 1/s azaz 1 Hz (Hertz).

Az összetett (nem tisztán szinuszos) jelek több különböző frekvenciájú szinuszos jel összegével is leírhatók. Amikor az összetett jelet így vizsgáljuk, a különböző frekvenciájú összetevők arányai alkotják az összetett jel spektrumát.

frekvenciasáv

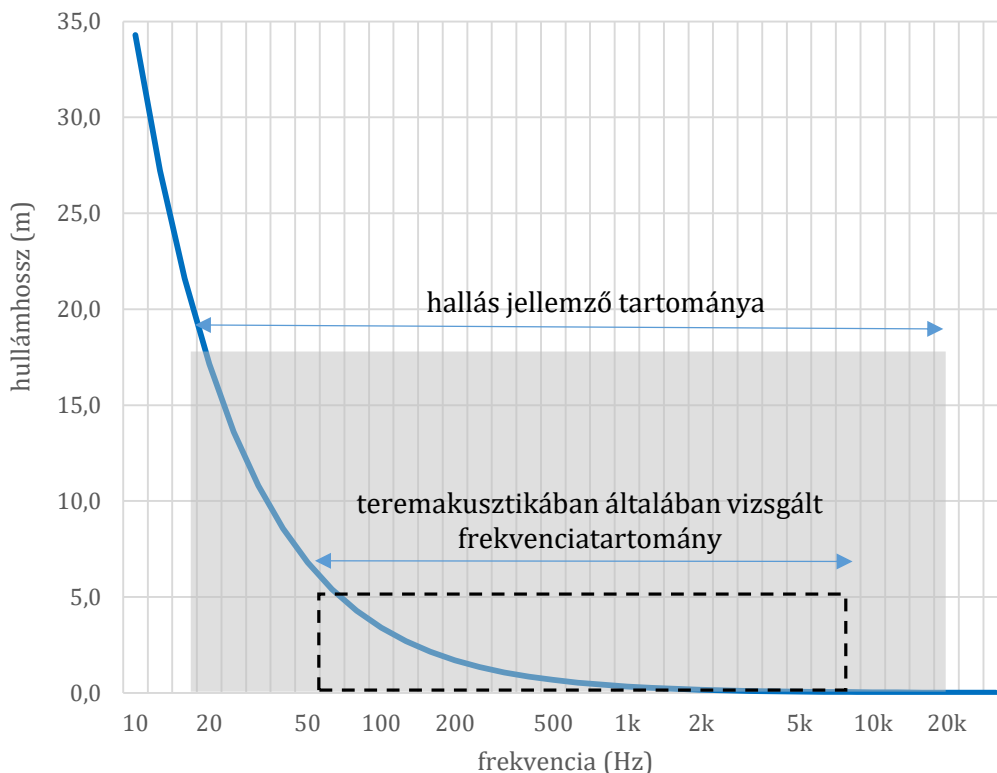
Az emberi hallás összetett hangokban jellemzően nem tud megkülönböztetni nagyon közeli frekvenciájú hangokat, tehát nem egy-egy frekvencián, hanem egy-egy frekvenciatartományban érzékel. A frekvenciatartomány két frekvencia közötti lehetséges frekvenciák összességét jelenti, a frekvenciatartományt a két frekvencia által meghatározott frekvenciasáv egésze képviseli. A frekvenciasávot a felső és alsó frekvencia arányával, oktávban kifejezve lehet kifejezni. Az 1/1 oktávsáv (vagy egyszerűen csak „egy oktávsáv”) azt jelenti, hogy a sáv felső és alsó frekvenciájának aránya 2:1. A frekvenciasáv középfrekvenciája

$$f_{közép} = \sqrt{f_1 \cdot f_2} \quad (5-3)$$

hullámhossz

Általánosságban a hullámhossz azt mondja meg, hogy egy szinuszos hang hangterében az azonos állapotú pontok között mekkora a legkisebb távolság.

⁴⁵ MSZ EN ISO 1996-1: Akusztika. A környezeti zaj leírása, mérése és értékelése. 1. rész: Alapmennyiségek és értékelési eljárások



5-1. ábra: A frekvencia és hullámhossz összefüggése léghangok ($c=343$ m/s) esetén.

hangmagasság

A hallás a különböző gyakoriságú ismétlődéseket, az időbeli szabályosságot hangmagasságként értelmezi. Minél kisebb a frekvencia (azaz minél lassabb a változás gyakorisága), annál mélyebbnek érezzük a hangot. Különböző vizsgálatok szerint leegyszerűsítve egy fülre szinuszos hangnyomásokat 20 Hz...20 kHz tartományban érzékel az emberi hallás. A 20 kHz-nél nagyobb frekvenciájú változásokat ultrahangnak, a 20 Hz-nél kisebb frekvenciájúakat infrahangnak nevezzük.

A hangmagasság-érzet nem közvetlenül arányos a frekvenciával, de általánosságban igaz, hogy az azonos frekvencia-arányokat hasonló minőségűnek ítéli meg a hallás. A legismertebb frekvencia-arány az 1:2, amit oktávnak nevezünk. Ez a zenei oktávval rokon fogalom, az A4 zenei hang a modern nyugati-típusú zenei rendszerekben 440 Hz-es szinuszos jel hangmagasság-érzetének felel meg, az 1 oktávval magasabb hang $440 \text{ Hz} \times 2 = 880 \text{ Hz}$, míg az 1 oktávval mélyebb hang a $440 \text{ Hz} / 2 = 220 \text{ Hz}$ frekvenciájú szinuszos jel hangmagasság-érzetét jelenti.

Két frekvencia (f_2, f_1) oktávban kifejezett távolságát az alábbi képlet fejezi ki:

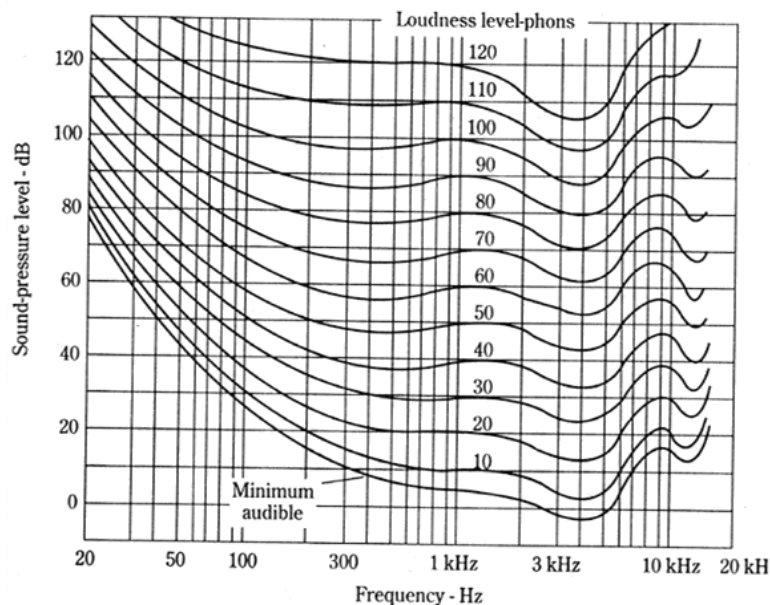
$$a_{\text{oktáv}} = \log_2 \frac{f_2}{f_1} = 3,32 \cdot \log_{10} \frac{f_2}{f_1} \quad (5-4)$$

hangosság, hangerő

A nagyobb hangnyomásszint általában nagyobb hangosságérzetet is jelent, de a hangnyomásszint nem azonos a hangossággal vagy a hangerővel.

A hangerőérzet bonyolultabb összefüggésekkel számolható, mert figyelembe kell venni a hallás összetettebb mechanizmusait (időbeli elfedés, közeli frekvenciájú összetevők egymás közötti elfedéseit, a hallás frekvenciától függő érzékenységét).

Tisztán szinuszos jelek esetén ismert a hallás frekvenciától függő hangerőérzetét kifejező görbesor. Az egymás fölötti görbék azt a hangnyomásszintet jelzik a frekvencia függvényében, ami azonos hangosságérzetet kelt. Az ábra ugyan csak szinuszos jelekre vonatkozik, mégis jól jelzi a hatás összetettségét: kisebb frekvencián jóval nagyobb hangnyomásszint szükséges ugyanakkor hangerőérzethez, mint közepes frekvencián.



5-2. ábra: Azonos hangosságérzet (phon) frekvencia és hangnyomásszint (dB_{SPL}) függvényében.

Különböző vizsgálatok alapján az emberi hallás hangosság szempontjából kb. 1/9...1/12 oktáv felbontásra képes a középfrekvenciától függően. A hangmagasság érzékelése szempontjából ugyanakkor pontosabb a hallás, kb.

frekvencia-súlyozás

Mivel a hangosságot Phon-ban fejezik ki, az ábrán a görbék azonos hangosságérzet, azaz „isoPhon” görbék.

Összetett jelek hangosságának leírására nagyon egyszerűsített módszerként a különböző frekvenciájú összetevők súlyozott összegét szokás megadni.

Az A-súlyozás kb. a 40 Phon görbének felel meg, ami „csendes” jelenségekre jellemző, így az A-súlyozott hangnyomásszint a csendes hangokat jellemzi jobban. Az A-súlyozás jele dB(A), az A-súlyozott hangnyomásszint jele L_A . Megjegyzés: A kiértékelés egyszerűsége miatt széles körben az A-súlyozást mindenféle szintű hangesemény és jel leírására használják.

A súlyozatlanul összegzett hangnyomásszintnek műszaki jelentősége van, jele dB(Z) vagy dB, a Z-súlyozott hangnyomásszint jele L_Z .

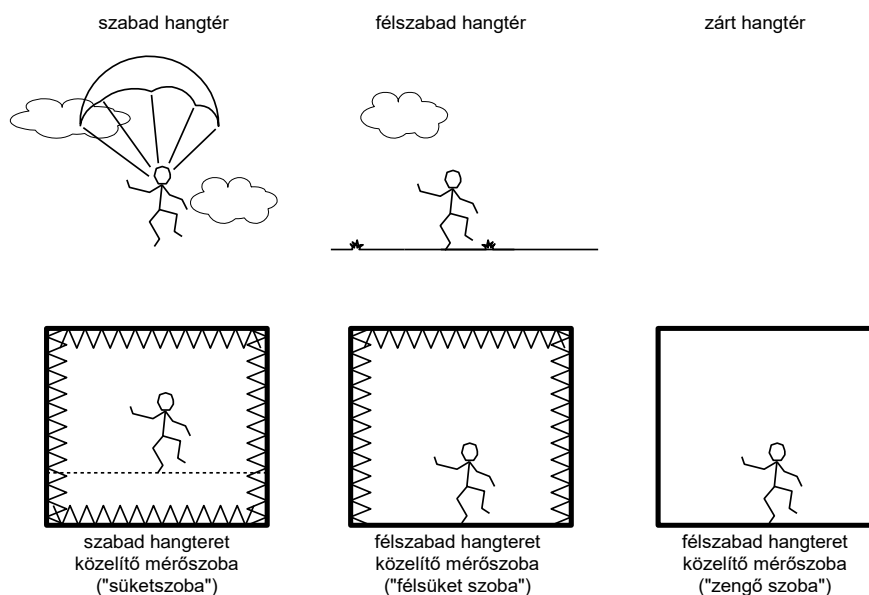
zajsztint, háttérzajsztint, alapzajsztint

A zajsztintet az adott funkció szempontjából főleg vagy zavaró jelek összege határozza meg és hangnyomásszint mértékkel (pl. L_A) szokás megadni. A gyakorlatban a különböző zajhatásokat közlekedési zaj, üzemi zaj, szabadidős zaj kategóriákba soroljuk.

Egy adott zajforrás szempontjából háttérterhelés a zajforrás nélkül (pl. gép kikapcsolása esetén) tapasztalható zajsztint.

szabad hangtér

A hangforrás körül szabad hangteréről beszélünk, ha a hangforrás vizsgált környezetében nincsenek a hanghullám terjedését befolyásoló akadályok (ld. 5-3. ábra).



5-3. ábra: A hangterek kategóriáinak szemléltetése.

visszaverődés

Ha a hanghullám terjedésének útjában a zavart közvetítő közeg minősége megváltozik, a hanghullám energiája eloszlik: a hullám energiájának egy része tovább halad, egy része visszaverődik.

félszabad hangtér

A hangforrás körül félszabad hangtérről beszélünk, ha a hangforrás vizsgált környezetében pontosan egy darab végtelennek tekinthető sík visszaverő felület található. Ha ez a sík végtelen kiterjedésű, tökéletesen sík és tökéletesen merev, az eredeti hangforrás mellett a hangforrás tükörképével is kell számolni, ami a felületről pontosan érkező egy darab visszaverődést képviseli.

zárt hangtér

A hangforrás körül zárt hangtérről lehet beszélni, ha a vizsgált térrészben végtelen számú visszaverődés hatásával kell számolni. A teremakusztikai jelenségekről általában zárt hangterek esetében beszélünk.

Nagyon ritkán fordul elő olyan szituáció, hogy egynél több, de véges számú visszaverődés hatásával kell számolni, ezért ez nem tekinthető külön kategóriának.

utózengési idő (reverberation time)

A zárt hangterekben azért alakul ki végtelen számú visszaverődés, mert a hangtér önmagával kölcsönhatásban, visszacsatolásban áll. Ugyanakkor minden visszaverődés energiaveszteséggel jár, ezért a visszaverődések energiája egyre kisebb. Amikor egy hangforrás egy zárt térben elhallgat, ezért hallani a hangforrás kikapcsolása után egy egyre csökkenő választ a hangtérből, ez a „lecsengés”.

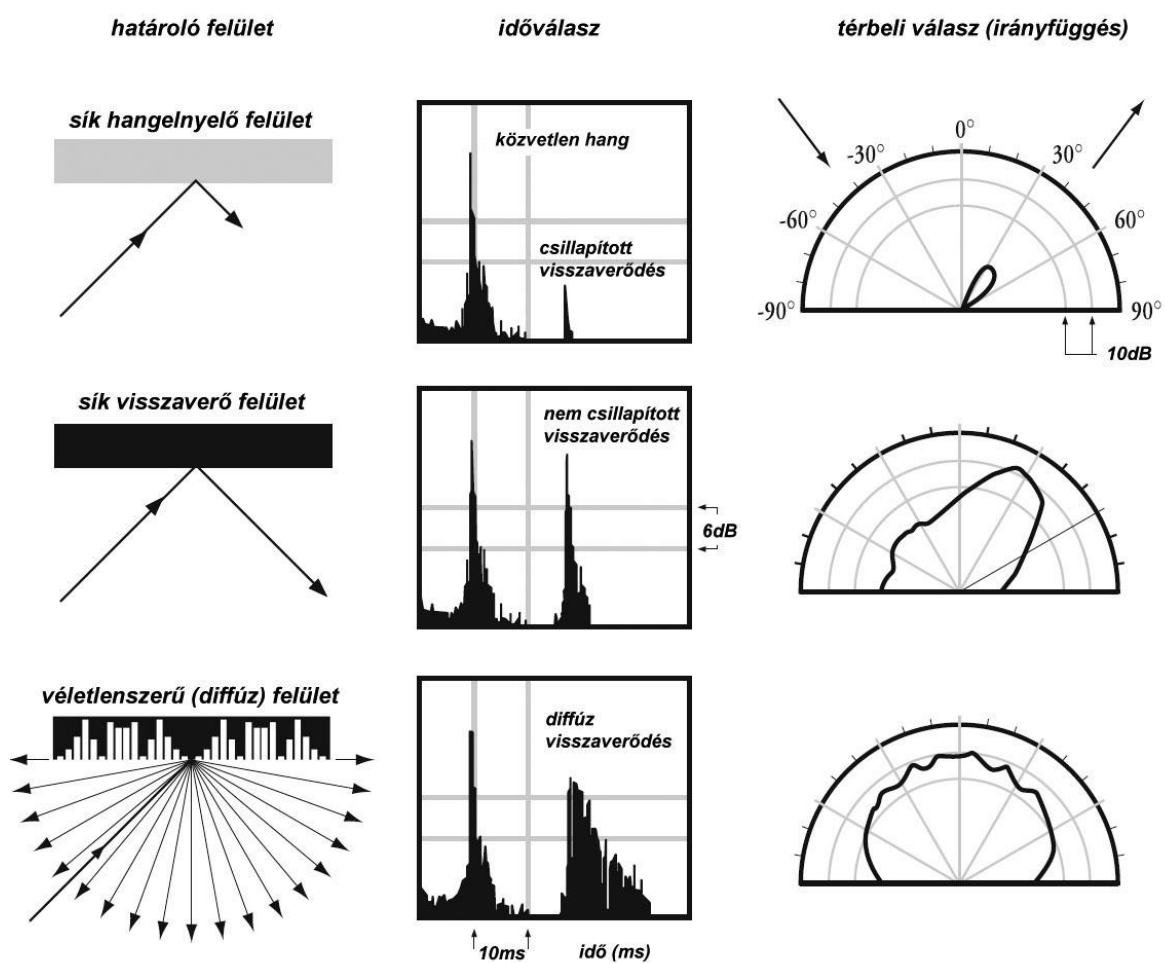
A lecsengés minden zárt, visszacsatolt és veszteséges rendszerben előfordul és legegyszerűbben a lecsengés hosszával lehet jellemezni. A mérnöki gyakorlatban jellemzően a 60 dB energiacsökkenéshez tartozó időt nevezik utózengési időnek (T_{60}). Ha a kiindulási energiaszint 0 dB, a 60 dB csökkenés után -60 dB szint eléréséhez T_{60} idő szükséges, ekkor az energiaszint az eredeti szint $10^{(-60/10)}=10^{-6}$, azaz egymilliomod része.

A teremakusztikában a lecsengés későbbi szakasza az utózengés, a teljes lecsengés hosszát jellemző idő az utózengési idő.

geometriai visszaverődés (specular reflection)

A geometriai visszaverődés a valós visszaverődés egyszerűsített modellje, lényegében a határoló felületről feltételezi, hogy tükörként veri vissza a hangot. A tényleges hangforrásnak ezért minden visszaverő felület esetében szerkeszthető „tükörforrása”.

A valóságban a véges vagy nem tökéletesen sík vagy nem tökéletesen merev felületekről összetettebb a visszaverődés folyamata. Általánosságban azt lehet mondani, hogy ha a felület lényegesen nagyobb, mint a beeső hang hullámhossza, akkor a visszaverődés nagyobb része geometriai visszaverődés és azt az optikai tükrözéshez hasonlóan szerkesztve lehet számolni.



5-4. ábra: A geometriai és diffúz visszaverődések szemléltetése (D'Antonio).

diffúz visszaverődés (diffuse reflection)

A nem geometriai szerkesztéssel visszaverődő hangenergia véletlen irányú és energiájú részét diffúz visszaverődésnek számít. A fogalom rokon a fénytechnikában

alkalmazott diffúz fény fogalmával, mert arra utal, hogy a felületekre véletlen irányokból de egyenletes fény esik.

A geometriai szerkesztésű visszaverődéstől eltérő irányokba szórt hangenergiák aránya a diffuzitási tényező. A diffuzitási tényezőt és az azzal rokon értelmű szóródási tényezőt az MSZ EN ISO 17497 szabványsorozat írja körül, azonban a piacon elérhető szerkezetek esetében csak ritkán mérik illetve adják meg.

utószög (reverberation)

A visszaverődéseknek egy része mindig diffúz, ezért a geometriai visszaverődések mellett a véletlenszerű visszaverődésekből is felépül egy lecsengés.

A diffúzzá vált lecsengést utószögnek nevezzük, hosszát ugyanúgy a 60 dB energiaszint-csökkenéshez igazodva jellemezzük, ez az utószögi idő.

Ritka esetektől (pl. csörgő visszhang) eltekintve a zárt hangterekben a többszörös visszaverődések hatására utószöggel lehet számolni.

visszhang

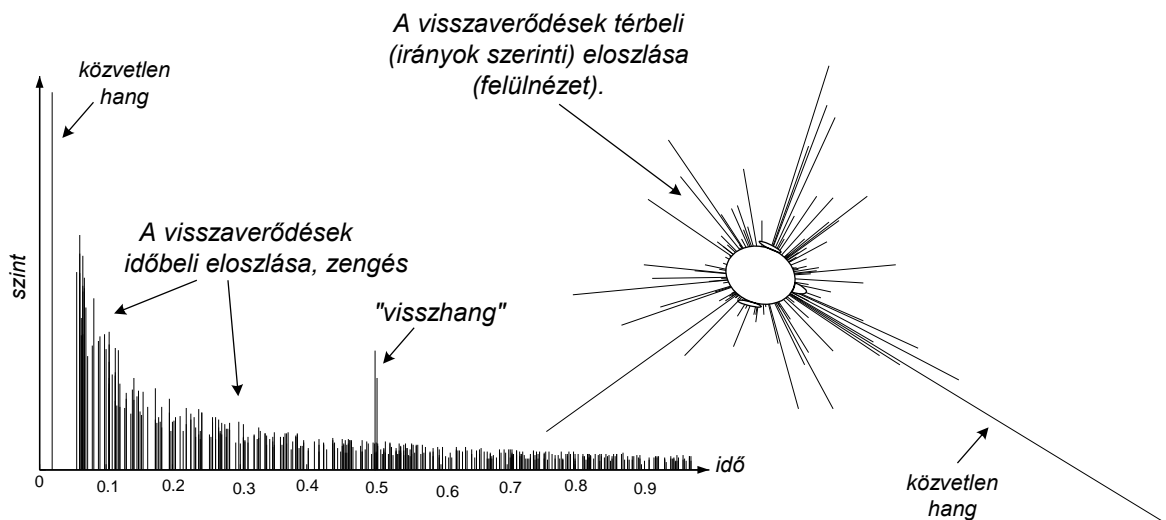
A diffúz utószögből kiemelkedő, külön hallható visszaverődés a visszhang (echo). A többszörös, szabályos időközönként hallható visszhang pedig a csörgő visszhang (flutter echo).

teremválasz, impulzusválasz

A helyiség egyik pontján (hangforrás) megszólaló nagyon rövid hang (pl. taps vagy kipukkanó lufi durranása) hatására a terem másik pontján (vevő) hallható jel lényegében az *impulzusválasz* vagy a teremakusztikában *teremválasz*. Ha az impulzusválasz ismert, abból tetszőleges hangjel hatása vizsgálható, a terem minősége jól jellemezhető.

A zárt terek hangzására jellemző, hogy időben nem változik, kétszeres energiájú hangforrásra kétszeres nagyságú visszaverődések érkeznek és hogy nem érkezik hamarabb visszaverődés, mint hogy a hangforrás megszólalt volna. Ezt a jelfeldolgozásban úgy mondják, hogy „a rendszer időinvariáns, lineáris és kauzális”. Az ilyen rendszerek minőségét teljes mértékben jellemzi az úgynevezett impulzusválasz.

A teremválasz időbeli lefolyása és irányfüggő viselkedése is jellemző (5-5. ábra) és befolyásolja a helyiség hangzásáról alkotott megítélést.



5-5. ábra: Teremválasz jellemző elemei.

reflektogram

Az impulzusválasz egy adott frekvenciasávra korlátozott (szűrt) változata.

echogram

Az impulzusválasz egy adott frekvencián számolt energia-tartalma.

energia-lecsengési görbe (Schroeder-görbe)

Az impulzusválaszból, a reflektogramból vagy echogramból számolt energia-lecsengési görbe a maradék-energia és összes energia arányát fejezi ki, hogy az ábrázolás normalizált legyen, mert mindig 0 dB-ről indul és a lecsengési folyamat jellemzői könnyen leolvashatók legyenek az integrálásnak köszönhetően.

Az energialecsengési görbe (vagy másként Schroeder-görbe), rövidítve EDC (energy decay curve) számítása:

$$EDC = 10 \cdot \log_{10} \frac{E_t^\infty}{E_0^\infty} = 10 \cdot \log_{10} \left(1 - \frac{\int_0^t h^2(\tau) d\tau}{\int_0^\infty h^2(\tau) d\tau} \right) = \quad (5-5)$$

ahol a $h(\tau)$ impulzusválaszban (vagy reflektogramban, echogramban) E_t^∞ a maradék-energia, E_0^∞ az összes energia. A görbe alakjára, összefüggéseire a 3-12. ábra mutat példát.

hangtisztaság

A hangtisztaság szubjektív fogalom. A teremakusztikai hangtisztaság írja le, hogy az eredeti hangforrás jellegzetességei mennyire pontosan vehetők ki a zárt térben tapasztalható visszaverődések, utóhang hatásai mellett.

A teremakusztikai hangtisztaságot jellemző mérhető paraméterek egy adott küszöbidőhöz rendelt korai-késői vagy korai-összes energiaarányból indulnak ki, amik egymásból átszámolhatók:

$$\frac{E_{korai}}{E_{összes}} = \frac{E_{korai}}{E_{korai} + E_{késői}} = \frac{\frac{E_{korai}}{E_{késői}}}{\frac{E_{korai}}{E_{késői}} + 1} \quad (5-6)$$

beszédérthetőség (speech intelligibility)

A beszédérthetőség a hangtisztasághoz hasonló szubjektív fogalom. Értelemszerűen azt fejezi ki, hogy az eredeti hangforrás (beszédhang) mennyire ismerhető fel a zárt térben tapasztalható visszaverődések, utózenge hatásai mellett.

A beszédérthetőséget jellemző egyszerűbb paraméterek abból indulnak ki, hogy a beszéd érthetőségét mérhető módon a beszéd érthetősége szempontjából hasznos jel (pl. korai visszaverődések) és zavaró jelek (pl. késői visszaverődések és háttérzaj) arányából lehet kifejezni.

A beszédérthetőség kifejezésére leggyakrabban használt mérhető és számolható paraméter a beszédátviteli index (speech transmission index, azaz STI). A beszédátviteli index számításának azon a feltevésen alapul, hogy a beszédre jellemző hangjel-változások (modulációk) a zavaró hatások (pl. késői visszaverődések, torzítások) miatt gyengülnek és ezt többféle esetre kiszámolva, a zavaró zajok szintjével, hangossággal, kombinálva egyetlen számértéket ad meg. Az STI paraméter értéke 0,00...1,00 között változik, ahol az 1,00 a tökéletes beszédátvitelt jellemzi.

A beszédátviteli index elvét, számítását, mérését, értelmezését, a javasolt minimális követelményeket, az időskori vagy idegen nyelvi környezetre jellemző korrekciókat az MSZ EN 60268-16 szabvány mutatja be, a segédlet részletesebben a komfort jellemzőkről szóló fejezetben tárgyalja.

bizalmasság, beszéddiszkréció (privacy)

A beszédérthetőség ellentéte a beszéddiszkréció olyan esetekben vizsgálandó, amikor nem a beszéd érthetősége, hanem a beszéd érthetlenségének kifejezése a cél (pl. bizalmas tárgyaló körül). Általános esetben nem csak a beszéd, hanem a beszéd és egyéb tevékenységgel járó zajok zavaró hatását fejezi ki a „privacy” vagy „egyedülletérzet” (pl. egylégtérű iroda munkahelyei között). Ezek műszaki értelemben rokon szempontok, amiket együttesen a „bizalmasság” szóval is leírhatjuk és legegyszerűbben az 1-STI kifejezéssel számolhatjuk, ahol a 0,00 eredmény a bizalmasság és diszkréció teljes hiányának (tökéletes beszédátvitel), az 1,00 eredmény

pedig a tökéletes bizalmasságnak és diszkréciónak (tökéletesen rossz beszédátvitel) felel meg.

hangelnyelés, hangelnelési tényező

A felületre beeső és visszavert energia különbsége az elnyelt hangenergia. Az egységnyi felületen elnyelt hangenergia és a beeső hangenergia aránya a hangelnelési tényező.

A hangelnelési tényezőt úgy vizsgáljuk, hogy a beeső hang csak egy irányból érkezik (síkhullám), a hangelnelés a beesési szögtől függ, ezért a különböző beesési szögek esetén várható hangelnelés átlagát „diffúztéri” hangelnelési tényezőnek (α) nevezzük.

Ez a megközelítés azért hasznos, mert a gyakorlatban a visszaverő felületekre jellemzően nem csak egyetlen irányból, hanem mindenféle irányból érkezik beeső hangenergia (ld. diffúz hangtér).

Egy adott felület hangelnelő képességét a hangelnelési szám ($A = S \alpha$) jellemzi, ami az egységnyi felületre vett hangelnelési tényező és a felület szorzata.

a levegő hangelnelése

A hangterjedés során a hangnyomásszint nem csak a csillapodás miatt csökken, mert nagyobb távolságoknál figyelembe kell venni a levegő megmozgatására fordított energiát is, ami a levegő hangelnelése.

diffuzitás

A diffúz visszaverődések miatt zárt hangterekben jellemzően rövid idő alatt kialakul egy olyan állapot, amikor a hangtér tetszőleges pontján minden irányból közel azonos visszaverődő hangenergia jelenik meg adott időrész alatt.

Ennek az elméleti állapotnak azért van jelentősége, mert a diffúz hangtérben a határoló felületekre igaz lehet, hogy a felület nagyságával arányos a beeső hangenergia. Másrészt azért van jelentősége, mert a diffúz hangtérben elegendő a diffúz visszaverődési tényezővel számolni. Végül azért fontos egyszerűsítés, mert a diffúz hangtérben belül a lecsengés által okozott hatások kevésbé helyfüggők.

A gyakorlatban minél nagyobbak a felületekre jellemző diffúz visszaverődési tényezők és minél szabálytalanabb a hangtér, illetve minél kisebb a különböző felületek hangelnelése közötti eltérés, annál gyorsabban kialakul az elméletit is jól közelítő diffúz hangtér.

A késői utózengési idők a diffúz hangtér lecsengését jellemzik, ezért általában a késői utózengési idők hosszabbak, mint a korai lecsengési idők.

rezonancia

A mély hangok tartománya a hosszú hullámhosszak tartománya, ahol a hang hullámhossza (pl. 100 Hz levegőben 3,4 m hullámhossznak felel meg) már összemérhető a helyiségek méretével. Ilyen esetekben az egyszerűsítések már nem használhatók és csak nagyon leegyszerűsített modellekkel lehet közelítő számításokat végezni.

Mivel a zárt helyiségek önmagukkal visszacsatolásban állnak, a visszacsatolásban előfordulhatnak olyan állapotok, amikor a hangforrás hatására a teremválasz nagy erősítésekkel válaszol. Ez a teremakusztikai rezonancia-jelenségek köre.

Általánosságban akkor beszélünk rezonanciáról, amikor egy dinamikus (mechanikai v. akusztikai) rendszer viselkedését jellemző sajátfrekvencia és a rendszert érő külső gerjesztés frekvenciája egybeesik. Rezonancia esetén viszonylag alacsony szintű gerjesztés esetén is erős válasz (nagy rezgési amplitúdó vagy hangnyomás) figyelhető meg.

Általános esetben a sajátfrekvenciák sűrűsége a nagyobb frekvenciák felé annyira megnő, hogy az egyes sajátfrekvenciák nem ismerhetők fel és a gerjesztés energiája több rezonancián oszlik meg. Ahol adott frekvencia már több rezonanciát érint, az energiaviszonyokon alapuló számítások érvényesek lehetnek.

Elfogadott egyszerűsítésnek tekinthető, hogy az úgynevezett Schroeder-frekvencia alatt az egyszerű energiaviszonyokon alapuló számításokat nem tekintjük érvényesnek. A Schroeder frekvencia, azaz a statisztikus számítási modell érvényesség alsó határfrekvenciájának becslése

$$f_{Schroeder} = 2000 \cdot \sqrt{\frac{T}{V}} \quad (5-7)$$

ahol T a vizsgált frekvenciatartományban mért vagy számolt legnagyobb utózengési idő, V pedig a helyiség térfogata.

A rezonanciák jelensége a beszédhang-tartományban jellemzően ritkán jelentkezik (pl. kezeletlen kis térfogatú helyiségben férfi beszédhangra), ezért a gyakran előforduló szituációkban a rezonanciák lehetséges hatásait nem vizsgáljuk.

Az épületgépészeti hangforrások és elektromos berendezések esetében ugyanakkor szükséges lehet figyelembe venni a lehetséges teremrezonanciákat, mivel gyakran

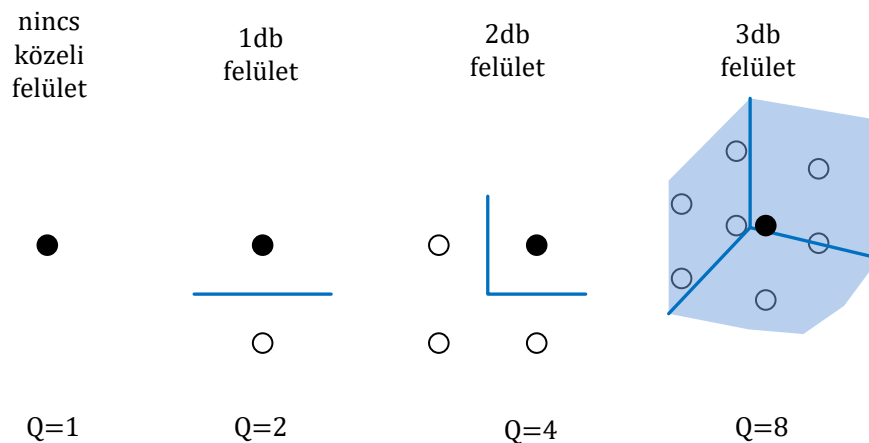
előfordulnak 100 Hz vagy annál kisebb szinuszos zajok, amik szerencsétlen esetben teremrezonanciákat gerjesztve problémát okozhatnak.

hangforrás irányítottsága

Az elméleti pontforrás minden irányban azonos hangteljesítményt sugároz és végtelenül kicsi. A valós hangforrások ezzel szemben különböző irányokban különböző hangenergia sugároznak és véges méretekkel rendelkeznek.

Általában a valós hangforrásoktól elegendően távol már úgy modellezhetők, mint egy olyan végtelenül kicsi pontforrás, aminek a hangenergiája az iránytól is függ.

Az irányítottságot alapesetekben egyszerűen lehet számolni (ld. 5-5. ábra).



5-6. ábra: Pontszerű hangforrás visszaverő felületek hatására figyelembe vehető irányítottságának egyszerű becslése.

Az irányítottságot valós hangforrások esetén méréssel lehet megállapítani, jellemzően hangsugárzókra és hangszerekre található szakirodalmi adatok. A gépészeti zajforrásokra az irányfüggést nem adják meg, ezért azokat pontforrásként lehet csak kezelni, figyelembe véve a beépítési környezetet.

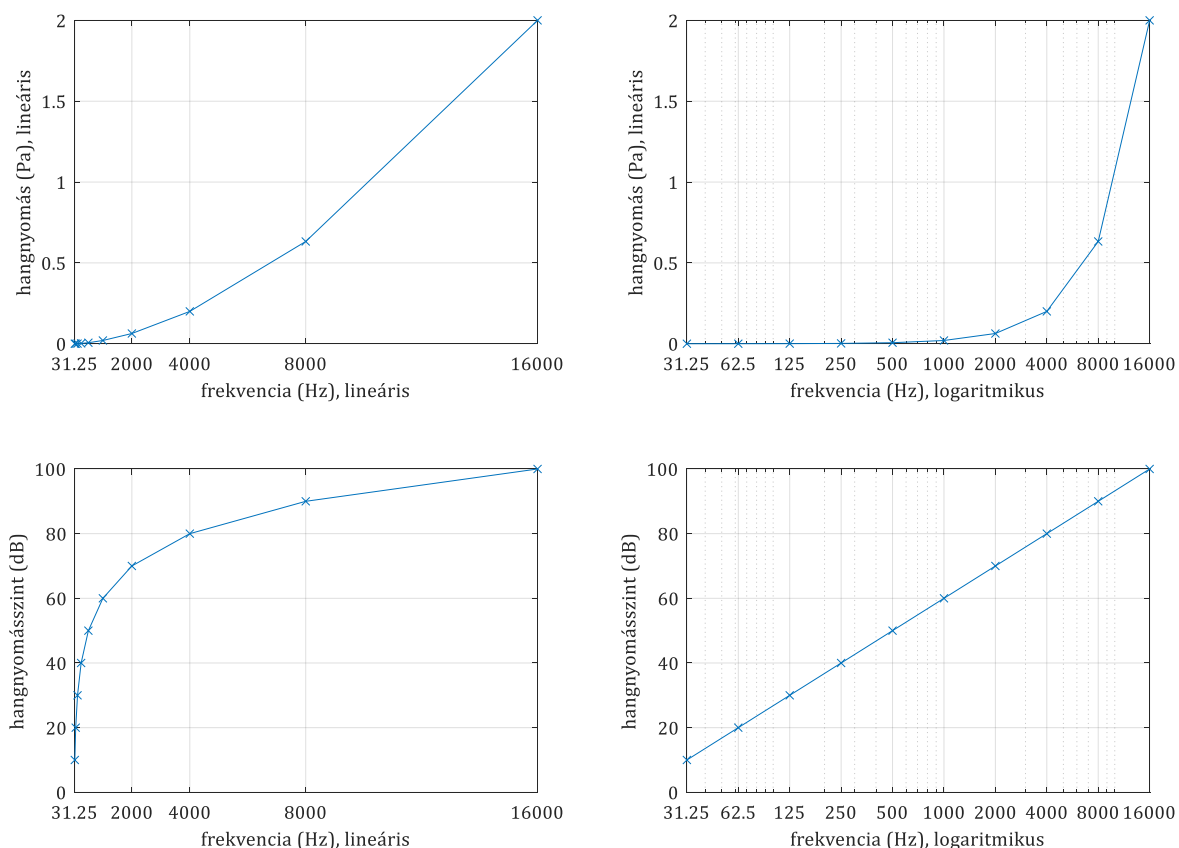
logaritmikus ábrázolás

A mérnöki gyakorlatban gyakran hasznos a logaritmikus ábrázolás, mert az ábrázolt információ nagyon tág határok között változik. Az akusztikában azért is indokolt a logaritmikus ábrázolás, mert az érzékelés elsősorban az arányokkal áll összefüggésben.

A logaritmikus ábrázolás az akusztikai gyakorlatban megjelenik a frekvenciasávok megjelenítésében. A 20 Hz...20 kHz érzékelhető frekvencia-tartományt az IEC 61260-1:2014 szerint az 1 kHz-hez képest oktávsávonként 31,25 Hz-től indulva szokás felírni

és ábrázolni (ld. 5-7. ábra). Így gyakorlatilag 10 oktávsávból áll a teljes hallható frekvencia-tartomány.

A logaritmikus ábrázolás az akusztikai gyakorlatban megjelenik a dB mértékek alkalmazásakor is. Például a $2\times$ nagyobb teljesítmény $+3$ dB hozzáadásával és nem szorzással írható le, így az éppen érzékelhetőől a már zavaróan hangos hangnyomásszintig kb. $0\dots 100$ dB_{SPL} tartomány leírása kezelhetőbb és kifejezőbb, mint a $20\ \mu\text{Pa}\dots 2\ \text{Pa}$ fizikai nyomástartomány leírása.



5-7. ábra: A lineáris és logaritmikus ábrázolás összehasonlítása (ha a hangnyomásszint $+10$ dB/oktáv meredekséggel nő és $1\ \text{kHz}$ -en $60\ \text{dB}_{\text{SPL}}$ a hangnyomásszint).

a teremakusztikai erősítés (G, gain, strength)

A visszaverődések az eredeti hang ismétlődései, amik teljesítményben az eredeti hanghoz hozzáadódnak és így a visszaverődések miatt hangosabb is lesz a hallott hang. A helyiségekben ezt az erősítést fejezi ki a G paraméter, amit a helyiségben egy adott ponton mért impulzusválasz hangteljesítménye és a hangforrás $10\ \text{m}$ távolságban visszaverődések nélkül mérhető hangteljesítménye különbségéből számolnak (MSZ EN ISO 3382-1): $G=10\cdot\log_{10}(E_{\text{összes}})-10\cdot\log_{10}(E_{\text{direkt},10\text{m}})$. A nagyobb érték erősebb (hangosabb) teremhangot jelent.

6. Irodalomjegyzék

- ANSI. (1997 (R2017)). *ANSI/ASA S3.5-1997*.
- B. Rasmussen, J. B. (2012). *Reverberation time in class rooms - Comparison of regulations and classification criteria in the Nordic countries*. BNAM 2012.
- Barron, M. (2015). *Theory and measurement of early, late and total sound levels in rooms*. Journal of Acoustical Society of America Vol. 137, No. 6, June 2015: ASA.
- Beranek, L. L. (1947). *The design of speech-communication systems*. Proc. IRE 35, 880–890 (1947).
- Bradley, J. S. (1986). *Predictors of Speech Intelligibility in Rooms*. Journal of Acoustical Society of America Vol. 80, 837-845.
- Bradley, J. S. (2009). *A new look at acoustical criteria for classrooms*. Inter-Noise 2009 (Ottawa, Canada).
- Choi, Y.-J. (2017). *Comparison of Two Types of Combined Measures STI and U50 for Predicting Speech Intelligibility in Classrooms*.
- D. Channing, A. J. (2012). *The Essex Study - Optimised classroom acoustics for all*.
- D. Pelegrín-García, B. R. (2014). *Speaker-oriented Classroom Acoustics Design Guidelines in the Context of Current Regulations in European Countries*. Acta Acustica united with Acustica, dec. 2014: EAA.
- Dolejší, J. (2016). *Classroom Acoustic Study*. Akustika Vol. 25/March 2016.
- ÉMI. (2019). *Építészeti műszaki irányelv, "Akusztika. Helyiségek akusztikai komfortja. Követelmények"*. 5/2019.(IX.16.)ÉPMI.
- Hongisto, V. (2005). *A model predicting the effect of speech of varying intelligibility on work performance*. Indoor Air vol. 15. 458-468.
- J. Harvie-Clark, D. W. (2014). *Reverberation time, strength & clarity in school halls: Measurements and modelling*. Proceedings of the Institute of Acoustics Vol. 36. Pt. 3.
- J. Whitlock, G. D. (2008). *"Speech intelligibility in classrooms: specific acoustical needs for primary school children"*. Build. Acoust. 15, 35–47.
- J. Zander, F. S. (2013). *Influence of the Amount and Distribution of Absorbers on the Room Acoustic Properties of School Sports Halls*. DAGA, Merano.
- Karjalainen, M. (2001). *More about this reverberation science: Preceptually good late reverberation*. AES Convention: AES.
- Leesman. (2016). *100,000+ data report*. <http://www.leesmanindex.com/wp-content/uploads/Leesman-100k-data-report-Jan16-INT-SP.pdf>: Leesman.
- M. G. Blewins, A. T. (2013). *Quantifying the just noticeable difference of reverberation time with band-limited noise centered around 1000 Hz using a transformed updown adaptive method*. International Symposium on Room Acoustics.
- M. Vorländer, J. W. (2014). *Raumakustik und Beschallungstechnik*. Bauphysik Kalender 2014: Raumakustik und Schallschutz: Ernst&Sohn.

- Marshall, L. G. (1994). *An acoustics measurement program for evaluating auditoriums based on the early late sound energy ratio*. Journal of the Acoustical Society of America Vol. 96: ASA.
- MSZ EN 60268-16:2011 *Hangátviteli készülékek. 16. rész: A beszédérthetőség objektív értékelése beszédátviteli indexszel (IEC 60268-16:2011)*. (2011).
- MSZ EN ISO 9921:2004 *Ergonómia. A beszédkommunikáció értékelése*. (2004).
- Pelegrín-García, D. (2011). *The role of classroom acoustics on vocal intensity regulation and speakers' comfort*. Acoustic Technology, Department of Electrical Engineering, ISBN978-87-92465-91-7: TU Denmark.
- R. Neubauer, B. K. (2001). *Prediction of the Reverberation time in Rectangular Rooms with non-uniformly Distributed Sound Absorption*. Archives of Acoustics Vol. 26, 3, 183201.
- rendelet, 2. (1997). *OTÉK 253/1997 (XII.20.) Korm. rendelet az országos településrendezési és építési követelményekről*.
- Skålevik, M. (2010). *Reverberation time - the mother of all room acoustical parameters*. BNAM 2010.
- Skålevik, M. (2011). *Schroeder Frequency Revisited*. Forum Acusticum 2011.
- W. M. Whitmer, D. M. (2016). *On Detectable and Meaningful Speech Intelligibility Benefits*. Adv Exp Med Biol 2016, 894: 447-455 doi:10.1007/978-3-319-25474-6_47.
- W. Mikulski, J. R. (2011). *Acoustics of Classrooms in Primary Schools - Result of the Reverberation Time and the Speech Transmission Index Assessments in Selected Buildings*. Archives of Acoustics vol. 36. 777-793.
- W. Yang, J. S. (2009.). *Effects of room acoustics on the intelligibility of speech in classrooms for young children*. Journal of the Acoustical Society of America, 2009. 923-933: ASA.
- Wang, L. M. (2015). *Room acoustic effects on speech comprehension of English as second language talkers and listeners vs native English speaking talkers and listeners*. ICSV 22, 2015.

A sorozat keretében eddig megjelent kiadványok

2017.

1. NÉMETH András, MILÁVECZ Richárd Iparban használatos vízminőségek
2. DR. SZILÁGYI Zsombor, DR. SZUNYOG István Mérések a gáziparban
3. DR. BARNA Lajos, EÖRDÖGHNÉ DR. MIKLÓS Mária, DR. SZÁNTHÓ Zoltán, DR. BALLA József A biztonságos ívóvízellátás megteremtésének tervezési eszközei
4. BORBÁS Lajos Dr. Felépítés elvű (additív) gyártástechnológiák a gépészetben
5. BERENCSEI Miklós, BERECSKY Ákos, HORVÁTH László, KOVÁCS Gergely, MIHÁLFFY Krisztina Kerékpárosbarát közlekedéstervezés
6. TŰDŐS Tibor, DR. VARJÚ György, DR. PETRI Kornél, GÁBOR András A csillagpontkezelés legújabb külföldi és hazai eredményei (Útmutató és tervezési segédlet)
7. DR. GARBAI László, DR. JASPER Andor, VÁRADI András Fűtési és használati melegvíz-igények kockázati elvű méretezése példákkal
8. KÁDI Ottó, DOHÁNY Máté, JÓZSA Bálint, LÁSZLÓ Csaba Tibor, JAKKEL Ottó A közúti vasutak (villamos) tervezésével kapcsolatos kézikönyv

2018.

9. BLAZSOVSZKY László A gázfogyasztó készülékek égéstermék elvezetésével kapcsolatos szabályozások hiányosságai és ellentmondásai
10. CSORDÁS Szilveszter, FORGÁCS Lajos Dr., PÓLYA Endre ifj., RÉV Zoltán, UDWARDY Péter Orvostechnológiai továbbképzés ismeretanyaga
11. NÁDASDY Tamás, EGYHÁZY Zita, KOVÁCS Ákos Sándor, SZECSŐ Dániel Géza A közúti biztonsági audit (KBA) jelentések elkészítésének alkalmazási segédlete – A közúti infrastruktúra közlekedésbiztonsági kezeléséről szóló jogszabályhoz és útügyi műszaki előíráshoz kapcsolódó értelmezési, kidolgozási és elfogadtatási javaslatrendszer
12. DR. SZILÁGYI Zsombor, HORÁNSZKY Beáta Földgáz kereskedelem (mérnöki segédlet)
13. DR. SZILÁGYI Zsombor Az energiahordozók jövője – kőolaj, földgáz, megújulók
14. S. VÍGH Judit, DOHÁNY Máté Magános közlekedők baleseti súlyosságának csökkentése mobil applikáció segítségével
15. DR. BALIKÓ Sándor, DR. CSÚRÖK Tibor, NOVÁK Dániel, ORBÁN Tibor, DR. ZSEBIK Albin Ötletlapok I. – Energiahatékonyság növelő ötletek egyszerű energetikai és gazdasági számításai
16. DARABOS Zoltán, KOLTAI Henrik, SZABÓ Tamás, SZÁSZ Béla, VAJDA Sándor Felvonók felújítása és átalakítása – Műszaki segédlet
17. TŰDŐS Tibor, KRUPPA Attila Alapozásföldelők új tervezési elvei és kivitelezési módszerei – Tervezési segédlet és kivitelezési útmutató
18. FENYVESI Zsolt Tűzvédelmi tervek tartalmi szabályainak átdolgozása

19. GÁBORI László Dr., BEINSCHRÓTH József Dr., NÓGRÁDI Gábor, RÁTKAY Tamás
 Nagyméretű informatikai beruházásoknál (fejlesztéseknél) ajánlott szoftveroldali tervdokumentációk tartalmi elemeinek meghatározása (I. – II. kötet)
20. DR. DIVÓS Ferenc
 Az élő fák stabilitása – mérnöki megközelítés – Élő fák, mint teherhordó faszerkezetek
21. DR. KARÁCSONYI Zsolt
 Faanyagok tartós szilárdsága
22. BARNÁ Lajos Dr., ERDEI István, JASPER Andor Dr., TAKÁCS Gyula
 Segédlet épületek csatorna-berendezéseinek tervezéséhez
23. ANTÓK Péter István, FÜZÉR Ferenc, SÁRKÖZI András
 Fényvezető kábelszakaszok műszaki-minőségi ajánlás gyűjteménye
24. JANCSÓ Béla, DR. KULCSÁR Alexandra, NÉMETH Gábor, DR. VÍMI Zoltán, DÉRI Lajos, SZIMANDEL Dezső
 Vízbiztonsági engedélyezési eljárással kapcsolatos dokumentációk és engedélyeztetéssel kapcsolatos követelmények a 2018.01.01-én hatályba lépett 41/2017. (XII.29.) BM rendelet alapján
25. DR. TAKÁCS Bence, DR. SIKI Zoltán, DR. ÉGETŐ Csaba, BÉNYI László
 Mérnökgeodéziában alkalmazott alapponthálózatok – A jó gyakorlat bemutatása mintapéldákkal
26. DR. MÓCZÁR Balázs, LAUFER Imre, TÓTH Gergő, WOLF Ákos
 Korszerű támszerkezetek tervezése
27. HALÁSZ Györgyné Dr., CSERVENYÁK Gábor, TUCZAI Attila, VIRÁG Zoltán
 Különböző funkciójú épületek klimatechnikája II.
28. KÁDI Ottó, JÓZSA Bálint
 Kerékpáros balesetek létesítmények szerinti vizsgálata
29. GARBAI László Dr., JASPER Andor Dr., PELLER József Bendegúz
 Hőteljesítményátviteli tényező alkalmazása távhőrendszerek optimális szabályozásának modelljében
30. GARBAI László Dr., SÁNTA Róbert Dr., JASPER Andor Dr.
 A kompresszoros hőszivattyúk optimalizálása – Tervezés és üzemeltetés
31. LADÁNYI Gábor Dr.
 Diagnosztika a karbantartásban
32. MÉSZÁROS János, MOLNÁR Tibor, RITZL András
 KIÜRÍTÉSI ÉS MENEKÜLÉSI ÚTVONALBA ÉPÍTETT AJTÓK tervezési segédlet (2018)
-
- 2019.**
33. BLAZSOVSZKY László
 Földgáz elosztóvezetékek üzemeltetése
34. DR. SZILÁGYI Zsombor
 A megújuló energiahordozók jövője Magyarországon
35. FORGÁCS Lajos Dr., HAIDEGGER Tamás Dr., PÓLYA Endre ifj.
 Új fejlesztések, innovatív megoldások az orvostechológia terén
36. VARRÓ Beáta, DR. KIS András
 Magyarországon előforduló, épületekbe beépített faanyagokat károsító gombák vizsgálata és azonosítása DNS diagnosztikával
37. MANNINGER Marcell, SZEPESHÁZI Attila, SCHEURING Ferenc, MOLNÁR György
 Munkatér határoló szerkezetek
38. KORSÓS András, RÁDULY Zsolt
 A közterületi és belterületi térfigyelő kamerarendszerek tervezési irányelvei
39. GERGELY Edit, DR. BEZEGH András
 Módszertani útmutató az üvegházhatású gázok közvetlen és közvetett kibocsátásának számítására

40. DR. BEZEGH András, BITE Pálné Dr., GERGELY Edit Városi környezetvédelem (Fenntartható és okos városok)
41. GÓDOR Balázs, DR. KÁSA László, SZÉKELY Bence Híddaruk méretezési segédlete (2019.)
42. FÜRJES Andor Tamás, KOTSCHY András, NAGY Attila Balázs, CSOTT Róbert Teremakusztikai méretezés gyakran előforduló szituációkban
43. DR. KARÁCSONYI Zsolt Faanyagok tartós szilárdsága
Faanyagok szilárdságának változása az idő függvényében
44. DR. BALIKÓ Sándor, ORBÁN Tibor, VARGA Péter, DR. ZSEBIK Albin Ötletlapok II. – Energiahatékonyság növelő ötletek egyszerű energetikai és gazdasági számításai
45. PRIMUSZ Péter, PhD. Hajlékony útpályaszerkezetek méretezése talajstabilizációk figyelembevételével
46. NÉMETH Balázs, HÁMORI Sándor, KOSTYÁK Attila, VÍGH Gellért Különböző funkciójú épületek klímatechnikája III. Segédlet ipari épületek lég- és klímatechnikai rendszereinek tervezése
47. JANCSÓ Béla, KAVECZKI Gergely, KÓCZÁN Gábor, LABORCZI Tamás, KNOLMÁR Marcell, RAUM László Csapadékvízgyűjtés tervezési követelményei
Hogyan tervezzünk városi csapadékelvezető rendszereket
48. DOHÁNY Máté, SCHVANNER Norbert Kerékpárosok sebességének felülvizsgálata jelzőlámpás csomópontokban
49. JÓZSA Bálint, S. VÍGH Judit Sebességcsökkentés hatásainak vizsgálata gyorsforgalmi utakon
50. DR. ZSEBIK Albin, NOVÁK Dániel Projektlapok I. – Energiahatékonyság növelő javaslatok projektlapjai
51. DR. MÓGA István Beruházási projektek szabályozási és szabvány környezete, Tervezési követelmények meghatározása
52. DR. GÁBORI László, DR. BEINSCHRÓTH József, NÓGRÁDI Gábor, RÁTKAY Tamás Informatikai Tervező szakmai minősítő rendszere (Informatikai szakmai terület illesztése a Mérnök Kamarai működési rendbe és rendszerekbe)
I. kötet: Koncepció és modell
II. kötet: Modell illesztése
III. kötet: Tudástár
53. VIRÁG Zoltán, GYURKOVICS Zoltán, SZAKÁL Szilárd, VIRÁG Zsolt, ORCSI Attila Országos Tűzvédelmi Szabályzat épületgépész értelmezése a szakmai gyakorlatban
Segédlet a gyakorló épületgépész mérnökök számára I.