

REIS FRIGYES

AZ ÉPÜLETAKUSZTIKA ALAPJAI
ÉPÜLETEK AKUSZTIKAI TERVEZÉSÉNEK GYAKORLATA

REIS FRIGYES

AZ ÉPÜLETAKUSZTIKA ALAPJAI

ÉPÜLETEK AKUSZTIKAI TERVEZÉSÉNEK GYAKORLATA

TERC
BUDAPEST

A könyv az Oktatási Minisztérium támogatásával,
a Felsőoktatási Pályázatok Irodája által lebonyolított
Felsőoktatási Tankönyv- és Szakkönyvtámogatási Pályázat
keretében jelent meg.

Lektorok:

Dr. Illényi András PhD,
a fizika tudomány kandidátusa

Dr. Hunyadi Zoltán PhD,
a műszaki tudomány kandidátusa

© Dr. Habil. Reis Frigyes, 2003

© Hungarian edition TERC Kft., 2003

ISBN 963 86303 6 1

Kiadja a TERC Kereskedelmi és Szolgáltató Kft.
Szakkönyvkiadó Üzletága,
az 1795-ben alapított Magyar Könyvkiadók
és Könyvterjesztők Egyesülésének a tagja

Felelős kiadó: Lévai-Kanyó Judit kiadóvezető
Kereskedelmi és marketingvezető: Szekeres Judit
Műszaki szerkesztő: Bagi Miklós
A borítót tervezte: Répás Ferenc
Az ábrákat rajzolták: Mesterházy Beáta (1–9. fejezet),
Szőke Ferenc (10. fejezet)
Nyomdai előkészítés: BGDS Bt.
A könyv formátuma: A4
Terjedelme: 35,875 (A5) ív

Nyomás és kötés: Dabas Jegyzet Kft.
Felelős vezető: Marosi Györgyné

TARTALOM

Személyes hangú előszó	11
1. Bevezetés	13
1.1. A könyv tárgya (I.)	13
1.2. A könyv tárgya (II.)	13
1.3. Előzetes ismeretek	14
1.4. Az akusztikai tervezés és az építészeti tervezés kapcsolatai az épületléptékű tervezési feladatok megoldásában	14
1.5. Probléma – megoldandó feladatok	15
1.6. Témakörök	18
1.7. Szakirodalmi források	18
1.8. A könyv megjelenésének feltételei	18
2. A léghangterjedés alapjai	20
2.1. Rezgés	20
2.2. A hang és terjedése különböző hangforrások és különböző hangterek esetében	21
2.2.1. A hangjelenség	21
2.2.2. Alapvető összefüggések, a hang terjedési sebessége, hullámegyenlete, a sebességpotenciál értelmezése [IV.5], [IV.2]	23
2.2.3. Síkhullámú terjedés [IV.5], [IV.2]	25
2.2.4. Síkhullám visszaverődése ideálisan merev, ill. nem ideálisan merev közeghatár felületéről, merőleges beesés esetén [IV.5], [IV.2]	27
2.2.5. Síkhullám visszaverődése ideálisan merev, ill. nem ideálisan merev közeghatár felületéről, ferde irányú beesés esetén [IV.5], [IV.2]	29
2.2.6. Pontszerű vagy gömb alakú hangforrás hangtere [IV.5], [IV.2]	33
2.2.7. Gömbhullám visszaverődése sík felületű közeghatárról	38
2.2.8. Vonalszerű hangforrás hangtere [IV.5], [IV.2]	39
2.2.9. Felületek hangsugárzása [IV.5], [IV.2], [2.3]	41
2.3. A levegő abszorpciója által okozott többletszillapítás, további, a terjedést befolyásoló tényezők	43
2.4. Térbeli akadályok hatása a hangterjedésre	44
2.4.1. A jelenség	44
2.4.2. Az árnyékolási csillapítás meghatározása pontszerű hangforrás esetén	45
2.5. Közúti közlekedés okozta hang terjedése a [III.4] nyomán	47
2.6. Hangterjedés helyiségekben	49
2.6.1. Az áttekintés célja	49
2.6.2. A hangjelenségek hullámelméleti leírása [IV.4], [IV.6]	50
2.6.3. A teremben lezajló akusztikai folyamatok geometriai közelítése, az utózengési idő értelmezése	55
2.6.4. A teremakusztika statisztikus közelítése	58
2.6.5. Hangterjedés nagyméretű, lapos terekben	60

3.	Rezgésterjedés (testhang) az épületszerkezetekben	63
3.1.	A testhang fogalom	63
3.2.	Feszültség–deformáció párok	64
3.3.	A dinamikai rugalmassági modulus. Valós és komplex leírás [IV.7], [IV.8], [IV.9]	65
3.4.	Az egy szabadságfokú rezgőrendszer viselkedése [IV.7], [IV.8], [IV.9]	68
3.5.	Rugalmas elválasztólemezek dinamikai merevségei és impedanciái	75
3.6.	Hullámformák kialakulása	76
3.7.	Longitudinális hullám [IV.2], [IV.8]	76
3.8.	Nyíróhullám [IV.2], [IV.8]	79
3.9.	Torziós hullám [IV.8]	80
3.10.	Hajlítóhullám rudakban, lemezekben [IV.2], [IV.8]	81
3.11.	Bemeneti impedanciák [IV.2], [IV.8]	85
3.11.1.	Általános értelmezés	85
3.11.2.	Egy irányban végtelen hosszú rúd bemeneti impedanciája longitudinális hullám terjedése esetén	85
3.11.3.	Egy vagy két irányban végtelen hosszú rúd bemeneti impedanciája hajlítóhullám terjedése esetén	85
3.11.4.	Végtelen kiterjedésű vékony lemez bemeneti impedanciája hajlítóhullám terjedése esetén	86
3.12.	Hajlítóhullámú rezgési tér véges kiterjedésű közegben	87
3.12.1.	Az áttekintés céljai	87
3.12.2.	Véges hosszúságú rúd hajlítórezgései	87
3.12.3.	Véges kiterjedésű lemez hajlítórezgései és teljesítményviszonyai	90
4.	Kölcsönhatások	93
4.1.	A kölcsönhatások értelmezése	93
4.2.	Hajlítórezgést végző lemez hullámimpedanciájának és sugárzási impedanciájának értelmezése [IV.7], [IV.8]	93
4.3.	Határolószerkezetek hangsugárzása	94
4.3.1.	A határolószerkezetek hangsugárzásának értelmezése	94
4.3.2.	Végtelen lemez hangsugárzása [IV.8]	95
4.3.3.	Pontszerűen vagy vonalszerűen gerjesztett, végtelen kiterjedésű, veszteségmentes lemez hangsugárzása [IV.8]	97
4.3.4.	Véges kiterjedésű, veszteséges lemez hangsugárzása [4.1], [4.2]	98
4.4.	Homogén, egyhjú szerkezetek léghanggátlásának közelítései	99
4.4.1.	Az áttekintés céljai	99
4.4.2.	A legegyszerűbb közelítés	100
4.4.3.	Hajlítórezgést végző lemez léghanggátlása [IV.8]	101
4.4.4.	Homogén, egyhjú szerkezetek léghanggátlásának meghatározása a határfrekvencia felett, a reciprocitás elvének felhasználásával [IV.8]	102
4.4.5.	Grafikus és számításos közelítés a tömör, homogén épületszerkezetek hanggátlásának meghatározására a frekvencia függvényében [IV.10]	105
4.4.6.	Homogén, egyhjú szerkezetek súlyozott léghanggátlási számának meghatározása a fajlagos tömeg alapján	106
4.5.	Üreges elemekből álló szerkezetek léghanggátlása	107
4.5.1.	Üreges falazóelemek	107
4.5.2.	Hőszigetelési célból kifejlesztett, üreges falazóelemekből készült falazat léghanggátlása	107
4.6.	Az ideális kéthjú szerkezet léghanggátlása [4.12], [4.13]	109
4.7.	Hajlékony lemezekből felépülő, valóságos kéthjú szerkezetek léghanggátlása [4.13]	111
4.8.	Nehéz, merev lemezből és hajlékony lemezből felépülő, valóságos kéthjú szerkezetek léghanggátlása (hanggátlást javító falburkolatok) [IV.8], [IV.1]	112

4.9.	Födémek szabványos lépéshangnyomásszintjének értelmezése [IV.7]	114
4.10.	Úszópadló lépéshang-szigetelést javító hatásának modellezése	115
4.11.	Szerkezeti csomópontok rezgésgátlása és a rezgésgátlás hatása az épületszerkezetek hangszigetelésére	118
4.11.1.	Hullámfajták beérkezése, visszaverődése és átvitele [IV.8], [IV.2]	118
4.11.2.	Peremfeltételek merev szerkezeti kapcsolatok esetén [IV.8], [IV.2]	121
4.11.3.	Peremfeltételek rugalmas elválasztórétegek alkalmazásakor [4.16], [4.17]	122
4.11.4.	Pillérkapcsolat peremfeltételei [4.16], [4.17]	122
4.11.5.	Példák II alakú csomópont tulajdonságaira	123
4.11.6.	Aszimmetrikus, T alakú csomópont megoldása [4.18]	125
4.11.7.	Merev peremkapcsolatokkal kivitelezett kettős falak léghanggátlása kerülőutak nélküli laboratóriumban	126
4.11.8.	Rugalmas peremkapcsolatokkal kivitelezett kettős falak léghanggátlása kerülőutak nélküli laboratóriumban	127
4.12.	Összetett szerkezetek eredő léghangszigetelésének meghatározása	129
4.13.	Hangelnyelő szerkezetek működésének modellezése	130
5.	Építési termékek akusztikai jellemzői	134
5.1.	A termék- és szerkezetjellemzők meghatározásának célja	134
5.2.	Szálás szigetelőanyagok fajlagos áramlási ellenállása [II.24]	134
5.3.	Rugalmas lemezek dinamikai rugalmassági modulusai és veszteségi tényezői	135
5.4.	Szerkezetek fajlagos tömege	138
5.5.	Épületszerkezetek határfrekvenciája [IV.6]	138
5.6.	Elemek hangelnyelési tényezője és egyenértékű hangelnyelési felülete [II.25]	138
5.7.	Épületszerkezetek közvetlen léghanggátlási száma [II.11]	139
5.8.	Nehéz falak, födémek veszteségi tényezője [II.11], [IV.8]	141
5.9.	Elválasztó- és átmenőszerkezetek szabványos hangnyomásszint-különbsége	141
5.10.	Átmenőszerkezetek hosszirányú léghanggátlási száma [II.27]	142
5.11.	Burkolatok léghanggátlás-javítása	143
5.12.	Födémek szabványos lépéshangnyomásszintje [II.14]	144
5.13.	Padlóburkolatok szabványos lépéshangnyomásszintjének csökkenése [II.16]	144
5.14.	Egyadatos mennyiségek a léghangszigetelés értékelésére [II.20]	145
5.15.	Egyadatos mennyiségek a lépéshang-szigetelés értékelésére [II.21]	148
5.16.	Egyadatos mennyiség a hangelnyelési tényező értékelésére [II.29]	149
5.17.	Vízellátási berendezések szerelvény-hangnyomásszintje és szerelvény A hangnyomás- szintje [II.30], [II.31]	150
6.	Az épített környezet akusztikai minőségét kifejező fogalmak, mennyiségek	152
6.1.	Az épített környezet akusztikai minőségét kifejező fogalmak, mennyiségek rendszere	152
6.2.	Az A L_A hangnyomásszint [II.1], [II.2]	154
6.3.	Az L_{Aeq} egyenértékű A hangnyomásszint [II.1], [II.2]	156
6.4.	Az L_{AM} megítélési szint [II.1]	156
6.5.	Az $L_{A,24h}$ (L_{den}) napi megítélési szint [II.1], [II.3] és az L_{night} éjszakai megítélési szint [II.3] ...	157
6.6.	Az L_{AMax} maximális A hangnyomásszint	159
6.7.	A munkahelyi zaj jellemzése	159
6.8.	10%-os, 90%-os, 95%-os (L_{10} , L_{90} , L_{95}) A hangnyomásszint	159
6.9.	Az L_{AX} zajeseményszint és kapcsolata az egyenértékű A hangnyomásszinttel [II.1]	159
6.10.	A közlekedés által okozott környezeti zaj jellemzése [II.6]–[II.9]	160
6.11.	Helyszíni léghanggátlási szám és helyszíni súlyozott léghanggátlási szám épületen belül, egymás mellett vagy egymás felett levő helyiségek között (R' , [II.12], R'_w , [II.20])	161
6.12.	Homlokzati szerkezetek helyszíni léghanggátlási száma és helyszíni súlyozott léghang- gátlási száma (R'_{tr} , R'_y [II.13], R'_{wtr} , R'_{wy} [II.20])	163

6.13.	Helyszíni szabványos lépéshangnyomásszint és súlyozott helyszíni szabványos lépéshangnyomásszint (L'_n [II.15], L'_{nw} [II.21])	164
6.14.	Utózengetési idő helyiségekben [II.26]	165
7.	A környezeti zaj hatása az emberre. Akusztikai követelmények	167
7.1.	A környezeti zaj hatása az emberre	167
7.1.1.	A hangjelenségek és az ember kapcsolata	167
7.1.2.	A környezeti hangjelenségek közvetlen, rövid távú hatása az ember élettani folyamataira	167
7.1.3.	A környezeti hangjelenségek hosszú távú hatása az emberre [7.2], [7.3]	168
7.1.4.	A környezeti hangjelenségek hatása az alvásállapotra [7.3] [7.5]	168
7.1.5.	A közlekedési zaj zavaró hatása	169
7.1.6.	Az impulzusos jellegű zaj hatása	170
7.1.7.	A környezeti zaj hatása a teljesítőképességre	170
7.1.8.	Az alapzaj és az utózengetési idő hatása a szövegértésre, helyiségekben	170
7.1.9.	A helyiségek közötti hangszigetelés és a szeparáltság kapcsolata	172
7.1.10.	Halláskárosodás	173
7.1.11.	A környezeti zaj zavaró hatását befolyásoló tényezők	174
7.2.	Az épületek akusztikai tervezésének számszerű céljai (akusztikai követelmények)	174
7.2.1.	Az akusztikai követelmények rendszere	174
7.2.2.	Zajhatárértékek üzemi létesítményektől származó zajra, épületen kívül [1.5]	176
7.2.3.	Zajhatárértékek építkezésektől származó zajra, épületen kívül [1.5]	176
7.2.4.	Közlekedési zajra vonatkozó zajhatárérték, épületen kívül [1.5]	177
7.2.5.	Zajterhelési határértékek épületek zajtól védendő helyiségeiben [1.5], [1.1], [1.2], [1.3]	178
7.2.6.	Zajhatárértékek munkahelyeken [II.4], [I.1]	179
7.2.7.	Hangszigetelési követelmények többlakásos lakóépületek, sorházak, szállodák, kórházak és üdülők helyiségei között	177
7.2.8.	Hangszigetelési követelmények irodák és iskolák helyiségei között	180
7.2.9.	Homlokzati szerkezetekre vonatkozó hangszigetelési követelmények	183
7.2.10.	A helyiségek teremakusztikai követelményei	183
7.3.	A zajhatárértékek értelmezése	184
8.	Építési termékek akusztikai jellemzői	188
8.1.	Az áttekintés célja	188
8.2.	Kerámia, gipsz vagy könnyűbeton, pórusbeton alapanyagú, egy- és kéthéjű falak léghanggátlása	189
8.2.1.	Kerámia alapanyagú, egyhéjű falak léghanggátlása (8.2. táblázat)	189
8.2.2.	Gipsz, beton vagy könnyűbeton, pórusbeton alapanyagú, merev peremkapcsolatokkal beépített, egyhéjű falazatok léghanggátlása	190
8.2.3.	Merev peremkapcsolatokkal kialakított, kerámia, gipsz vagy könnyűbeton falazóelemekből készült, kéthéjű falazatok léghanggátlása	190
8.2.4.	Rugalmas peremkapcsolatokkal kialakított, kéthéjű falazatok léghanggátlása	191
8.3.	Szerelt szerkezetek akusztikai jellemzői	191
8.3.1.	Szerelt falak léghanggátlása	191
8.3.2.	A szerelt falak peremei mentén átmenő szerkezeteken keresztül kialakuló hangterjedési utak hosszirányú léghanggátlása	193
8.3.3.	Álmennyezetek hangszigeteléssel összefüggő adatai	193
8.3.4.	Álmennyezetek hangelnyelési tényezője	196
8.4.	Födémek hangszigetelési tulajdonságai	197
8.5.	Padlóburkolatok hangszigetelést javító hatása	198
8.6.	Úsztatórétegek fajlagos dinamikai merevsége	198
8.7.	Rezgésszigetelő lemezek akusztikai adatai	199
8.8.	Ablakok, erkélyajtók léghanggátlása	200

8.9.	Ajtók hangszigetelése	201
8.10.	Berendezési tárgyak, burkolatok, határolószerkezetek személyek hangelnyelési tényezője és egyenértékű hangelnyelési felülete	201
9.	Méretezési módszerek és elvi alapjaik	203
9.1.	A méretezési módszerek célja, alkalmazási területei	203
9.2.	Helyiségek külső határolószerkezeteinek méretezése a közlekedési zaj elleni védelem szempontjából	204
9.2.1.	A méretezés elvi alapjai	204
9.2.2.	A homlokzati szerkezet szükséges hanggátlásának kiszámítása [III.5] alapján	205
9.2.3.	A hazai határértékrendszerhez illeszkedő, a zaj ellen védendő helyiség homlokzatára vonatkozó szigetelési igény meghatározásának fizikai alapjai	206
9.2.4.	A szigetelési igény realizálásának módszere	207
9.2.5.	Illeszkedés a hazai zajhatárértékekhez	208
9.3.	Helyiségek közötti léghangszigetelés méretezése a hazai szerkezetválaszték figyelembevételével a [III.2] továbbfejlesztése alapján	208
9.3.1.	A méretezési módszer alkalmazási területei	208
9.3.2.	A méretezési módszer elvi alapjai	209
9.3.3.	A méretezés lépései	217
9.3.4.	Számított eredmények értékelése	217
9.4.	Helyiségek közötti léghangszigetelés méretezése a [III.7] szabvány szerint	217
9.4.1.	A méretezési módszer alkalmazási területei	217
9.4.2.	A méretezési módszer elvi alapjai	218
9.4.3.	A méretezés lépései	224
9.4.4.	A számított eredmények értékelése	224
9.5.	Egymás melletti helyiségek közötti léghanggátlás méretezése, ha a válaszfal szerelt szerkezet az [I.12] alapján	224
9.5.1.	A méretezési módszer alkalmazási területei	224
9.5.2.	A méretezési módszer alapjai	224
9.5.3.	A méretezés lépései	225
9.5.4.	A számított eredmények értékelése	226
9.6.	Helyiségek közötti lépéshangszigetelés méretezése a hazai szerkezetválaszték figyelembevételével [III.2]	226
9.6.1.	A méretezés alapjai	226
9.6.2.	A méretezési módszer elméleti alapja	226
9.6.3.	A méretezés lépései	228
9.6.4.	A számított eredmények értékelése	229
9.7.	Helyiségek közötti lépéshangszigetelés méretezése a [III.8] felhasználásával	229
9.7.1.	A méretezés alapjai	229
9.7.2.	A méretezési módszer elméleti alapja	229
9.7.3.	A méretezés lépései	230
9.7.4.	A számított eredmények értékelése	230
9.7.5.	Egyszerűsített becslés helyszíni, szabványos lépéshangnyomásszint meghatározására	230
9.8.	Becslés födém szerkezet helyszíni súlyozott, szabványos lépéshangnyomásszintjének meghatározására	231
9.9.	Vízellátási berendezések típusának kiválasztása a szerelvényzaj alapján az [I.12], [IV.2], [IV.11] szerint	231
9.9.1.	A feladat értelmezése	231
9.9.2.	A zajkeltés néhány sajátossága	232
9.9.3.	A szerelvények alkalmazhatósága a szerelvény A hangnyomásszint-kategóriái alapján [I.12], [IV.11], [IV.2]	232
9.9.4.	A folyamat további elemeinek zajcsökkentése	233

9.9.5. Előnyös alaprajzi elrendezések a vízellátási berendezések okozta zaj szempontjából	234
9.10. Üzemi létesítmények zajkibocsátása	234
9.10.1. A méretezés tárgya és keretei	234
9.10.2. A méretezési módszer elvi alapjai	235
9.10.3. A méretezés lépései	238
9.10.4. A számított eredmények értékelése	238
9.11. Helyiségek utószegési idejének és egyenértékű hangelnyelési felületének meghatározása	239
9.11.1. A méretezés tárgya és keretei	239
9.11.2. A számítási módszer elvi alapjai	239
9.11.3. A helyiségek utószegési ideje beállításának lépései	240
9.11.4. A számított eredmények értékelése	240
10. Épületek akusztikai tervezése. Példák	241
10.1. Kialakult városi környezetben létesítendő, többlakásos lakóépület tervezésének akusztikai feladatai	241
10.1.1. A feladat	241
10.1.2. Akusztikai követelmények	242
10.1.3. Elemzés	244
10.1.4. Tervezési lépések, eredmények	245
10.1.5. Összefoglalás	252
10.2. Kialakult városi környezetben levő, központi gépészeti berendezésekkel ellátott több-lakásos lakóépület tervezésének akusztikai feladatai	252
10.2.1. A feladat	253
10.2.2. Akusztikai követelmények	254
10.2.3. Elemzés	254
10.2.4. Tervezési lépések, eredmények	254
10.3. Egymás melletti lakások helyiségei közötti léghangszigetelés megoldása rugalmas peremkapcsolatokkal kivitelezett, kéthéjű falakkal	258
10.3.1. A feladat	258
10.3.2. Akusztikai követelmények	259
10.3.3. Elemzés	259
10.3.4. A lakások közötti hangszigetelés megoldása rugalmas peremkapcsolatokkal kivitelezett, kéthéjű falszerkezetekkel	260
10.3.5. Értékelés	262
10.4. Kialakult városi környezetben levő, szerelt szerkezetekkel felújítandó, többszintes, vasbetonvázas épület egy irodai szintjének akusztikai tervezési feladatai	262
10.4.1. A feladat	262
10.4.2. Akusztikai követelmények	263
10.4.3. Elemzés	265
10.4.4. Tervezési lépések, eredmények, megoldások	265
10.5. Helyiség utószegési idejének beállítása	269
10.5.1. A feladat	269
10.5.2. A tervezési cél	269
10.5.3. Tervezési lépések, eredmények	270
Irodalom	272

SZEMÉLYES HANGÚ ELŐSZÓ

lectori salutem – tisztelet az olvasóknak

Amikor néhány évvel ezelőtt először felmerült bennem egy épületakusztika tárgyú könyv megírásának gondolata, nagyon gyorsan eldöntöttem, hogy nem fogok „önmagában való” akusztika tárgyú könyvet írni. Nem azért, mert nem lenne szép és egyúttal rangos teljesítmény ilyen megközelítésű könyv kidolgozása, hanem azért, mert napjainkban, felgyorsult, piaci orientáltságú világunkban talán másra van szükség.

A marketingfelfogás jegyében – lehet, hogy sokakban e kifejezés hatására negatív érzelmek ébrednek – többi között a következő szempontokat határoztam el:

- mérlegelni fogom, hogy hazánkban a közeli, de belátható jövőben mik lehetnek az épített környezet létrehozásához kapcsolódó akusztikai feladatok;
- mérlegelni fogom, hogy e feladatokat milyen alapképzettségű szakembereknek kell majd megoldaniuk;
- fel fogom idézni, hogy amikor 20 évvel ezelőtt az épületakusztika tématerületére jutottam, mik voltak az ismeretszerzés, tanulás, tapasztalás nehézségei;
- mérlegelni fogom, mi lehet az oka annak, hogy az akusztikai minőség létrehozásának munkafolyamata kisebb társadalmi megbecsülést élvez, mint... (a három pont helyére sok minden gondolható, a reális, előremutató összehasonlítást a közeli szakterületekkel kell elvégeznie);
- megvizsgálom az épített környezet létrehozásának folyamatát, és keresni fogom a kapcsolódási pontokat, beleértve azt is, hogy az akusztikai tervezés munkafolyamata és annak dokumentáltsága hasonlítson a többi szakág munkafolyamatainak dokumentáltságához.

Néhány, az utóbbi időben magyar nyelven megjelent könyv olvasása közben kialakult benyomásaimat felfrissítve eldöntöttem azt is, hogy a stílus teljesen tárgyilagos, száraz, személytelen lesz, mert

el kell kerülni az atyáskodó, gondolatban vállon vergető szófordulatokat, a többes szám első személy használatát. A stílushoz tartozónak éreztem azt is, hogy törekedni kell a világos magyarázóábrák alkalmazására. Egy elméleti levezetés megértése során a legkönnyebb út az volt, ha térben és folyamatban elképzeltem jelenséget. Az akusztikus tárgyú könyvekben általában elég gyenge az ábraanyag.

Az általam megismert könyvek, cikkek – legyenek elméleti vagy gyakorlati karakterűek – jellemzően leíró jellegűek. Nem találtam olyan szakmai anyagot, amely az akusztikai tervezésről szólt volna, tehát bemutatta volna, hogy egy ábrával és szöveges anyaggal megadott tervdokumentációból hogyan lehet felismerni az akusztikai részfeladatokat, és a problémafelismerést hogyan követik a megoldáshoz elvezető lépések.

A szakma rangja is, az eredményes tervezői munka is megköveteli a korrekt elméleti ismereteket. A gyakorlatban folyó akusztikai tervezéssel kapcsolatos fenntartások egy része valószínűleg abból ered, hogy az egy létesítményen, más szakterületeken, de együtt dolgozó szakemberek nem látják azt, hogy az akusztikai tervezés lépéseinek mi az elméleti háttere, és hogy az egyes megoldási javaslatoknak mik a gyökerei. Ezért már a kezdeti elképzelések között is szerepelt az elméleti ismeretek valamilyen mértékű áttekintése. Természetesen reálisan kell gondolkodni: az elméleti anyag bemutatását külső megjelenésében is két részre kell osztani: egyik rész mindenkinek szólhat, a másik rész azoknak, akiknek megvannak a szükséges matematikai, fizikai alapjai. Az olvasóra kell azonban bízni azt, hogy milyen módon és melyik fejezetből veszi ki a számára szükséges ismereteket.

A könyv megírására vonatkozó elhatározásomat több alkalommal követte érdeklődő kollégák kérdése: kinek szól a könyv. Tulajdonképpen ez egy alapvető kérdés. Azonban minden válasz szűkítő jellegű, ezért a személyes válaszom így szól: min-

denkinek, aki elolvassa. Nem célszerű alapképzetség, szakma alapján csoportokat kizárni a lehetséges olvasók közül, sokkal inkább – elméleti és gyakorlati példákon keresztül – szélesebb közönséghez kell szólani. Bízni kell a tisztelt olvasóban: mindenki ki tudja választani azokat az ismereteket, amelyekre szüksége van. A korábban már említett grafikai megjelenés a kiválasztásban azért segíthet.

A szakirodalom feldolgozása során arra törekedtem, hogy az eredeti forrásokat megtaláljam. Ez sokszor szellemi örömet is szerzett. Igaz, hogy több esetben a hivatkozottnál újabb, talán korszerűbb elméleti ismeretek is vannak már, de ezek gyökere, kiindulása a korábban született szakmai anyagokban rejlik. És már akkor is készültek akusztikai szempontból jó minőségű épületek, jól megtervezett szerkezetek.

Az épített környezet akusztikai minőségének létrehozása terén szakmai feladatokat megoldók együttműködésére vannak kényszerítve: az akusztikai feladatok a teljes folyamat szempontjából részfeladatok csupán, ha a megoldás harmonikus, kiegyenlített, akkor belesimulnak az eredmények so-

rába. Ebből a szempontból az Épületszerkezettani és Épületgépészeti Intézet ösztönző, gyümölcsöző szellemi környezet, tág teret enged és lehetőséget ad a szakmai részfeladatok művelésének, és felfogásában, napi gyakorlatában magában hordozza a szintézis megvalósulását is.

Értelmes, hasznos könyv a mi szakmánkban nem születhet önálló elméleti és gyakorlati munka nélkül. E munkákat sohasem egy ember végzi. Így tehát gondolni kell a tárgyi és személyi feltételekre is. A személyes hangú előszó végén köszönetet mondok mindazoknak, akik a könyv megszületését, illetve az elmúlt évek szakmai munkáját

- konkrét feladatok megoldására vonatkozó megbízásokkal,
- elméleti kutatások, stúdiumok folytatását lehetővé tevő kutatási programokkal,
- korrekt mérési, rajzi munka elvégzésével,
- tárgyilagos, szigorú, de azért a szerző habitusát, gondolkodásmódját elfogadó kritikai észrevételekkel,
- tárgyilagos, megalapozott vélemény-nyilvánítással, ötletekkel és lehetőségek adásával segítették.

1.

BEVEZETÉS

1.1. A könyv tárgya (I.)

A könyv az épületléptékű tervezéshez kapcsolódó akusztikai (rész-)feladatok elméleti alapjait és gyakorlati munkarészeit, megoldásait tekinti át. Az épületléptékű tervezés a beruházási döntés előkészítésétől a hibák kijavításának megtervezéséig, majd az épületfelújítások megtervezéséig tartó folyamat, amely egyes épületekre vagy épületcsoportokra irányul. Az épületek kialakult városi környezetben helyezkednek el, emiatt számos külső meghatározottsággal kell számolni.

Az épített környezet tervezése alapján véve két nagy feladatkörre osztható:

- a települések, településrészek tervezése;
- egyes épületek, épületcsoportok tervezése.

A két feladatkör egymástól nem független, kölcsönös viszonyukat egyenes és visszacsatolási kapcsolatok egyaránt jellemzik. A lényegyet tekintve mégis megállapítható, hogy a települések, településrészek jelentik a keretet, a külső környezetet, amelyben egy meghatározott épületet el kell helyezni. A külső környezet sajátosságai sok olyan meghatározottságot eredményeznek, amelyek az épület belső tereinek akusztikai minőségét befolyásolják, illetve a belső terek akusztikai minőségének létrehozása érdekében egyes határolószervezetekre, berendezésekre minőségi követelményeket támasztanak.

A Magyarországon az utóbbi időben megvalósult épületeket áttekintve megállapítható, hogy – különösen Budapesten – a nagy létesítmények, összetett középületek tervezése során akusztikai feladatokat is kidolgoznak. A nagyobb tervezőszervezetek nem egyszer beillesztik munkafolyamatukba az akusztikai tervezés munkarészeit.

A kisebb létesítmények – kisebb-nagyobb társasház, egyszerűbb, hazai beruházásban megvalósuló szálloda, nyugdíjsház, kisebb vagy közepes üzem stb. – tervezése során gyakran nem készül akusztikai munkarész, vagy csak korábban készült mun-

karészek „adaptálása” történik meg. Időnként az is tapasztalható, hogy *nem* azért készülnek akusztikai munkarészek, mert általánosan elismert lenne, hogy a teljes létesítmény minőségének az akusztikai minőség is része, hanem azért, mert a hatóságok keresik az akusztikai minőség megalapozását végző szakmai anyagokat. Az akusztikai tárgyú munkarész elmaradása mellett sokkal nagyobb baj az, hogy az akusztikai minőség létrehozásának gondolatai, sajátos szempontjai is elmaradnak. Ezért a könyv a gyakorlati ismereteket úgy válogatta össze, hogy elsősorban a leggyakrabban előforduló épülettípusok, tehát a szolgáltató-, kereskedelmi egységeket is tartalmazó társasházak, épületfelújítás keretében megvalósuló kisebb irodai egységek stb. akusztikai minőségének létrehozását segítse. Az egyszerűbb feladatok tapasztalatai könnyen általánosíthatók összetettebb, komplex létesítmények megoldása során. Bármilyen feladat megoldásának első lépése a feladat felismerése.

A feladat gyakorisága miatt a könyvnek nem tárgya a zenei célú terek, színházak, próbatermek akusztikai tervezésének ismertetése, ilyen feladatokra felkészült szakemberek találhatók hazánkban is.

1.2. A könyv tárgya (II.)

Az elmúlt években megjelent magyar nyelvű akusztikai tárgyú könyveket áttekintve megállapítható, hogy több évtizedes hiány alakult már ki az épületakusztika elméleti alapjait feldolgozó, ismertető könyvek megjelenésében. Az oktatási tapasztalatok azt mutatják, hogy mind a graduális, mind a posztgraduális képzésben a hallgatóknak erősen korlátozott az a képessége, hogy idegen nyelven sajátítsanak el olyan műszaki ismereteket, amelyek nem szorosan kapcsolódnak az alapképzéshez, ezért az idegen nyelvű szókincs, a matematikai-fizikai alapok, az épületfizikai, épületszerkezettani alapok

valamelyik része hiányzik. Ezért a könyv meglehetősen nagy teret szentel a fizikai alapok ismertetésének.

Napjainkban az általános nemzetközi tendencia az, hogy az akusztikai minőséget számítással kell a tervezés időszakában igazolni. Nem elegendő a tervező nyilatkozata. A számítási módszerek – méretezési módszerek – egy része nemzetközi szabványokban már megjelent. E szabványok honosítása folyamatos, de sem a keletkező magyar nyelvű dokumentumok, sem az eredeti angol, francia vagy német nyelvű anyagok nem alkalmasak arra, hogy azokból a fizikai alapokat meg lehessen tanulni. A méretezési eljárások másik része idegen nyelven régóta hozzáférhető, és a nemzetközi környezetben dolgozó, az utóbbi években Magyarországon is megjelent építőipari vállalatok – főleg anyag- és szerkezetgyártók – szellemi bázisához hozzátartozik. Az itt található ismereteket azonban idegen nyelven nehéz elsajátítani. Ezért látszott szükségesnek az épületek akusztikai tervezéséhez szükséges elméleti alapokat magyar nyelven is feldolgozni, ismertetni. Tulajdonképpen a könyv tematikájának elméleti része jelentős részben a méretezési szabványok megértéséhez és szakszerű alkalmazásához szükséges fogalmakból, jelenségekből, elméleti ismeretekből tevődik össze.

1.3. Előzetes ismeretek

Az épületek akusztikai minőségével összefüggő kutatási-fejlesztési és gyakorlati feladatok igényes, a módszerek fejlesztését is magában foglaló megoldása, ha nem is öttusázó, de legalább háromtusázó jellegű ismereteket feltételez:

I. építészeti ismeretek, elsősorban

- a) építőanyagok;
- b) épületszerkezettan (a megvalósítás tudománya és művészete), nemcsak a kurrens, hanem a hagyományos, történeti szerkezetekre is kiterjedően;
- c) az épületfizika más anyagrészei;
- d) általános építészeti ismeretek;

II. matematikai-fizikai ismeretek, elsősorban

- a) mechanika;
- b) hangsúlyosan a hullámterjedéshez tartozó alapok és szemlélet;
- c) differenciálegyenletek és megoldásaik;
- d) komplex algebra és analízis;

III. villamosmérnöki ismeretek, pl.

- e) méréstechnikai és jelfeldolgozás;

f) programozás;

g) lehetséges szemléleti pilléreként az elektromechanikai analógia és szemlélet.

Csak szemléltetésként néhány példa az előzetes ismeretekre az előbbi témakörökben:

- hőszigetelő anyagok és jellemzőik, habarcsok, falazatok fajtái és kapcsolataik, helyiségek légárlapotának összetevői stb.;
- Fourier-integrál, Laplace-transzformáció, konvolúció, Dirac-delta stb.;
- hajlítás, nyírás, másod- és negyedrendű differenciálegyenlet megoldásai, komplex számok jelentése stb.

Az előzetes ismeretek megszerzésére számos magyar nyelvű könyv, egyetemi jegyzet áll rendelkezésre, ezért ezek ismertetésétől vagy akár összefoglalásától el lehet tekinteni. A sokirányú kapcsolódó ismereteket figyelembe véve az akusztikai anyag összefoglalása két síkon valósult meg:

- apró betűkkel szedett formában az erősebb matematikai-fizikai alapokkal rendelkezők számára található akusztikai tárgy elméleti áttekintés;
- a legfontosabb ismereteket normál betűmérettel szedett, leíró jellegű, a tendenciákat összefoglaló részek tárgyalják.

A gyakorlati tervezés iránt érdeklődők az apróbetűs részeket elhagyhatják, az akusztikai tervezéshez szükséges leíró jellegű ismeretek megértéséhez a középiskolás matematika, fizika anyagának ismerete általában elegendő. Az építészeti, különösen az épületszerkezettani tudás azonban mind az elméleti, mind a gyakorlati feladatok számára nélkülözhetetlen.

1.4. Az akusztikai tervezés és az építészeti tervezés kapcsolatai az épületléptékű tervezési feladatok megoldásában

Az épületléptékű tervezés során egy feladat általában a következő szempontsor alapján indul el:

- I. kialakult városi környezetben létre kell hozni,
- II. meghatározott rendeltetésű,
- III. meghatározott méretekkel és más kapacitásadatokkal jellemezhető,
- IV. meghatározott belső és külső funkcionális kapcsolatokkal rendelkező épületet.

Az I. szempont többirányú kapcsolatot jelent:

- a környezet – a közlekedés, a távolságok, a szomszédos épületek és területek rendeltetésszerű használata miatt – meghatározandó nagyságú, jel-

legzetes, adottságként kezelendő külső akusztikai terhelést okoz, egyszerűbben szólva a környezeti zaj terheli az épület külső határolószerveit;

- a környezet – területi besorolása, rendeltetése, távolsági viszonyai és a szomszédságban található más épületek száma alapján adódó – egyik sajátossága az, hogy a tervezési feladatban szereplő épület milyen nagyságú zajt bocsáthat ki.

A II. szempont – tehát az, hogy a tervezési folyamatban eldől az épület és helyiségei rendeltetése – azt jelenti, hogy az épület helyiségeinek akusztikai minősége mint tervezési cél az épület és helyiségei rendeltetésétől függ. A helyiségek funkciójának meghatározása egyértelműen a zajhatárértékek, ill. a hangszigetelési követelmények előírását is jelenti. Az épület funkciója a környezethez fűződő számos kapcsolatot maga után von, elég csak a kereskedelmi vagy egészségügyi létesítményekhez tartozó szállításokra, a szórakoztató létesítményekhez kapcsolódó tömeges ügyfélforgalomra és ezek időbeli sajátosságaira gondolni.

A III. szempont a II. szempont kiegészítése a mennyiségi sajátosságok alapján.

A IV. szempont végső soron a helyiségek, belső területek egymás közötti és az épületen kívüli területek irányába mutató térbeli kapcsolatai alapján a határolószervek szigetelési igényeinek minimumát és a berendezések emissziójának maximumát eredményezi.

A különböző tervfajtákat, döntési csomópontokat számításba véve a következő kapcsolati pontok emelhetők ki:

A) Beruházási program, beruházási döntés:

a beruházási program létrejötte lényegében az I–IV. szempontok előzetes meghatározását jelenti, tehát megadja az akusztikai részfeladatokat, valamint részlegesen az akusztikai minőség szükséges értékeit (követelmények); ha e munkarészben érvényesülnek az akusztikai minőség létrehozására irányuló sajátos gondolatok, akkor a szerkezetválasztás, berendezéstelepítés egyszerűbben megoldható, esetleg olcsóbb szerkezetek felhasználását eredményezi.

B) Különböző célú és szintű engedélyezési tervek: *az engedélyezési tervek véglegesítik a megoldandó feladatokat, valamint bemutatják a feladatok megoldásának fő elemeit és irányait; ennek megfelelően az engedélyezési tervhez csatlakozó akusztikai munkarésznek tartalmaznia kell az akusztikai terheléseket és követelményeket, tervezési célokat (szö-*

veges anyag), valamint a megoldás fő elemei között pl. a következőket:

- a teherhordó szerkezetek típusát az akusztikai minőség alapján;
- a padlóburkolatok típusát;
- a géprögzítések módjait;
- a burkolatok, álmennyezetek típusát;
- a telepítendő berendezések megengedhető akusztikai adatait stb.

C) Tenderterv:

a tenderterv az épületszerkezetekre, berendezésekre és a telepítés módjaira lebontva fejezi ki a megoldást oly módon, hogy meghatározza a szerkezetek, berendezések és telepítési módok akusztikai termékjellemzőinek szükséges minőségét, pl.:

- az ablakok szükséges hanggátlása (termékjellemző) egy feladatban legyen $R_w > 35$ dB;
- a szállodai szobák ajtajának szükséges hanggátlása (termékjellemző) egy feladatban legyen $R_w > 32$ dB;
- az álmennyezet hangelnyelési specifikációja (termékjellemző) egy feladatban legyen $\alpha_w = 0,6$ (M, H);
- a vízellátási berendezések szerelvénykategóriája (termékjellemző) egy feladatban legyen II. minőségi osztályba tartozó, tehát a szerelvény A hangnyomásszintje, L_{ap} ne legyen nagyobb, mint 30 dB;
- a szellőzőberendezések maximális A hangteljesítményszintje (termékjellemző) egy feladatban legyen $L_{AW} < 80$ dB stb.

D) Kiviteli terv:

a kiviteli terv pontosan tartalmazza a szerkezeti részleteket és elemeket, anyagokat, rögzítési módokat, berendezéstípusokat és azok telepítési megoldásait.

E munkarész jellemzően rajzos jellegű, valamint a rajzi anyaghoz kapcsolódó szöveges jellegű műszaki leírás. E munkarészben általában nem sok keresnivalója van pl. az akusztikai követelmények ismertetésének.

1.5. Probléma – megoldandó feladatok

Az épületléptékű tervezéshez kapcsolódó akusztikai részfeladatok megoldásának első lépése a feladat felismerése. Ebben a követelmények ismerete megbízható támaszul szolgálhat.

Azonban van egy másik, a jelenségek lényegére támaszkodó megközelítés is. E megközelítés két pólusra, a zajforrásokra és a zaj ellen védendő területekre tagozódik.

Az épített környezet, tehát az emberi környezet sokféle módon értelmezhető, tagolható. Az akusztikai tervezést jól segíti az, ha a környezetet zajforrásokra és zaj ellen védendő területekre osztják fel. Segít a zajnak fokozottan kitett területek azonosítása is.

A következő felosztás az épületléptékű tervezés akusztikai feladatainak szempontjából készült.

A védendő, vizsgálandó épületen kívül működő zajforrások alapvetően három csoportra oszthatók:

- közlekedési eredetű zajforrások:
 - közúti közlekedés,
 - légi közlekedés,
 - sínhez kötött közlekedés (vasút, villamos);
- üzemi létesítmények, mint zajforrások
- bármely létesítmény épületgépészeti berendezései (klíma, fűtés, szellőzés stb.),
- a védendő épület környezetében levő más épületekben folyó tevékenységek, gépek működése (üzemcsarnokok, sportcsarnokok, textilipari csarnokok, kovácműhely stb.),
- kültérben működő, oda telepített gépek, berendezések,
- a telephelyeken folyó anyagmozgatás;
- építkezések gépei és tevékenységei.

A vizsgált épület belső zajforrásait részben az épület belső, zaj ellen védendő területei, részben az épület külső környezetének zaj elleni védelme szempontjából kell számba venni:

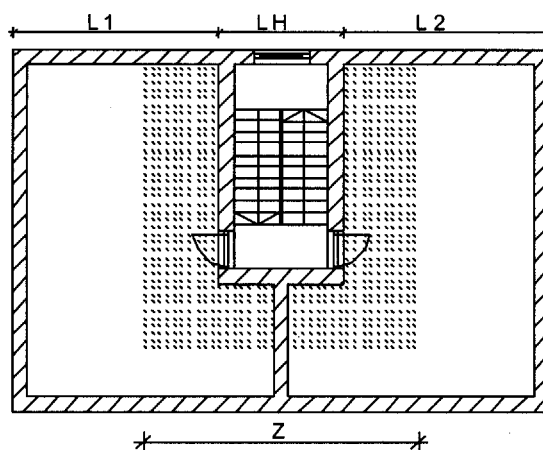
- az épület technikai berendezései;
- a helyiségek rendeltetésszerű használata;
- az épületen belüli ipari, kereskedelmi, szolgáltató tevékenység és annak berendezései.

A zaj ellen védendő területek, helyiségek emberi tartózkodásra, pihenésre, tanulásra, munkavégzésre és szórakozásra szolgálnak. Lakásban pl. a szobák általánosan zaj ellen védendő helyiségek, a fürdőszoba, Wc, kamra, tárolóhelyiség általánosan nem zaj ellen védendő. A konyha bizonyos feltételekkel és korlátozottan zaj ellen védendő lehet.

A zajnak fokozott mértékben kitett területek azonosítása az akusztikai tervezés szempontjából hasznos. Az akusztikai igények könnyebben teljesíthetők, ha ilyen területekre zaj ellen védendő helyiség nem kerül. Számos megvalósult tervet áttekintve megállapítható, hogy ez a szempont nem szokott a gyakorlatban érvényesülni, ezért a zajnak fokozott mértékben kitett területek azonosítására célszerű néhány példát ismertetni. Az a gondolkodásmód, amely nemcsak a zajforrásokat, hanem a zajnak fokozottan kitett területeket is azonosítja, jól kidolgozva az [1.1] irodalomban található meg. Ezt a

szemléletet hasznosítja többek között a [III.2] tervezési segédlet is. Egyébként az [1.1] minden érdeke mellett egy szempontból meglehetősen rossz példát mutat: látható kísérleti igazolás, akusztikai mérések nélkül javasol szerkezeti megoldásokat. A beépítési kísérletek nagy előnye az, hogy mindig felfedik a hibákat...

A zajnak fokozottan kitett területek azonosításának első példája az 1.1. ábrán látható, ahol a lépcsőház, belső közlekedőterület környezete a zajnak fokozottan kitett terület. A zajforrás helye maga a lépcsőház, a közlekedőterület. Ennek használata sem időben, sem a használat jellege, intenzitása szempontjából nem korlátozható, ezért e terület melletti helyiségeket fokozottabb akusztikai terhelés éri. Nehezebben megoldható feladat e területekre lakóhelyiséget úgy telepíteni, hogy az akusztikai követelmények teljesüljenek.

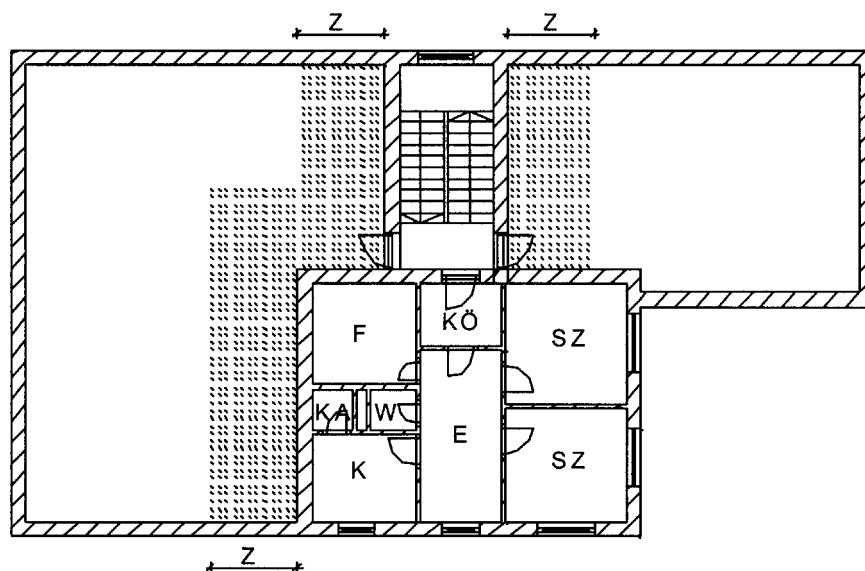


1.1. ábra. Zajnak fokozottan kitett területek lépcsőház, épületen belüli közlekedőterület mellett

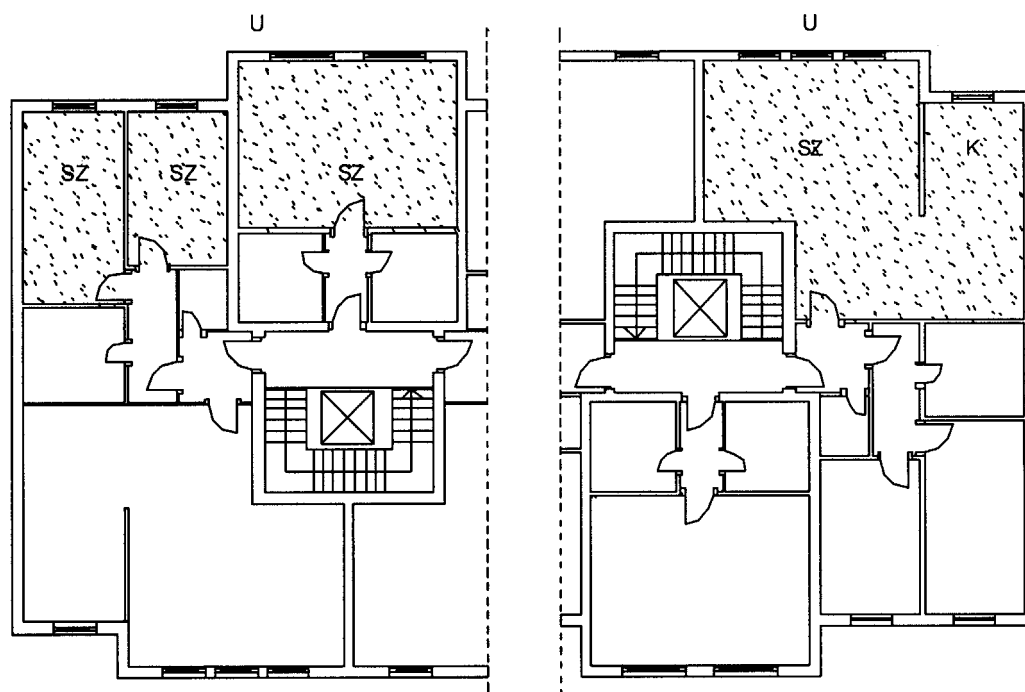
Z zajnak fokozottan kitett terület; LH lépcsőház, ez a zajforrás a példában; L1, L2 lakások

Az 1.2. ábra más alaprajzi elrendezés értelmezését mutatja azonos rendezőelv alapján. Zajnak fokozottan kitett terület részben lépcsőház mellett, részben fürdőszoba, konyha, Wc mellett alakul ki. Ez utóbbi helyiségekben a vízellátási berendezések jelentik a zajforrásokat. Lakóhelyiségek zajhatárértékeit, hangszigetelési követelményeit a pontosított területen nehezebb megoldani.

Az 1.3. ábrán a zajnak fokozottan kitett terület a közlekedés mint általánosan elterjedt zajforrás hatására alakul ki. A bal oldali ábrán az egyik lakásnak van olyan helyisége, amely mindenképpen, bármilyen tájolás mellett a csendes oldalon helyezkedik el, ez előnyös. A lépcsőház melletti kis lakás azonban az adott tájolásban a közlekedési zajhoz



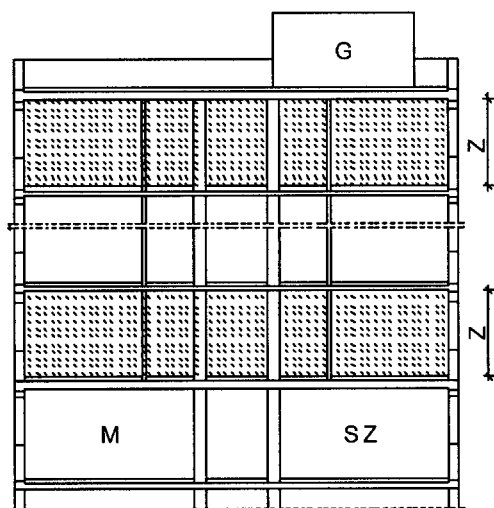
1.2. ábra. Zajnak fokozottan kitett területek lépcsőház, valamint konyha, fürdőszoba mellett
Z zajnak fokozottan kitett terület; *F* fürdőszoba; *KÖ* közlekedő terület; *SZ* szoba; *E* előszoba; *K* konyha; *KA* kamra



1.3. ábra. Közlekedési zajnak fokozottan kitett lakószobák épületen belül
U utca, közlekedés; *SZ* szoba; *K* lakókonyha

képest kedvezőtlen helyzetű. A tájolás megváltoztatásával – ha ez lehetséges – a helyzet kedvezővé válhat. A jobb oldali lakás pontozással kiemelt szobája és lakókonyhája duplán hátrányos helyzetű: mind a közlekedési zaj, mind a lépcsőház mint közlekedőterület zaja erősen terheli azokat. Szerencsére van két előnyös helyzetű lakószoba is...

Az 1.4. ábrán a zajforrás részben az épület egy technikai helyisége, részben a lakóépületbe települt nem lakás rendeltetésű helyisége, szolgáltató- vagy kereskedelmi egység helyisége. Az elhelyezkedés miatt a gépház alatti és a kereskedelmi, szolgáltatói helyiségek feletti, zajnak fokozottan kitett területen találhatók. Az akusztikai előírásokat



1.4. ábra. Zajnak fokozottan kitett területek technikai helyiség és kereskedelmi, szolgáltatóhelyiség környezetében
G gépház; Z zajnak fokozottan kitett terület; M, SZ kereskedelmi, ill. szolgáltatói létesítmény, műhely

e területen csak kiegészítő szerkezetekkel lehet tartani.

A másik pólus annak elismerése, hogy a zaj, származzon épületen belülről vagy kívülről, zavarja, szélsőséges esetben akadályozza a rendeltetéseszerű helyiséghasználatot, egészségre ártalmas. Ezért a zaj ellen védendő helyiségek elhelyezése során a zajforráshoz vagy zajnak kitett területekhez képesti térbeli elhelyezkedés fontos tervezési eszköz.

1.6. Témakörök

Az ember az akusztikai jelenségekkel – bármilyen szempontból – levegőben terjedő hangként, léghangként kerül kapcsolatba. A 2. fejezet a léghang keletkezését és terjedési sajátosságait tekinti át. Épületen belül, helyiségek között a hangterjedés szerkezeti rezgésterjedés formájában is lejátszódik, a 3. fejezet ezért az épületszerkezetekben terjedő rezgések, röviden a testhangterjedés sajátosságaival foglalkozik. A 4. fejezet a kölcsönhatások címet viseli, kifejezve azt, hogy a hangszigetelés, hangelnyelés, hangterjedés alapja a különböző szerkezetek közötti, ill. a szerkezetek és a levegő közötti kölcsönhatás. Az 5. fejezet nem elméleti, hanem gyakorlati megközelítésből az építési termékek akusztikai jellemzőit veszi sorra, a 6. fejezet pedig az épületek környezetének és helyiségeinek akusztikai jellemzőit (zaj, hangszigetelés) foglalja össze. A 7. fejezet második része az akusztikai követelményeket, tehát a tervezési célokat tekinti át, az el-

ső része pedig a környezet akusztikai jellemzői és az ott élő, dolgozó, pihenő emberek szubjektív tapasztalatai, reakciói közötti kapcsolatra mutat példákat. E példák – terjedelmi okok miatt nem bizonyítják – csak szemléltetik azt, hogy az akusztikai határértékek, követelmények mértéktartó kompromisszumokkal az ember sajátosságai alapján alakultak ki. A 8. fejezet építési termékek akusztikai jellemzőire mutat példákat katalógusadatok alapján. A 9. fejezet az engedélyezési terv időszakához illesztve a szerkezetválasztás, berendezésválasztás számításos módszereit tekinti át. A 10. fejezet esettanulmány jellegű feldolgozásban néhány egyszerű példát mutat az akusztikai tervezés lépéseire a probléma felismerésétől a szerkezetek kiválasztásáig. A példákra javasolt megoldások szigorúan a példákhoz kapcsolódnak, nem alkalmazhatók általánosan.

1.7. Szakirodalmi források

Az épületléptékű tervezés akusztikai feladatai jó részt a diffúz léghangtér és diffúz rezgési tér, a síkhullámú, gömbhullámú és hengeres hullámú terjedés, valamint ezek kombinációja elméleti alapjainak alkalmazásával megoldhatók. A valóságos szituációkhoz többek között a térbeli beesési szögek átlagolása révén lehet eljutni. E közelítések mint összetett jelenségek aszimptotikus, átlagos megoldásai több évtizede megfogalmazódtak, és így alkalmazásukról sok gyakorlati tapasztalat gyűlt össze. A szakirodalmi források kiválasztása, feldolgozása során az egyik szempont az eredeti ismeretek megtalálása volt, az eredetiség nemcsak elsődlegességet, időbeliséget jelent, hanem többek között a jelenség lényegi megfogalmazását is.

Az alapvető fontosságú szakkönyvek között ezért néhány olyan is található, amelyre később tételes hivatkozás nem történik. Azonban e könyvek ismerete az akusztikus műveltséghez hozzátartozik, és a szemlélet kialakulásában fontos szerepet játszanak.

1.8. A könyv megjelenésének feltételei

A könyv megírásához a Felsőoktatási Tankönyvpályázaton elnyert támogatás kiindulófeltétel volt. Előfeltételnek kell tekinteni a TERC Kiadó bizalmát és türelmét, amellyel felkarolta e téma kidolgozását.

Az elméleti ismeretek összegyűjtéséhez jelentős mértékben két OTKA kutatás elvégzése járult hozzá:

- Falak rugalmas szerkezeti kapcsolatai a hangszigetelés fokozása érdekében; témaszám: 17 797.
- Inhomogén, periodikus belső felépítésű épületszerkezetek hangszigetelésének kísérleti és elméleti modellezése; témaszám: T 030238.

Két, környezeti zaj elleni védelemmel összefüggő k+f munka segített a zajhatárértékek, hangszigetelési követelmények és az építésügyi szabályozás sokirányú és sok pozitív elemet is tartalmazó kapcsolatának feltárásában:

- Környezetvédelmi kutatás: Az épített környezet zaj elleni védelmének eszközei; 2001; Megbízó: Környezetvédelmi Minisztérium;
- Tanulmány: A környezeti zaj elleni védelem követelményeinek rendszere; 2002; Megbízó: Környezetvédelmi Minisztérium.

A feltételek közé kell sorolni az olyan nagy bonyolultságú épületek tervezéséhez kapcsolódó akusztikai részfeladatok elvégzését, mint amilyen pl. a Vásárcsarnok (BUVÁTI), a WEST-END (FINTA Stúdió) vagy a Sándor-palota (KÖZTI Rt.) volt. E munkák során kristályosodott ki az, hogy foglalkozni kell az építészeti tervezés és az akusztikai tervezés kapcsolataival, és e munkák segítettek a megoldás megtalálásában is.

Az ÉSZÉGI Épületakusztikai Laboratórium létrehozása „csapatmunka” volt, a sikeres befejezéshez nélkülözhetetlen szerepet játszott az Épületszerkezet-tani és Épületgépészeti Intézet mint szellemi környezet munkát segítő, szigorú támogatása [1.2], [1.4]. E szellemi környezet segítette a szintézist teremtő szemlélet kialakulását, és az elengedhetetlen gyakorlati tapasztalatok megszerzését is. A laboratóriumi objektum létrehozása és az akkreditálás feltételeinek teljesítése szintén sok hasznos tapasztalat forrása volt, sok érdekes feladat megoldásának eszközéül szolgált. A kísérleti tapasztala-

tok feldolgozása pedig a tárgyi tudás és az elméleti munkálkodás alapját jelentette. Az oktatási tapasztalatok azt mutatják, hogy annak ellenére, hogy laboratóriumi gyakorlatokat nem könnyű a normál oktatási rendbe beilleszteni, és egy mérő-, kutatólaboratórium oktatási célú hasznosítása többleterőfeszítést igényel, az elérhető eredmények kárpótolnak a ráfordításokért [1.3]. Nem elég csupán rajzolni a valóságot, meg is kell érteni, és ennek egyik módja a laboratóriumi tapasztalatszerzés.

A laboratóriumi építménynek kapacitásainak is köszönhető, hogy több, a fejlett Európa szellemi, műszaki és gazdasági hátterével rendelkező, Magyarországon is működő építőanyag-ipari, épületszerkezeti és kivitelezővállalat számára végezhetünk vizsgálati vagy fejlesztési feladatokat. A Wienerberger Rt., az ALBA-ORTH Kft., a TELISOVER Kft., a CDM, a KÖZÉV Rt., az Austrotherm Kft. hangsúlyosan képviselik azt a fel fogást, amelynek jegyében az akusztikai célú anyagokat, szerkezeteket és berendezéseket ellátják a szükséges termékjellemzőkkel, a készterméket, épületet pedig szakszerű ellenőrzésnek vetik alá. E vállalatok számára folyamatosan végzett munka is, és a tőlük kapott támogatás is előfeltétel volt e könyv elkészültéhez.

Az akusztikai mérések egyik eszköze maga az épített laboratórium, amely mérőeszközként működik. Az eszközök másik része a hagyományos értelemben vett műszer, túlnyomó többségük Brüel&Kjaer gyártmányú. A rendszerelvű gondolkodás széles körben alkalmazható, szép példáját mutatja az, hogy az évtizedek óta működő eszközök és a legújabbak megbízható mérőrendszereket alkotva gond nélkül illeszkednek egymáshoz. Így a gazdasági erőforrásokat tekintve nem túl erős egyetemi kutatóhelyek is jól működő mérőrendszereket tudnak működtetni.

2.

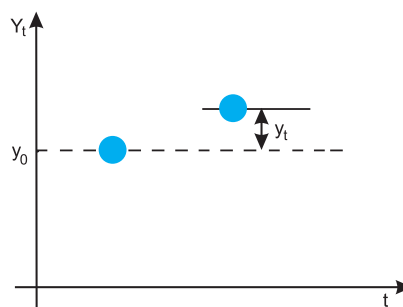
A LÉGHANGTERJEDÉS ALAPJAI

2.1. Rezgés

A rezgés jelenség első megközelítése olyan testet tételez fel, amelynek minden pontja azonos irányban, azonos kitéréssel és sebességgel mozog. Más-
képpen a test bármely két pontja között a távolság a mozgás során állandó. Ez az ideálisan merev test. Kiindulóállapotban rugalmas elemekkel támasztották meg, nyugalomban van, ezt nyugalmi helyzetnek nevezik. A nyugalmi helyzet nemcsak a merev test és a rugalmas alátámasztások geometriai helyzetét, a rugalmas alátámasztások deformációját, hanem a merev testre ható erőket, a rugalmas megtámasztásokban ébredő erőket és nyomatékokat is jelenti.

Ha a merev testre külső erő vagy nyomaték hat, a test kitér nyugalmi helyzetéből. Az épületakusztika területén a külső hatás a megtámasztást szolgáló rugalmas elemek kismértékű deformációját idézi elő (összenyomódás, szögelfordulás stb.). A kismértékű deformáció azt eredményezi, hogy a mozgást leíró megfelelő változók közötti kapcsolatokat lineáris összefüggések fejezik ki. A külső hatás ismétlődő vagy véletlenszerűen változó is lehet, amelynek hatására a merev test a nyugalmi helyzet körül mozog, leng, elfordul. A merev test nyugalmi helyzet környezetében végzett mozgását éppúgy rezgésnek nevezik, mint a rugalmas elemekben fellépő, szintén a nyugalmi helyzet körül ingadozó erőt, nyomatékot (kitérésrezgés, szögelfordulás-rezgés, erőrezgés, nyomatékrezgés stb.). Egydimenziós esetre mindezt a 2.1. ábra szemlélteti.

A rezgés időfüggése – jele az összefüggésekben általában $Y(t)$ – legegyszerűbb esetben állandó tag és időben változó tag összege. Az időben változó tag a legegyszerűbb esetben az idő harmonikus függvénye. Valós függvényként is – (2.1a), (2.1b) – komplex függvényként is – (2.2a), (2.2b) – kifejezhető, ez utóbbi esetben a valós időfüggvény a komplex valós része. A rezgés jelenség általában valamilyen változó – kitérés, nyomás, feszültség stb. – nyugalmi helyzethez képesti kismértékű eltéré-



2.1. ábra. Tömegpont rezgése

seként tapasztalható. A nyugalmi helyzetet y_0 jelöli, az ehhez képest tapasztalható kismértékű változást pedig $y(t)$. A komplex mennyiségeket, ha a magyarázat miatt szükséges, aláhúzás jelöli, de ez nem általános, hiszen a fizikai mennyiség komplex alakú ábrázolása csak annyiban különbözik a valós számaábrázolástól, hogy a fázisinformációt tömörebben fejezi ki. A rezgés nagyságát harmonikus esetben akár az amplitúdó, akár az effektív érték (idő szerinti négyzetes középérték) jellemezheti. Ha a jelenség nemmeghatározott (nem determinisztikus), tehát időfüggése nem adható meg zárt alakban, a rezgés nagyságát az effektív értékkel fejezik ki, meghatározását a (2.3) képlet adja, az állandó tagot elhanyagolva. Az effektív érték a jel idő szerinti meghatározott négyzetes középértéke, jele a mennyiségek jele mellé írt *eff* index, az angol szakirodalom az *RMS* (*root mean square*) indexet alkalmazza.

$$Y(t) = y_0 + y(t); \quad (2.1a)$$

$$y(t) = y_1 \cdot \cos(\omega \cdot t); \quad (2.1b)$$

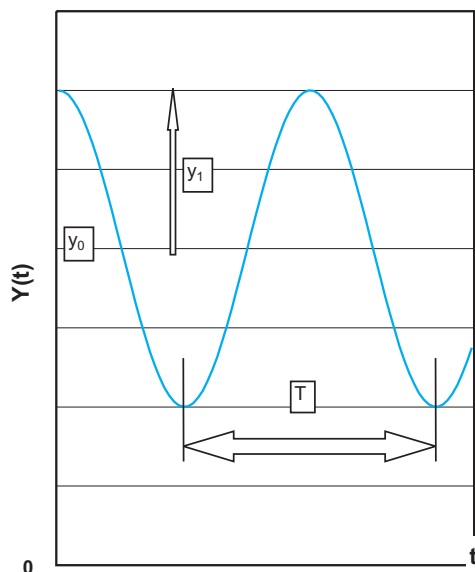
$$\underline{Y}(t) = \underline{y}_0 + \underline{y}(t); \quad (2.2a)$$

$$\underline{y}(t) = \underline{y}_1 \cdot e^{i \cdot \omega \cdot t}; \quad (2.2b)$$

$$y_{eff} = \sqrt{\frac{1}{\tau} \cdot \int_0^{\tau} |y(t)|^2 dt}. \quad (2.3)$$

A képletekben t az idő, ω a rezgés körfrekvenciája. Értékét a (2.4) összefüggés adja meg, f a rezgés frekvenciája, T a periódusidő, y_1 a harmonikus rezgés valós amplitúdója, y_1 pedig a komplex amplitúdó, i a képzetes egység, y_{eff} a rezgés effektív értéke, τ az integrálási idő az effektívérték-képzésben a végtelenhez tart. A harmonikus rezgés időfüggvénye, amely a (2.1)–(2.2) összefüggéseknek felel meg, a 2.2. ábrán látható.

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f = \frac{2 \cdot \pi}{T}. \quad (2.4)$$



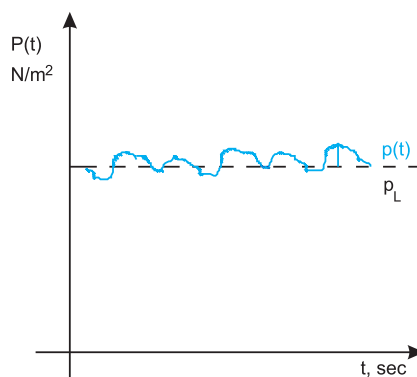
2.2. ábra. Harmonikus rezgés időfüggvénye

$Y(t)$ az eredő időfüggvény; y_0 az állandó tag; y_1 a harmonikus rezgés amplitúdója; T periódusidő

2.2. A hang és terjedése különböző hangforrások és különböző hangterek esetében

2.2.1. A hangjelenség

A hangnyomás a levegőben rezgőmozgást végző rugalmas test, vagy például örvényes áramlás hatására a légnyomás körül keletkező kismértékű nyomásingadozás, nyomásrezgés. A többé-kevésbé állandó légnyomás értéke $p_L \approx 10^5 \text{ N/m}^2$, a nyomásváltozás, tehát a p hangnyomás az épületakusztika feladataiban ennél több nagyságrenddel kisebb. Ezt szemlélteti a 2.3. ábra. Ha a nyomásváltozás térben és időben tovaterjed, hullámterjedés játszódik le. Általában hullámterjedésnek nevezzük azt a jelenséget, amelyben a rugalmas közeg rezgési állapota tovaterjed. A terjedés sebessége közvetítőközeg, a gáz anyagi jellemzőitől és hőmérsékletétől függ. A gázokban a hanghullám longitudinális jellegű, te-



2.3. ábra. Légnyomás, hangnyomás

$P(t)$ eredő nyomás; $p(t)$ hangnyomás; p_L légnyomás

hát a levegőrészecskék rezgőmozgásának iránya a hullám terjedésével párhuzamos.

A hangjelenség „erősségének”, „nagyságának” jellemzésére több lehetőség kínálkozik, amelyek közül a többi között a könnyebben megvalósítható mérőműszerek és mérési módszerek szempontjai alapján választottak. Napjainkban a széles körű zajcsökkentési gyakorlatban, a környezeti, munkahelyi zaj elleni védelemben a hangnyomás a kiinduló akusztikai mennyiség, mert egyszerűbb eszközökkel mérhető, mint más, a hangjelenséget szintén leíró fizikai mennyiség. A sokféle időbeli lefutású hangjelenség indokolja az effektív érték alkalmazását. Részben gyakorlati okok, részben az emberi érzékelés sajátosságai vezettek arra, hogy a hangnyomás nagyságának számszerű kifejezése helyett annak logaritmikus értékét használjam. Tehát a hangjelenség „erősségének”, „nagyságának” számszerűsítésére szolgáló akusztikai mennyiség a hangnyomásszint, jele L_p , meghatározását a (2.5) összefüggés mutatja. A logaritmikus jelleg miatt szükséges vonatkoztatási értéket ($p_0 = 2,0 \cdot 10^{-5} \text{ N/m}^2$) úgy határozták meg, hogy a hanghullám további fizikai jellemzőinek egység választásához illeszkedjen. p_0 egyúttal illeszkedik a hallásküszöb értékéhez is:

$$L_p = 10 \cdot \lg \left(\frac{p_{eff}^2}{p_0^2} \right) \text{ dB}. \quad (2.5)$$

A hangterjedés vizsgálata, számítása, méretezése során általában a következő elemeket kell figyelembe venni:

- a hangforrás sajátosságai (a forrás erőssége, alakja, működési módja);
- a hangterjedés sajátosságai;
 - a hangterjedés geometriai jellegzetességei;
 - a térbeli akadályok hatása a hangterjedésre;

- egyéb tényezők (atmoszferikus csillapítás, meteorológiai tényezők stb.).

A forrás erősséget általánosan szintén logaritmussal egységgel, az L_w hangteljesítményszinttel fejezik ki, a definíciót a (2.6) összefüggés adja meg. W a hangforrás akusztikai teljesítménye, hiszen a közeg rezgésbe hozásához munkavégzésre, tehát teljesítményre van szükség, mértékegysége mint minden teljesítménynek Watt, W_0 a vonatkoztatási szint, értéke 10^{-12} W. A hangteljesítményszint mértékegysége decibel (dB):

$$L_w = 10 \cdot \lg \left(\frac{W}{W_0} \right), \quad \text{dB}. \quad (2.6)$$

Általánosságban a hangforrás hangteljesítményszintje és a környezetében kialakuló hangnyomásszint között a logaritmussal egységek miatt a (2.7) összefüggés szerint alakul a kapcsolat. $D_{táv}$ jelöli a hangterjedés geometriai sajátosságai miatti csillapítást (távolsági csillapítás), helyiségekben, tehát zárt térben $D_{táv}$ a határolószerkezetek hangvisszaverő hatását is tartalmazza. A távolsági csillapítást többi között a 2.2. és a 2.6. alfejezet tárgyalja. D_a az árnyékolási csillapítás, összefoglalása a 2.4. részben található. D_{atm} az atmoszferikus csillapítás, D_{met} a meteorológiai hatások miatti csillapítás, amelyeket a 2.3. alfejezet ismertet. A megoldandó feladat jellege, a környezet sajátosságai miatt további csillapítási elemek is lehetségesek.

$$L_p = L_w - D_{táv} - D_a - D_{atm} - D_{met}. \quad (2.7)$$

A logaritmussal egységek alkalmazásának néhány – első látásra meglepő – következménye. Gyakori kérdés például, hogy két vagy több hanghullám eredőjének a nagysága mekkora lesz egy meghatározott megfigyelési ponton vizsgálva. Az eredő a két hanghullám nagyságától (effektív érték vagy amplitúdó), a frekvenciáik közötti eltéréstől, a kölcsönös fázisuktól, valamint attól függ, hogy a jelek szinuszosak komponensek eredője, vagy széles sávú, nemdeterminisztikus.

Az egyszerűség kedvéért a megfigyelési pontra két hullám érkezik, $i = 1$ vagy 2, $p_{i,1}$ a jelek amplitúdója:

$$p_i = (t)p_{i,1} \cdot \cos(\omega_i \cdot t + \phi_i). \quad (2.8)$$

A (2.3) összefüggés szerint elvégezve az effektívérték-képzést, ha $\omega_1 \neq \omega_2$ az eredő jel effektív értéke, $p_{er, eff}$ a (2.9a) képlet szerinti lesz, mert az effektív érték és a csúcserték kö-

zött szinuszos időfüggés esetén a kapcsolatot (2.9b) képlet adja meg:

$$p_{er, eff}^2 = \sum_i \frac{p_{i,1}^2}{2} = \sum_i p_{i, eff}^2; \quad (2.9a)$$

$$p_{i, eff}^2 = \frac{p_{i,1}^2}{2}. \quad (2.9b)$$

Tehát az eredő jel effektív értékének négyzetét az egyes összetevők effektív értéke négyzetének összegzésével kell meghatározni. Azonos az eljárás akkor, ha az egyes jelek véletlen változósak, széles sávúak.

Abban az esetben, ha a két jel frekvenciája megegyezik és fáziskülönbségük állandó, az eredőt, $p_{er}(t)$ a (2.10) összefüggés adja meg, $p_{er,1}$ az eredő jel amplitúdója, ϕ_{er} a fázisa. Az amplitúdó a két jel kölcsönös fázisától is függ:

$$p_{er}(t) = p_{er,1} \cdot \cos(\omega \cdot t + \phi_{er}); \quad (2.10)$$

$$p_{er,1} = \sqrt{p_{1,1}^2 + p_{2,1}^2 + 2 \cdot p_{1,1} \cdot p_{2,1} \cdot \cos(\phi_1 - \phi_2)}. \quad (2.11)$$

Ha a két jel közötti fáziskülönbség, $\phi_1 - \phi_2 = 0$, akkor a két jel fázisban van, maximálisan erősítik egymást. Ekkor az eredő a legnagyobb lesz. Ha a fáziskülönbség $\pm 180^\circ$, a két jel kioltja egymást, az eredő amplitúdó 0 lesz. Közbulső esetben az amplitúdó a két szélső érték között alakul ki.

Általánosságban a zajcsökkentési gyakorlatban a hangjelenség összetevői széles sávúak, így az eredő hanghullám effektív értékét a (2.9a) összefüggés szerint kell meghatározni. Mivel a jel nagyság kifejezése hangnyomásszintben történik, a (2.9a) összefüggést át kell alakítani szintekre. Az átalakítás elemi műveletekkel történik, az eredményt a (2.12) képlet mutatja.

Ha egy megfigyelési helyen az eredő hangjelenség több forrásból származik, ezek hangnyomásszintje, $L_{p,i}$ ismert, az eredő hangnyomásszintet, $L_{p,er}$ a (2.12) képlettel kell kiszámítani:

$$\begin{aligned} L_{p,er} &= 10 \cdot \lg \left(\frac{p_{eff,er}^2}{p_0^2} \right) = 10 \cdot \lg \left(\frac{\sum_i p_{eff,i}^2}{p_0^2} \right) = \\ &= 10 \cdot \lg \left(\sum_i 10^{0,1 \cdot L_{p,i}} \right). \end{aligned} \quad (2.12)$$

Az összefüggésből a zajcsökkentési méretezés számára néhány lényeges, tendencia jellegű megállapítás fogalmazódik meg:

- ha két hangforrás a megfigyelés helyén azonos hangnyomásszintet kelt, együttes működés esetén az eredő hangnyomásszint 3 dB-val lesz nagyobb, mint az egyes összetevők;
- ha két hangforrás a megfigyelés helyén azonos hangnyomásszintet okoz, együttes működésükhöz képest az egyik kikapcsolása 3 dB hangnyomásszint-csökkenést eredményez;
- ha két hangforrás által keltett hang hangnyomásszintje között a megfigyelés helyén 10 dB kü-

lönbség van (nagyságrendi különbség), akkor a kisebbik összetevő gyakorlatilag nem befolyásolja az eredményt.

2.2.2. Alapvető összefüggések, a hang terjedési sebessége, hullámegyenlete, a sebességpotenciál értelmezése [IV.5], [IV.2]

A hangjelenségek a levegőben lezajló hullámjelenségekkel magyarázhatók. Az elméleti összefüggések három fizikai törvényre és az ezeket kifejező egyenletekre támaszkodnak: az ideális gázok állapotegyenletére, Newton II. törvényére és a folytonossági összefüggésekre.

Az ideális gáz állapotegyenlete

A hangjelenség következtében mind a levegőben a nyomás, p , mind a levegő sűrűsége, ρ , mind pedig a részecskék sebessége, $\underline{v}$, a nyugalmi, állandósult érték körül ingadozik, amint azt a következő összefüggések kifejezik. A kétszeres aláhúzás a vektoros mennyiséget jelöli.

$$p = p_L + dp; \quad (2.13)$$

$$\rho = \rho_L + d\rho; \quad (2.14)$$

$$\underline{v} = \underline{v}_L + d\underline{v} \quad (2.15)$$

A levegőt ideális gáznak tekintve, és a hangterjedés során adiabatikus állapotváltozást feltételezve a nyomás a sűrűség függvénye lesz. A nyomásváltozás Taylor-sorfejtéssel fejezhető ki, amelyben a feltételek miatt a magasabb rendű tagok elhanyagolhatók.

$$dp = p - p_L = \frac{\partial p(\rho)}{\partial \rho} \cdot d\rho. \quad (2.16)$$

A légnyomás sűrűség szerinti deriváltjának a nyugalmi állapot környezetében fizikai tartalma van, ez a c hangterjedési sebesség négyzete:

$$\frac{\partial p(\rho)}{\partial \rho} = c^2. \quad (2.17)$$

A (2.17) összefüggést megoldva:

$$p(\rho) = c^2 \cdot \rho + \text{állandó}. \quad (2.18)$$

Ideális adiabatikus állapotváltozás esetén a gáz nyomásának és térfogata hatványának szorzata állandó. A hatványkitevő a κ fajhőhányados:

$$p \cdot V^\kappa = \text{állandó}. \quad (2.19a)$$

A fajhőhányados az állandó nyomású és az állandó térfogatú fajhő, c_p és c_v hányadosa a (2.19b) összefüggés szerint:

$$\kappa = \frac{c_p}{c_v}. \quad (2.19b)$$

A (2.19a) összefüggést deriválva:

$$\frac{\partial p}{\partial V} = -\frac{\kappa \cdot p}{V}. \quad (2.20)$$

A V térfogatban levő anyagmennyiség, azaz a térfogatban levő gáz M tömege állandó, a térfogatváltozás a sűrűségváltozás miatt történik, ezért:

$$\partial V = \partial \left(\frac{M}{\rho} \right) = -\frac{M}{\rho^2} \cdot \partial \rho. \quad (2.21)$$

A (2.21) képletet visszahelyettesítve (2.20)-ba a hang terjedési sebességére a következő adódik:

$$c^2 = \frac{\kappa \cdot p}{\rho}. \quad (2.22)$$

A Boyle–Mariott-törvényt mólnyi mennyiségű gázra alkalmazva és felhasználva a (2.22) összefüggést, a hang terjedési sebessége a gáz elsődleges adataiból (anyaga, hőmérséklete) meghatározható a (2.23a) összefüggés szerint.

A hang terjedési sebességére levezetett (2.23a) összefüggés azt fejezi ki, hogy az ideális gázban a hang terjedési sebessége arányos a T abszolút hőmérséklet négyzetgyökével, függ a gáz anyagától amit a κ fajhőhányados és az M molekula tömeg tükröz, R az egyetemes gázállandó. Gázkeverékekre az összefüggés a (2.23b) képletre módosul, ahol i a gázok indexe, n_i az i -edik összetevő aránya a gázelegy teljes térfogatában:

$$c = \sqrt{\frac{R \cdot \kappa}{M}} \cdot \sqrt{T}; \quad (2.23a)$$

$$c = \sqrt{\frac{R}{\sum_i \frac{M_i \cdot n_i}{\kappa_i}}} \cdot \sqrt{T}. \quad (2.23b)$$

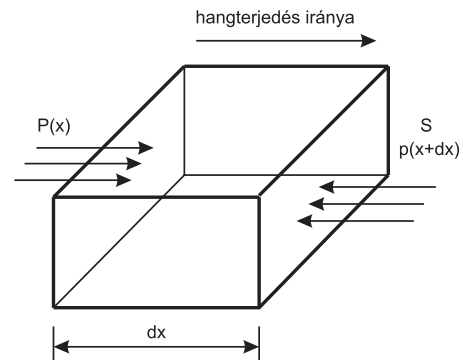
Euler-egyenlet

A hang terjedésének leírásához szükséges hullámegyenlet részben az Euler-egyenlet, részben pedig a folytonossági összefüggések segítségével írható fel. Az Euler-egyenlet Newton II. törvényén alapul.

Az összefüggések fizikai tartalmának megértéséhez elegendő az egydimenziós eset nyomon követése. A 2.4. ábrán látható a terjedés irányában dx méretű, a terjedés irányára merőleges irányban S felületű térfogatelemre ható nyomás, a térfogatelem két oldalán $p(x)$ és $p(x+dx)$. A térfogatelem térfogata dV , a bezárt gáz tömege dM :

$$dM = \rho \cdot dV = \rho \cdot S \cdot dx; \quad (2.24)$$

$$dp = S \cdot (p(x) - p(x+dx)) = -S \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \cdot dx. \quad (2.25)$$



2.4. ábra. Az Euler-egyenlet kiindulása

$p(x)$, $p(x+dx)$ hangnyomás az x és az $x+dx$ helyen; S az elemi cella terjedési irányra merőleges oldalának felülete

Newton II. törvénye az elemre ható erő és a keletkező gyorsulás között teremt kapcsolatot:

$$S \cdot \left(-\frac{\partial p}{\partial x} \right) dx = -S \cdot \rho_L \cdot dx \cdot \frac{\partial v}{\partial t}; \quad (2.26)$$

$$-\frac{\partial p}{\partial x} = \rho_L \cdot \frac{\partial v}{\partial t}. \quad (2.27)$$

A fenti összefüggés kapcsolatot teremt a nyomás helyszínti változása és a gáz rezgésgyorsulása között. Ha a nyomás a hely függvényében állandó lenne, a gáz részecske sebessége, v is állandó maradna. Háromdimenziós esetben az összefüggés a (2.28) alakban írható fel:

$$\text{grad}(p) = -\rho_L \cdot \frac{\partial \underline{v}}{\partial t}. \quad (2.28)$$

Folytonossági egyenlet

A következő összefüggés a folytonosság elvének felhasználásán alapul. A folytonosság elve azt jelenti, hogy a hangterjedés során nem keletkeznek szakadások, azaz „üregek”, amelyeket nem tölt ki anyag. A térfogatelemekben levő anyag mennyisége, azaz tömege azért változik, mert az anyag sűrűsége megváltozik. A folytonosság elvét a 2.5. ábra szemlélteti. A dx szélességű, S felületű térfogatelemben balról $v(x)$ sebességgel belépő, $\rho(x)$ sűrűségű anyagmennyiséget a (2.29) egyenlet, a $v(x+dx)$ sebességgel kilépő, $\rho(x+dx)$ sűrűségű anyagmennyiséget a (2.30) egyenlet fejezi ki. A dM anyagkülönbséget linearizálás és a magasabb rendű derivált tagok elhanyagolása után a (2.31) összefüggés adja meg:

$$M_{be} = S \cdot dx = S \cdot v(x) \cdot \rho(x) \cdot dx; \quad (2.29)$$

$$M_{ki} = S \cdot v(x+dx) \cdot \rho(x+dx) \cdot dx; \quad (2.30)$$

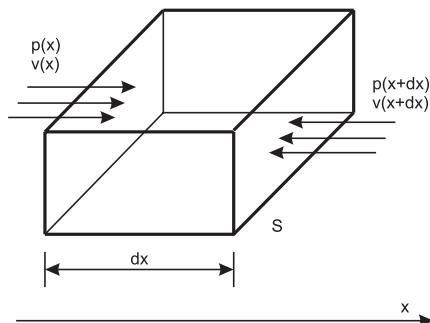
$$\begin{aligned} dM &= M_{be} - M_{ki} = \\ &= -S \cdot \frac{\partial(v \cdot \rho)}{\partial x} \cdot dt \cdot dx = -\rho_L \cdot S \cdot \frac{\partial v}{\partial x} \cdot dt \cdot dx. \end{aligned} \quad (2.31)$$

A folytonosság miatt a térfogatelemben a tömeg változása a sűrűség változásának következménye, tehát:

$$dM = d\rho \cdot S \cdot dx = \frac{\partial \rho}{\partial t} \cdot dt \cdot S \cdot dx. \quad (2.32)$$

A (2.17) összefüggést átalakítva az időbeli változás figyelembevétel alapján:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = c^2 \cdot \frac{\partial \rho}{\partial t}. \quad (2.33)$$



2.5. ábra. A folytonossági egyenlet felírása

$\rho(x)$, $v(x)$, $\rho(x+dx)$, $v(x+dx)$ a közeg sűrűsége és részecske-sebessége az x és $x+dx$ helyen

A (2.31) és (2.32) összefüggések szerint meghatározott elemi tömegváltozások a folytonossági feltételek miatt egyenlők lesznek egymással. Felhasználva a (2.33) összefüggést is, a rezgésebbesség hely szerinti változásának okát kifejező egyenlet írható fel:

$$\frac{\partial v}{\partial x} = -\frac{1}{\rho_L} \cdot \frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_L \cdot c^2} \cdot \frac{\partial p}{\partial t}. \quad (2.34)$$

A (2.34) egyenlet háromdimenziós alakja azonos fizikai tartalommal a (2.35) összefüggésben látható:

$$\text{div}(\underline{v}) = -\frac{1}{\rho_L \cdot c^2} \cdot \frac{\partial p}{\partial t}. \quad (2.35)$$

Hullámegyenlet

Egydimenziós esetben a (2.27) és (2.34) egyenletek, háromdimenziós esetben a (2.28) és a (2.35) egyenletek közös megoldása vezet a hullámegyenlethez:

- (2.36) egydimenziós eset,
- (2.37) három dimenziós eset.

$$\frac{\partial^2 p(x,t)}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 p(x,t)}{\partial t^2}; \quad (2.36)$$

$$\text{div grad}(p) = \nabla^2 p = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (2.37)$$

Sebességpotenciál

A gázrészecskék rezgésebbessége vektorfüggvény. Kényelmesebbé tehető az összefüggések felírása és egyes feladatok megoldása a sebességpotenciállal, amely skalár függvény, jele egydimenziós esetben $\Phi(x,t)$, háromdimenziós esetben $\Phi(\underline{x},t)$. x , ill. $\underline{x}$ a helyváltozót jelöli. A sebességpotenciál-függvényből a rezgésebbesség egydimenziós esetben a (2.38) összefüggés szerint, háromdimenziós esetben a (2.39) összefüggés szerint határozható meg:

$$v(x) = -\frac{\partial \Phi(x)}{\partial x}; \quad (2.38)$$

$$v(\underline{x}) = \text{grad}(\Phi(\underline{x})). \quad (2.39)$$

Az Euler-egyenletbe (2.28) helyettesítve a sebességpotenciál összefüggését ez utóbbira szintén hullámegyenlethez lehet jutni: a (2.40) összefüggés egydimenziós, a (2.41) képlet háromdimenziós alakot mutatja be:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2}; \quad (2.40)$$

$$\nabla^2 \Phi = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2}. \quad (2.41)$$

Harmonikus időfüggés tovább egyszerűsödő kapcsolatot teremt a sebességpotenciál és a nyomás-, ill. a rezgésebbesség és a nyomás között, melyet a komplex írásmódot felhasználva a (2.42) és (2.43) egyenletek fejeznek ki. A k jelölés a hullámszám, amelynek értékét a (2.44) képlet adja meg. A komplex mennyiségeket külön jelölés nem különbözteti meg, a rezgésebbesség értelemszerűen vektor, a hangnyomás skalár, a sebességpotenciál szintén skalár mennyiség:

$$p(\underline{x}) = \rho_L \cdot \frac{(\partial \Phi \underline{x})}{\partial t} = \rho_L \cdot i \cdot \omega \cdot \Phi(\underline{x}); \quad (2.42)$$

$$v(\underline{x}) = -\text{grad}(\Phi(\underline{x})) = \frac{i}{k \cdot \rho_L \cdot c} \cdot \text{grad}(p(\underline{x})) \quad (2.43)$$

$$k = \frac{\omega}{c} = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda}. \quad (2.44)$$

A hullámegyenlet külső gerjesztés esetén

A hullámegyenlet olyan fizikai tartalommal is felírható, ahol külső forrás – erő vagy térfogatsebesség – hatása is megjelenik. Végül is a hullámot külső gerjesztés hozza létre. A későbbiek miatt a külső forrás egységnyi térfogatra vonatkozó térfogatsebesség forrás, jele q'' , mértékegysége $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}^3$. Az Euler-egyenlet térfogatsebesség forrás működésekor nem változik, hiszen az lényegében a Newton II. törvényét fejezi ki. A folytonossági egyenlet (2.34) és (2.35) azonban a forrás jellemzővel egészül ki, mert a térfogategysége beáramló és az abból távozó anyagmennyiségekhez a külső forrás hatása is hozzájárul:

$$\frac{\partial v}{\partial x} = -\frac{1}{\rho_L \cdot c^2} \cdot \frac{\partial p}{\partial t} + q''. \quad (2.45)$$

A hullám egyenlet ismét a folytonossági és az Euler-egyenlet egyesítéséből származik:

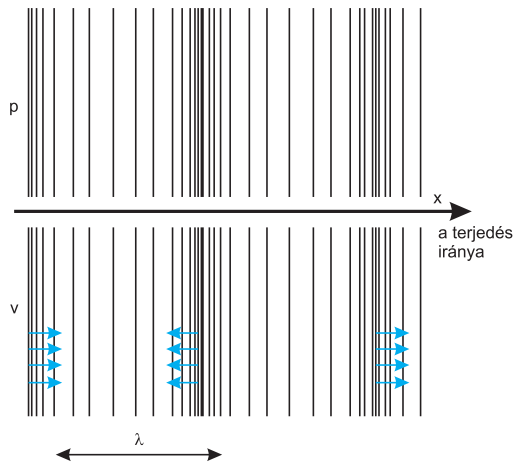
$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - \rho_L \cdot \frac{\partial q''}{\partial t}. \quad (2.46)$$

A háromdimenziós alak azonos fizikai tartalommal a következő:

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - \rho_L \cdot \frac{\partial q''}{\partial t}. \quad (2.47)$$

2.2.3. Síkhullámú terjedés [IV.5], [IV.2]

A síkhullámú terjedés a legegyszerűbb hullámterjedési forma, amelynek mind az elvi, mind pedig összetett terjedésfajta az aszimptotikus közelítése miatt nagy gyakorlati jelentősége van. Az itt kapott eredmények más terjedési formákra is általánosíthatók. A síkhullámú hangterjedés legfontosabb sajátossága az, hogy az azonos rezgési állapotú helyek – ahol a hangnyomás, ill. a részecskesebesség azonos – a terjedés irányára merőleges síkokat alkotnak, amint azt a 2.6. ábra is szemlélteti; a terjedés geometriai sajátossá-



2.6. ábra. Síkhullámú hangterjedés szemléltetése
 p hangnyomás; v részecskesebesség; λ hullámhossz

gai nem befolyásolják a terjedést leíró mennyiségek, jelen esetben a hangnyomás és a részecskesebesség nagyságát.

A terjedéssel jellemzők felírásához mind a nyomásra, mind a sebességre potenciálra vonatkozó hullámegyenletből ki lehet indulni. A (2.40) hullámegyenlet általános megoldása a $+x$ és a $-x$ irányba haladó hullám. Harmonikus rezgés esetén a hely $-x$ és időfüggést $-t$ valós formában a (2.48), komplex formában a (2.49) összefüggés írja le:

$$\Phi(x, t) = A_+ \cdot \cos(\omega \cdot t - k \cdot x) + A_- \cdot \cos(\omega \cdot t + k \cdot x); \quad (2.48)$$

$$\underline{\Phi}(x, t) = \underline{A}_+ \cdot e^{i(\omega t - k \cdot x)} + \underline{A}_- \cdot e^{i(\omega t + k \cdot x)}. \quad (2.49)$$

Az összefüggésekben A_+ és A_- a valós, $\underline{A}_+$ és $\underline{A}_-$ a komplex amplitúdó; a $+$ alsó index a pozitív x irányú, a $-$ alsó index a $-x$ irányú terjedésre utal; ω a körfrekvencia, k a hullámszám. Közvetlenül megfigyelhető az idő és hely szerinti terjedés, az előbbihez az ismétlődés a T periódusidőként, az utóbbihoz az ismétlődés a λ hullámhosszanként következik be. A hangnyomást a (2.42) összefüggés, a rezgésebbességet a (2.43) összefüggés egydimenziós alakjával lehet kifejezni. Ha például csak a $+x$ irányú hullámösszetevőre van szükség, akkor a hely és időfüggés leírására az $(\omega \cdot t - k \cdot x)$ tagok szerepelnek.

Ennek megfelelően a $+x$ irányba haladó síkhullám sebességpotenciál-függvénye (komplex alak) a (2.50), a hangnyomás komplex kifejezése a (2.51), a részecskesebesség komplex alakja a (2.52) összefüggés lesz.

$$\underline{\Phi}(x, t) = \underline{A}_+ \cdot e^{i(\omega t - k \cdot x)}; \quad (2.50)$$

$$\underline{p}(x, t) = i \cdot \omega \cdot \rho_L \cdot \underline{A}_+ \cdot e^{i(\omega t - k \cdot x)}; \quad (2.51)$$

$$\underline{v}(x, t) = -i \cdot k \cdot \underline{A}_+ \cdot e^{i(\omega t - k \cdot x)}. \quad (2.52)$$

A hullámterjedés egyúttal teljesítményterjedést is jelent. Veszteségmentes közegben a hullámkeltés során a közegbe bevitt teljes teljesítmény tovaterjed a közegen. A síkhullámú terjedéshez az egységnyi felületen áthaladó teljesítmény, azaz az intenzitás (jele I , mértékegysége W/m^2) határozható meg általánosan, amely a valós nyomás és a valós részecskesebesség szorzata. Az intenzitást az egyszerűség kedvéért az $x = 0$ helyen célszerű meghatározni. Tekintettel arra, hogy a nyomás és a részecskesebesség között nincs fáziseltérés, az intenzitást a (2.53) összefüggés adja meg. Az integrálás időtartamát τ jelöli:

$$\begin{aligned} I &= \lim_{\tau \rightarrow \infty} \frac{1}{\tau} \cdot \int_0^\tau p \cdot v dt = \\ &= \lim_{\tau \rightarrow \infty} \frac{1}{\tau} \cdot \int_0^\tau \frac{p_1^2}{\rho_L \cdot c} \cdot \cos^2(\omega \cdot t) dt = \frac{p_1^2}{2 \cdot \rho_L \cdot c} = \frac{p_{\text{eff}}^2}{\rho_L \cdot c}. \end{aligned} \quad (2.53)$$

A W teljesítmény ugyanakkor időegység alatti munkavégzést jelent. Terjedése során a teljesítmény időegység alatt S felületű, c hosszúságú egyenes hasábot tölt meg. Ezért a térbeli energiasűrűség (jele E , mértékegysége $\text{W} \cdot \text{s}/\text{m}^3$) a (2.54a) összefüggés szerint határozható meg:

$$E = \frac{W}{S \cdot c} = \frac{I}{c} = \frac{p_{\text{eff}}^2}{\rho_L \cdot c^2}. \quad (2.54a)$$

A (2.54a) összefüggés lehetőséget teremt a hangteljesítmény és a hangnyomás közötti kapcsolat meghatározására is síkhullámú terjedés esetén. A (2.54a) összefüggés átrendezésével keletkezik a (2.54b) összefüggés, amely szintén azt fejezi ki, hogy a hangnyomás effektív értéke és a hangteljesítmény között a kapcsolat helytől független:

$$W = \frac{P_{\text{eff}}^2}{\rho_L \cdot c} \cdot S. \quad (2.54b)$$

Síkhullám meghatározott irányú – a következőkben pozitív x irányú – terjedésében a hangnyomás és részecskeszegesség sebességfüggvényét szemlélteti a (2.55) és (2.56) egyenlet a valós kifejezési formában, valamint a 2.6. ábra. A képletekben ω jelöli a körfrekvenciát, l. a (2.6) összefüggést, amely az időbeli periodicitást fejezi ki, k pedig a hullámszámot, l. a (2.44) képletet, amely a helyfüggés periodikuságát mutatja:

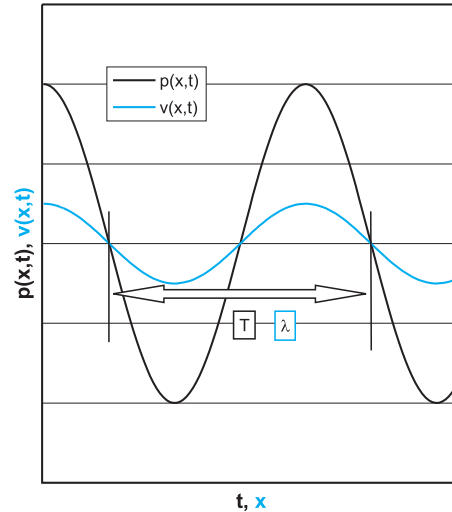
$$\begin{aligned} p(x,t) &= p_1 \cdot \cos(\omega \cdot t - k \cdot x) = \\ &= p_1 \cdot \cos\left(2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right)\right) \end{aligned} \quad (2.55)$$

$$\begin{aligned} v(x,t) &= \frac{p_1}{\rho_L \cdot c} \cdot \cos(\omega \cdot t - k \cdot x) = \\ &= \frac{p_1}{\rho_L \cdot c} \cdot \cos\left(2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right)\right) \end{aligned} \quad (2.56)$$

A síkhullámú terjedés sajátosságai:

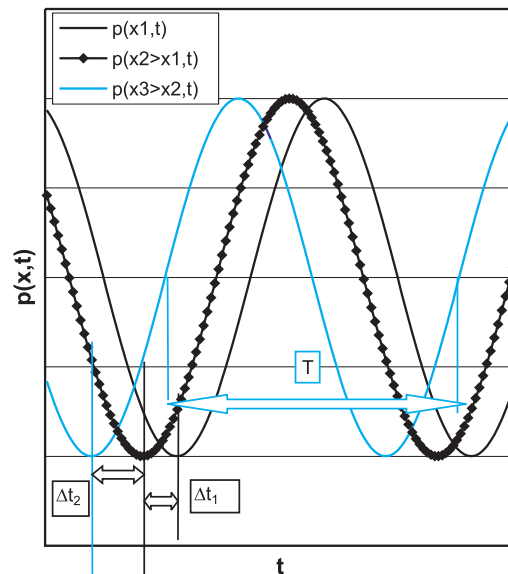
- a részecskesebesség párhuzamos a hangterjedés irányával, a jelen esetben $+x$ irány;
- a hangnyomás hullám és a részecskesebesség azonos fázisban van, az azonos fázisú helyek a hang terjedési irányára merőleges síkokat alkotnak; ezt részben a 2.6., részben a 2.7. ábra mutatja;
- mind a hangnyomás, mind a részecskesebesség periodikus az idő szerint is és a hullámhossz szerint is, l. a 2.7. ábrát, közös idő és hely koordináta-rendszerben; az idő függvényében a periodicitás a T periódusidő szerint, a hely függvényében pedig a λ hullámhossz szerint figyelhető meg;
- a hangnyomás és a részecskesebesség időfüggvényét három helyen vizsgálva, x_1 , x_2 és x_3 , amelyek között a kapcsolat $x_3 > x_2 > x_1$, az a tapasztalat, hogy a távolabbi helyhez a hang időkéssel jut el; közös koordináta-rendszerben, a 2.8. ábrán ábrázolva a három megfigyelési hely időfüggvényét az időkéssel pl. Δt_1 nagysága a (2.57) összefüggéssel határozható meg:

$$\Delta t_1 = \frac{\Delta x_1}{c}; \quad (2.57)$$



2.7. ábra. Összefüggés a hangnyomás és a részecskesebesség között síkhullámú terjedés esetén (időfüggés, helyfüggés)

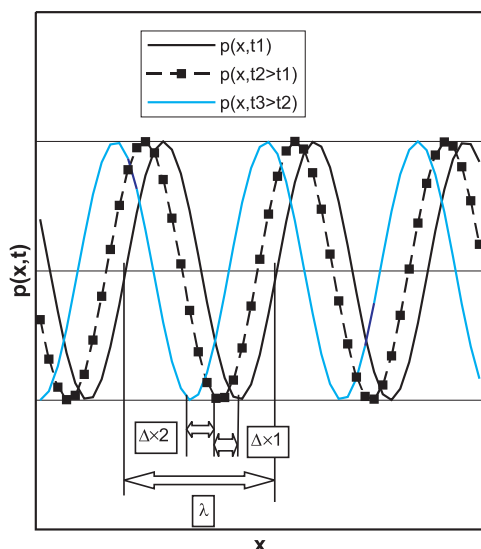
A helyfüggés az x változó szerint és az időfüggés a t változó szerint közös koordináta-rendszerben van ábrázolva; a helyfüggés, x szerint az ismétlődés a λ hullámhossznak megfelelően alakul ki; az időfüggés szerint az ismétlődés a T periódusidőnek megfelelően alakul ki; $p(x,t)$ hangnyomás a hely és idő függvényében; $v(x,t)$ részecskesebesség a hely és idő függvényében



2.8. ábra. A hangnyomás az idő függvényében síkhullámú terjedés esetén

x_1 , x_2 , x_3 helykoordináták mint paraméterek; t idő, független változó; T periódusidő

- a hangnyomás és a részecskesebesség helyfüggvényét három időpontban vizsgálva, t_1 , t_2 és t_3 , amelyek között a kapcsolat $t_3 > t_2 > t_1$, akkor az tapasztalható, hogy a későbbi időpontra a hanghullám továbbterjedt; a három időponthoz tartozó hullámot közös koordináta-rendszerben a 2.9.



2.9. ábra. A hangnyomás a hely függvényében síkhullámú terjedés esetén

$t1, t2, t3$ helykoordináták mint paraméterek; x hely, független változó; λ hullámhossz

ábrán ábrázolva pl. a Δx_1 útkülönbség a (2.58) összefüggéssel határozható meg:

$$\Delta x_1 = (\Delta t_1) \cdot c; \quad (2.58)$$

- a hangnyomás és a részecskesebesség hányadosa állandó, csak a közeg, jelen esetben a levegő fizikai sajátosságaitól, azaz sűrűségétől és a hang terjedési sebességétől függ; ezt az állandót karakterisztikus hullámimpedanciának (egyes szakirodalmi forrásokban akusztikai keménységnek) nevezik:

$$\frac{p}{v} = \rho_L \cdot c = z_0; \quad (2.59)$$

- a hullámterjedés teljesítményterjedést is jelent; a síkhullámú terjedéshez az egységnyi felületen áthaladó teljesítményt, az intenzitást célszerű meghatározni; jele I , mértékegysége W/m^2 , kiszámítandó:

$$I = p_{eff} \cdot v_{eff} = \frac{p_{eff}^2}{\rho_L \cdot c}. \quad (2.60)$$

Ha az átbocsátó felület, amelyen keresztül a síkhullám áthalad, megadható (jele S , mértékegysége m^2), akkor a rajta keresztül áthaladó összes W teljesítmény mértékegysége W , az intenzitásból számítható. Síkhullámú terjedés esetén a teljes felület mentén mind a hangnyomás, mind a részecskesebesség állandó, ezért az intenzitás is, a teljesítmény is az:

$$W = I \cdot S. \quad (2.61)$$

Az, hogy a jel nagyság kifejezésére hangnyomás helyett a gyakorlati tervezésben hangnyomásszintet alkalmaznak, kihat a hangintenzitás és a teljesítmény nagyságának megadásmódjára is: az abszolút mennyiség helyett logaritmikus mennyiséget, tehát hangteljesítményszintet és hangintenzitás szintet alkalmaznak, l. a (2.6) és (2.62) összefüggéseket. A mértékegység mindkét esetben dB. A vonatkoztatási értékeket (W_0 és I_0) úgy állapították meg, hogy a szintben kifejezett nagyságok egymáshoz illeszkedjenek:

- $W_0 = 10^{-12}$ Watt, $S_0 = 1$ m^2 , $I_0 = 10^{-12}$ Watt/ m^2 ;
- az intenzitás szint és a hangnyomásszint azonos számértéket ad akkor, ha:

$$p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ N/m}^2, \text{ hiszen}$$

$$\sqrt{I_0 \cdot \rho_L \cdot c} = 2,056 \cdot 10^{-5} \approx p_0.$$

$$L_I = 10 \cdot \lg \left(\frac{I}{I_0} \right) \text{ dB} \quad (2.62)$$

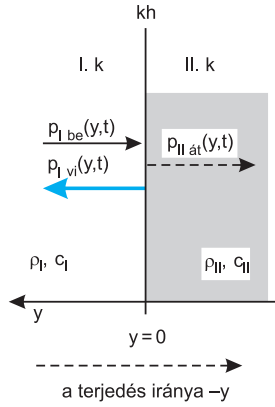
A karakterisztikus hullámimpedancia értéke egy meghatározott gáz vagy gázkeverék, tehát pl. a levegő esetében is hőmérséklet- és páratartalom-függő, ennek hatása a szintekben kifejezett mennyiségekben is megjelenik. Azonban a gyakorlatban ezek az eltérések kismértékűek, ezért általában elhanyagolják őket. A vonatkoztatási értékek megválasztása azt eredményezi, hogy a hangnyomásszint és az intenzitás szint számértéke közelítőleg megegyezik.

Síkhullámú terjedés során a hangteljesítményszint és a hangnyomásszint között a kapcsolat helytől független, a $D_{táv}$ távolsági csillapítás – általánosan a (2.7) képlet értelmezi – a (2.54) képletsor alapján:

$$D_{táv} = 10 \cdot \lg \frac{S}{1 \text{ m}^2}. \quad (2.63)$$

2.2.4. Síkhullám visszaverődése ideálisan merev, ill. nem ideálisan merev közeg-határ felületéről, merőleges beesés esetén [IV.5], [IV.2]

A hangvisszaverődések számszerű nyomonkövetése és ezzel összefüggésben az anyag- és szerkezetválasztás az akusztikai tervezés fontos eleme. A hangvisszaverődés különböző egyszerű, de szemléletformáló modelljeinek áttekintése sorában a legegyszerűbb eset a hangvisszaverődés síkhullámú terjedés esetén, ha a beesési szög 90° , azaz a beeső hullám merőleges két közeget elválasztó sík határfelület-



2.10. ábra. Hangvisszaverődés két közeg határáról, merőleges beesés esetén

I. k, II. k: 1. és 2. közeg; kh: közeghatár

letre. A modell vázlata a 2.10. ábrán látható. A két közeget az I. és II. alsó index különbözteti meg. A két közeg egymáshoz képest tetszőleges akusztikai minőségű, de mindkettőben longitudinális hullámterjedés játszódik le.

A közeghatárra beeső hullám y irányból érkezik, $-y$ irányba terjed. A közeghatárról részben visszaverődik, részben bejut a II. közegbe, ahol síkhullámként terjed a $-y$ irányban.

Kiindulásként mindkét közeg veszteségmentes. A közeghatárra a $+y$ irányból érkező, beeső síkhullám a (2.64) képlettel írható fel, amplitúdója $p_{Ibe,1}$. A visszavert hullám amplitúdója $-p_{Ivi,1}$ – a komplex reflexió tényező, r segítségével a (2.65) összefüggés alapján, az átvitt hullám amplitúdója $-p_{IIat,1}$ – a komplex átviteli tényező, t segítségével a (2.66) összefüggés alapján fejezhető ki. Az I. közegben az eredő hullám, $p_I(y,t)$ a beeső és a visszavert hullám összege, ami a hangnyomások helyfüggő összegzésével számítható ki a (2.67) összefüggés szerint. A II. közegben csak az átvitt síkhullám, $p_{II}(y,t)$ alakul ki e modell szerint. A síkhullámú terjedést kifejező k_I és k_{II} hullám számok a frekvenciától és a közeg sajátosságaitól függenek.

$$p_{Ibe}(y,t) = p_{Ibe,1} \cdot e^{i\omega \cdot t} \cdot e^{i \cdot k_I \cdot y}; \quad (2.64)$$

$$p_{Ivi,1} = p_{Ibe,1} \cdot r; \quad (2.65)$$

$$p_{IIat,1} = p_{Ibe,1} \cdot t; \quad (2.66)$$

$$p_I(y,t) = p_{Ibe,1} \cdot e^{i\omega \cdot t} \cdot (e^{i \cdot k_I \cdot y} + r \cdot e^{-i \cdot k_I \cdot y}); \quad (2.67)$$

$$p_{II}(y,t) = p_{Ibe,1} \cdot e^{i\omega \cdot t} \cdot t \cdot e^{i \cdot k_{II} \cdot y}. \quad (2.68)$$

A közeghatáron, ahol, $y = 0$ az egyensúlyi feltétel miatt a két nyomás egyenlő, ez a (2.69) összefüggésre vezet:

$$1 + r = t. \quad (2.69)$$

A részecskesebességet mindkét közegben a (2.43) összefüggés egydimenziós alakjának alkalmazásával kell meghatározni, kiegészítve egy -1 szorzóval, ami a koordinátairány felvételének következménye. A közeghatár két oldalán a sebesség azonos a folytonossági feltétel miatt. Bevezetve a karakteris-

tikus hullámimpedanciák arányát, $\zeta, (0)$ a (2.70) összefüggésnek megfelelően, a reflexió tényező és az átviteli tényező a közeg jellemzői segítségével kifejezhető, l. a (2.71) és (2.72) képleteket. A 0 arra utal, hogy a beesési szög 0 fok:

$$\zeta(0) = \frac{\rho_{II} \cdot c_{II}}{\rho_I \cdot c_I} = \frac{z_{0II}}{z_{0I}}; \quad (2.70)$$

$$r = \frac{\zeta(0) - 1}{\zeta(0) + 1}; \quad (2.71)$$

$$t = \frac{2 \cdot \zeta(0)}{\zeta(0) + 1}. \quad (2.72)$$

Az I. közegben kialakuló eredő hangnyomás a reflexió tényező visszahelyettesítésével, a II. közegben kialakuló hangnyomás pedig a reflexió tényező behelyettesítésével fejezhető ki. A karakterisztikus hullámimpedancia a jelen esetben a terjedés irányában végtelen kiterjedésű közeg bemeneti impedanciája a közeghatártól nézve.

Az I. közegből a II. közegbe egységnyi felületen átjutó akusztikai teljesítmény, azaz intenzitás, I_{IIat} és a közeghatár egységnyi felületére beeső teljesítmény, ill. intenzitás, I_{Ibe} aránya a hangelnyelési tényező, amelyet α jelöl a (2.73) összefüggés szerint. A 0 index a merőleges beesést jelenti. A hullám által szállított teljesítmény arányos a hangnyomás-amplitúdó négyzetével, ami egyenértékű azzal, hogy a szállított teljesítmény a hangnyomás effektív értékének négyzetével arányos, l. a (2.60) összefüggést:

$$\alpha_0 = \frac{I_{IIat}}{I_{Ibe}} = \frac{|p_{IIat,1}|^2}{|p_{Ibe,1}|^2} = 1 - |r|^2. \quad (2.73)$$

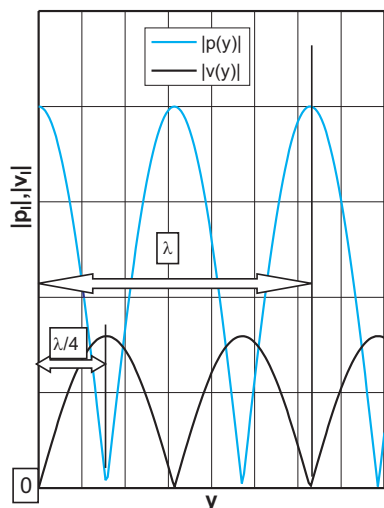
Ha az I. közegben terjedő hanghullám a terjedés irányára merőleges, ideálisan merev közeghatárhoz érkezik, oly módon vevődik onnan vissza, hogy a határra érkező hullám és a visszaverődő hullám amplitúdója azonos lesz. Ilyen esetben a beeső és a visszavert hullám állóhullámot hoz létre, amelynek nyomás-helyfüggését a (2.74) a részecskesebesség-helyfüggését a (2.75) összefüggés fejezi ki:

$$p_I(y,t) = 2 \cdot p_{Ibe,1} \cdot \cos(k_I \cdot y) \cdot \cos(\omega \cdot t); \quad (2.74)$$

$$v_I(y,t) = \frac{2 \cdot p_{Ibe,1}}{\rho_I \cdot c_I} \cdot \sin(k_I \cdot y) \cdot \cos\left(\omega \cdot t - \frac{\pi}{2}\right). \quad (2.75)$$

Az állóhullám hangnyomásának és sebességének helyfüggését a 2.11. ábra mutatja. Látható a nyomás és a sebesség közötti 90° -os fáziseltérés, és megfigyelhető a periodicitás is.

Tekintettel arra, hogy a beeső és a visszavert hullám amplitúdója azonos, a beeső hullám által szállított és a visszavert hullám által szállított teljesítmény azonos lesz. Tehát az ideálisan merev közegbe akusztikai teljesítmény nem jut be, hanem a közeghatáron visszaverődik. Ugyanakkor – az ideáli-



2.11. ábra. Hangnyomás és részecske sebesség a hely függvényében, ha a hangvisszaverődés ideálisan merev közegről történik
y helykoordináta; közegethatár az $y = 0$ helyen

san merev közegethatár miatt – a határfelületen a részecske sebesség 0 lesz. A részecske sebesség első maximuma a határfelülettől negyed hullámhosszyi távolságra jön létre, ennek a hangelnyelő burkolatok elhelyezési távolsága megválasztásánál van jelentősége.

A II. közeg hangelnyelő, hangvisszaverő tulajdonságát többi között a hangelnyelési tényező jellemzi a (2.76) összefüggés szerint, jele a merőleges beesés miatt α_0 . Az egységnyi felületre beeső és az onnan visszavert teljesítmény, $I_{I\text{ be}}$, $I_{I\text{ vi}}$ különbsége jut át a II. közegbe, tehát az I. közeg felől nézve elnyelődik, ezt az összetevőt $I_{II\text{ át}} = I_{el}$ jelöli. Ideálisan merev közegethatár esetén, amikor a beeső teljesítmény teljes egészében visszaverődik, a hangelnyelési tényező értéke 0 lesz. A valóságos szerkezetek által létrehozott közegethatárról olyan visszaverődés jön létre, amelyhez tartozó hangelnyelési tényező 0 és 1 között van:

$$\alpha_0 = \frac{I_{I\text{ be}} - I_{I\text{ vi}}}{I_{I\text{ be}}} = \frac{I_{el}}{I_{I\text{ be}}} \quad (2.76)$$

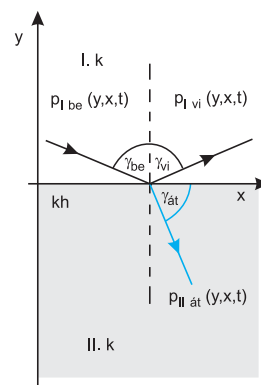
Ha a hangelnyelési tényező 0, akkor az I. közegből nem jut akusztikai teljesítmény a II. közegbe, a hangelnyelő szerkezetekre gondolva a levegőben terjedő és egy határolószerkezetre érkező akusztikai teljesítményből nem jut be határolószerkezetbe (a II. közegbe). Tehát a közegethatárra beeső teljesítmény és a visszavert teljesítmény megegyezik egymással. Ha a hangelnyelési tényező nem nulla, tehát a levegőből hangteljesítmény jut a II. közegbe, akkor a visszavert teljesítmény kevesebb lesz, mint

a beeső. Ideális hangelnyelő szerkezet akkor jön létre, ha az I. és II. közeg azonos karakterisztikus hullámimpedanciájú, ekkor a visszavert intenzitásrész lesz 0, a beeső és az átjutó intenzitás rész pedig megegyezik egymással.

A hangelnyelés jelensége szemléltethető úgy is, hogy az I. közegben az eredő hullám állóhullám és haladó hullám eredője: a haladó hullám pótolja azt az akusztikai teljesítményt, ami a közegethatáron elnyelődik.

2.2.5. Síkhullám visszaverődése ideálisan merev, ill. nem ideálisan merev közegethatár felületéről, ferde irányú beesés esetén [IV.5], [IV.2]

A soron következő, az előzőre épülő, kissé összetettebb modell szintén két közegből áll, amelyeket elválasztó határ sík felületet alkot. A II. jelű közeg ideálisan merev is lehet. A beeső hanghullám térbeli irányú. A közegethatárról visszaverődés történik, de a beeső hullám behatol a II. közegbe is. A modell vázlata a 2.12. ábrán látható.



2.12. ábra. Hangvisszaverődés térbeli beesési szög esetén

I. k, II. k: 1. és 2. indexű közeg; kh: közegethatár
 γ_{be} beesési szög; γ_{vi} visszaverődési szög; γ_{at} átviteli szög;
 $p_{I\text{ be}}$ a közegethatárra beeső síkhullám hangnyomása az I. közegben;
 $p_{I\text{ vi}}$ a közegethatárról visszaverődő síkhullám hangnyomása az I. közegben; $p_{II\text{ át}}$ a közegethatáron átjutó síkhullám hangnyomása az II. közegben

A feladat síkproblémaként írható le, hiszen a beeső, a visszavert és a II. közegbe átjutó hullám egy síkba esik. Ezért e sík és a közegethatár metszévonalára lesz az x tengely, az erre merőleges pedig az y. A beeső hullám +y irányból érkezik.

A hullámterjedés helyfüggéseinek leírására az iránykoszinuszos kifejezőmód is választható. Általánosságban az iránykoszinusz vektormennyiség, a terjedési irány és egy koordinátatengely által bezárt szög koszinusza. A jele n , az indexek a közeg és a hullámösszetevő jelzésére szolgálnak.

2.1. táblázat. Iránykoszinuszok értelmezése; a hullámszámok tengelyirányú vetületei

Hullámösszetevő, közeg	Tengely	Meghatározás	Hullámszám
Beeső I. közeg	y	$n_{lbe,y} = \cos(\gamma_{be})$	$k_{lbe,y} = k_{lbe} \cdot n_{lbe,y}$
	x	$n_{lbe,x} = \sin(\gamma_{be})$	$k_{lbe,x} = k_{lbe} \cdot n_{lbe,x}$
Visszavert I. közeg	y	$n_{lvi,y} = \cos(\gamma_{vi})$	$k_{lvi,y} = k_{lvi} \cdot n_{lvi,y}$
	x	$n_{lvi,x} = \sin(\gamma_{vi})$	$k_{lvi,x} = k_{lvi} \cdot n_{lvi,x}$
Visszavert I. közeg	y	$n_{llát,y} = \cos(\gamma_{át})$	$k_{llát,y} = k_{llát} \cdot n_{llát,y}$
	x	$n_{llát,x} = \sin(\gamma_{át})$	$k_{llát,x} = k_{llát} \cdot n_{llát,x}$

Az egyes iránykoszinuszok kapcsolatát a beesési, visszaverődési és átviteli szöggel a 2.1. táblázat foglalja össze. Mindkét közeg és mindhárom hullámösszetevő iránykoszinuszaira igaz:

$$n_y^2 + n_x^2 = 1. \quad (2.77)$$

Egyes szakirodalmi példákban az iránykoszinuszos kifejezés mód helyett a hullámszám tengelyirányú vetületeit alkalmazzák. Ezeket szintén a 2.1. táblázat rendszerezi.

A beeső síkhullámot a (2.78), a visszavert síkhullámot a (2.79), az átvitelt síkhullámot a (2.80) képlet mutatja be. A visszavert és az átvitelt hullám kifejezésében a megfelelő nyomásamplitúdókat a reflexiós és az átviteli tényező segítségével adják meg az összefüggések. Mindkét tényező szögfüggő, és általánosságban komplex a fázisviszonyok egyszerű kifejezhetősége érdekében. A hullámszám a közeg tulajdonságaitól függ, erre utal a I. és II. alsó index. A visszaverődési és átviteli tényező, r és t szintén komplex lehet, a gyakorlatban sokszor mindkettő szögfüggő is.

$$p_{lbe} = p_{lbe,1} \cdot e^{i\omega t} \cdot e^{i(n_{lbe,y} \cdot k_I \cdot y - n_{lbe,x} \cdot k_I \cdot x)}, \quad (2.78)$$

$$p_{lvi}(x, y, t) = r \cdot p_{lbe,1} \cdot e^{i\omega t} \cdot e^{i(-n_{lvi,y} \cdot k_I \cdot y - n_{lvi,x} \cdot k_I \cdot x)}, \quad (2.79)$$

$$p_{llát}(x, y, t) = t \cdot p_{lbe,1} \cdot e^{i\omega t} \cdot e^{i(n_{llát,y} \cdot k_{II} \cdot y - n_{llát,x} \cdot k_{II} \cdot x)}. \quad (2.80)$$

Az I. közeg síkhullámának eredő hangnyomása a beeső és a visszavert hullám hangnyomásainak összege lesz.

A közeget határon az I. és a II. közegben kialakuló hangnyomás az egyensúlyi feltétel miatt egyenlő. A képletekben $y = 0$ helyettesítés arra vezet, hogy a nyomások egyenlősége csak akkor teljesül általánosan, ha az exponenciális tag kitevői egyenlők lesznek:

$$n_{lbe,x} \cdot k_I \cdot x = n_{lvi,x} \cdot k_I \cdot x = n_{llát,x} \cdot k_{II} \cdot x. \quad (2.81)$$

Az első két tag egyenlősége arra vezet, hogy a beeső és a visszavert hullám iránykoszinusza egyenlő, tehát a beesési és a visszaverődési szög egyenlő. Ez igaz az y tengely irányában is:

$$n_{lbe,x,y} = n_{lvi,x,y} = n_{llát,x,y}. \quad (2.82)$$

Az $n \cdot k$ tagok a hullámhosszakkal is, a terjedési sebességekkel is kifejezhetők λ/n , vagy c/n formában, ami az átviteli szög kifejezésére alkalmas a Snell-összefüggés szerint:

$$\frac{\lambda_I}{\sin(\gamma_{be})} = \frac{\lambda_{II}}{\sin(\gamma_{át})}; \quad (2.83a)$$

$$\frac{c_I}{\sin(\gamma_{be})} = \frac{c_{II}}{\sin(\gamma_{át})}. \quad (2.83b)$$

A hullámhosszakra példaként átrendezve a (2.83a) összefüggésnek szemléletes magyarázat adható: az átviteli szög a II. közegben olyan értéket vesz fel, hogy a beeső hullám nyomhullámhossza és az átvitelt hullám nyomhullámhossza egyenlő legyen:

$$\lambda_{nyom} = \frac{\lambda_I}{\cos(90 - \gamma_{be})} = \frac{\lambda_I}{\sin(\gamma_{be})} = \frac{\lambda_{II}}{\sin(\gamma_{át})}. \quad (2.84)$$

Mindezeket a 2.13. ábra is szemlélteti.

A nyomhullámhosszak egyenlőségét felhasználva és a közeget határon az egyensúlyi feltételt felírva a reflexiós tényező és az átviteli tényező kapcsolatára a merőleges beeséssel azonos összefüggésre lehet jutni:

$$1 + r = t. \quad (2.85)$$

Mindkét közegben a közeget határra merőleges irányú sebességösszetevő közeget határon felvett értékét, $v_{ly}(y = 0)$ és $v_{lly}(y = 0)$ a (2.43) összefüggés alapján kell meghatározni, a koordinátairányok miatt a (-1) -es szorzás figyelembevételével. Az I. és II. közegben az y irányú részecske sebesség a (2.86a) és (2.86b) összefüggések szerint:

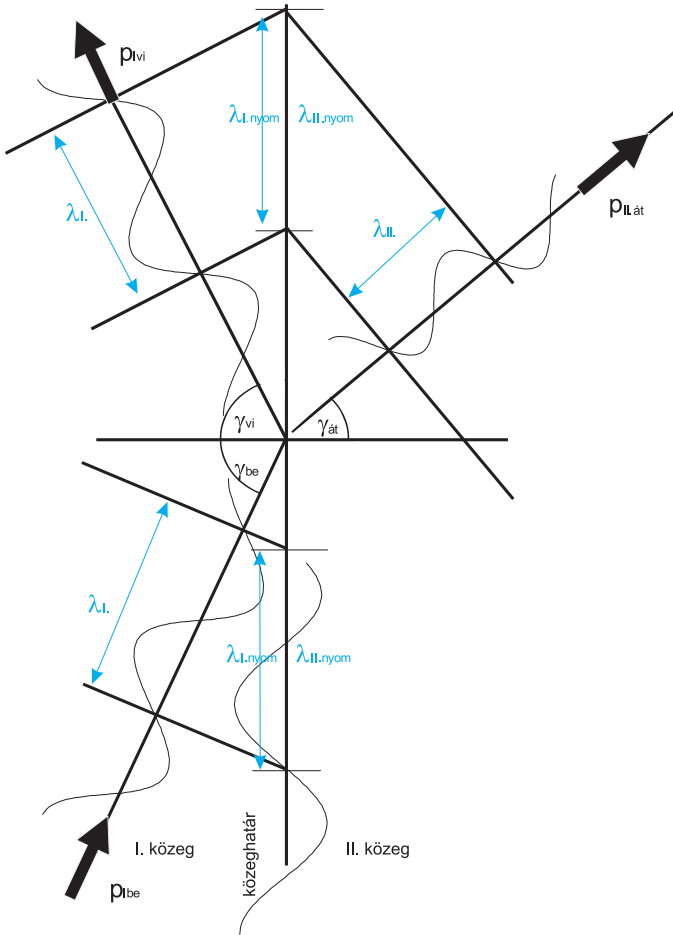
$$v_{ly}(y = 0) = \frac{p_{lbe,1}}{\rho_I \cdot c_I} \cdot (n_{ly} \cdot e^{-i n_{lx} \cdot k_I \cdot x} - n_{ly} \cdot r \cdot e^{-i n_{lx} \cdot k_I \cdot x}); \quad (2.86a)$$

$$v_{lly}(y = 0) = \frac{p_{lbe,1}}{\rho_{II} \cdot c_{II}} \cdot t \cdot n_{lly} \cdot e^{-i n_{lx} \cdot k_{II} \cdot x}. \quad (2.86b)$$

A közeget határ két oldalán a közeget határra merőleges sebességösszetevők, valamint a nyomhullámhosszak egyenlősége az átviteli tényező és a reflexiós tényező közötti újabb összefüggésre vezet:

$$\frac{1}{\rho_I \cdot c_I} \cdot (1 - r) \cdot n_{ly} = \frac{1}{\rho_{II} \cdot c_{II}} \cdot n_{lly} \cdot t. \quad (2.87)$$

Az átviteli szög iránykoszinuszát elemi trigonometrikus összefüggés és a Snell-törvény segítségével átalakítva és felhasználva a karakterisztikus hullámimpedanciák arányának (2.70) képletben megadott értelmezését a reflexiós tényező meghatározható a két közeg hullámterjedési sajátosságainak



2.13. ábra. A nyomhullámhossz szemléltetése

γ_{be} ; γ_{vi} ; $\gamma_{át}$; $P_{I\ be}$; $P_{I\ vi}$; $P_{II\ át}$ mint a 2.12. ábránál; λ_I , λ_{II} hullámhossz az index szerinti közegekben; λ_{nyom} nyomhullámhossz

függvényében a (2.88a) képletnek megfelelően. A hullámterjedési sajátosságokat a c_I és c_{II} terjedési sebességek és a $\zeta(0)$ merőleges beeséshez tartozó karakterisztikus hullámimpedanciák aránya fejezi ki. Mindhárom mennyiség közvetlenül az anyagjellemzőktől függ:

$$r(\gamma_{be}) = \frac{\zeta(0) \cdot \cos(\gamma_{be}) - \sqrt{1 - \frac{c_{II}^2}{c_I^2} \cdot \sin^2(\gamma_{be})}}{\zeta(0) \cdot \cos(\gamma_{be}) + \sqrt{1 - \frac{c_{II}^2}{c_I^2} \cdot \sin^2(\gamma_{be})}}. \quad (2.88a)$$

Az összefüggés a számértékek meghatározásának módja mellett több jelenségre is magyarázatot ad.

A teljes visszaverődés jelensége pl. akkor alakul ki egy kiválasztott közegeknél, ha az anyagjellemzők miatt a II. közegben a hullámterjedési sebessége nagyobb, mint az I. közegben, és a beesési szög olyan értéket vesz fel, amelynél a (2.88b) feltétel teljesül. Ilyen esetben egyébként a reflexiós tényező abszolút értéke 1 lesz.

$$1 < \frac{c_{II}}{c_I} \cdot \sin(\gamma_{be}) = \sin(\gamma_{át}). \quad (2.88b)$$

Értelmezhető pl. az érintő jellegű terjedés, azaz a 90°-os beesési szög is: ha a beeső hullám érinti a közeghatárt, a reflexiós tényező -1 . A beeső hullám úgy verődik vissza, mintha a II. közeg tökéletesen rugalmas lenne.

A hangelnyelési tényező merőleges beesési szögre vonatkozó értelmezése minden további nélkül kiterjeszthető a ferde szögű beesésre is: a hangelnyelési tényező a γ_{be} beesési szög alatt érkező hullám által egységnyi felületen keresztül szállított, és a beesési szöghöz tartozó $\gamma_{át}$ átviteli szöggel haladó hullám által egységnyi felületen keresztül szállított teljesítmény (intenzitás) hányadosa. Szintén a (2.68) összefüggésnek megfelelően függ a reflexiós tényezőtől, de természetesen a terjedés által meghatározott adott beesési szög és közeg által meghatározott áthaladási szög szerepel ez esetben.

A II. közeg határán a ferde irányú beeséshez tartozó fajlagos bemeneti impedanciának a továbbiak szempontjából részletes és szemléletes jelentés adható. A II. közegben a közeghatáron a 2.12. ábra szerint a $-y$ irány felé nézve a $\gamma_{át}$ átviteli szöghöz tartozó fajlagos bemeneti impedancia, $z''_{II\ be}(\gamma_{át})$ értéke a (2.89) összefüggéssel határozható meg, ahol z_{0II} a közeghatáron a II. közegben a $-y$ irány felé nézve a karakterisztikus hullámimpedancia, de egyúttal a meghatározás miatt a közeg fajlagos, tehát egységnyi felületre és merőleges átviteli szögre vonatkozó bemeneti impedanciája, melyet $z''_{II\ be}$ jelöl. Azért karakterisztikus hullámimpedancia, mert a közeg a $-y$ irányban végtelen kiterjedésű. Azért bemeneti impedancia, mert a közeg határán értelmezik:

$$z''_{II\ be}(\gamma_{át}) = \frac{P_{II}(y=0)}{v_{II\ y}(y=0)} = \frac{z_{0II}}{\cos(\gamma_{át})} = \frac{z''_{II\ be}}{\cos(\gamma_{át})}. \quad (2.89-90)$$

A (2.89) összefüggést és a II. közeg specifikus bemeneti impedanciáját felhasználva átrendezhető a (2.88a) összefüggés úgy, hogy abban a II. közeg merőleges hullámterjedéshez tartozó fajlagos bemeneti impedanciája szerepeljen:

$$r(\gamma_{be}) = \frac{z''_{II\ be} \cdot \frac{\cos(\gamma_{be})}{\cos(\gamma_{át})} - z_{0I}}{z''_{II\ be} \cdot \frac{\cos(\gamma_{be})}{\cos(\gamma_{át})} + z_{0I}}. \quad (2.91)$$

Az I. közegben a határfelület előtt kialakuló hangnyomás a beeső és a visszavert hullám hangnyomásának fázishelyes összege lesz. Szemléletesen a jelenség úgy is magyarázható, hogy a felülettel párhuzamos, y irányú hullámösszetevő változás nélkül elhalad a felület előtt, míg a felületre merőleges hullámösszetevő visszaverődik arról. Az eredő hangtér összetett jellegű a kialakuló nyomásmínimumok a hullámhossz, a beesési szög és a távolság függvényei. Ezt szemlélteti a 2.14. ábrás is.

A sík közeghatárra a I. közegben ferde irányból érkező síkhullám visszaverődése, ill. bejutása a II. közegbe a következő sajátosságokkal rendelkezik:

- ha síkhullám sík felületű közeghatárhoz érkezik, akkor arról részben visszaverődik, részben a hullám behatol a második közegbe; a beesési szög és a visszaverődési szög egyenlő lesz; az átviteli szög a két közegben terjedő hullám hullámhosszainak arányától és a beesési szögtől függ;
- a visszavert és az átjutott hullám amplitúdója a beesési szögtől és a közegek jellemzőitől (sűrűség, hullámterjedési sebesség) függ;

- a II. közeg hangelnyelő tulajdonságának jellemzésére a beesési szögtől függő hangelnyelési tényező – $\alpha(\gamma_{be})$ – mennyisége alkalmazható, amely a II. közegbe átjutó hullám intenzitásának, $I_{II\ át}$ -nak és a közeghatár felületére beeső hullám intenzitásának, $I_{I\ be}$ -nek aránya a (2.92) összefüggés a szerint; minthogy a $\gamma_{\hat{a}t}$ átjutási szög a két közeg jellemzőitől függ, a hangelnyelési tényező is szögfüggő lesz; a II. közegbe átjutó hullám intenzitása az I. közeg felől nézve elnyelődést jelent:

$$\alpha(\gamma_{be}) = \frac{I_{II\ át}}{I_{I\ be}}. \quad (2.92)$$

- az I. közegben terjedő visszavert síkhullám intenzitása a reflexiós tényező értelmezése alapján a beeső hullám intenzitásából ($I_{I\ be}$) kiindulva is felírható; ez szemléletesen úgy is magyarázható, hogy a visszavert síkhullám a visszaverődés irányába terjedő, $I_{I\ vi}$ intenzitású síkhullám;

$$I_{I\ vi} = I_{I\ be} \cdot |r|^2 = I_{I\ be} \cdot (1 - \alpha); \quad (2.93)$$

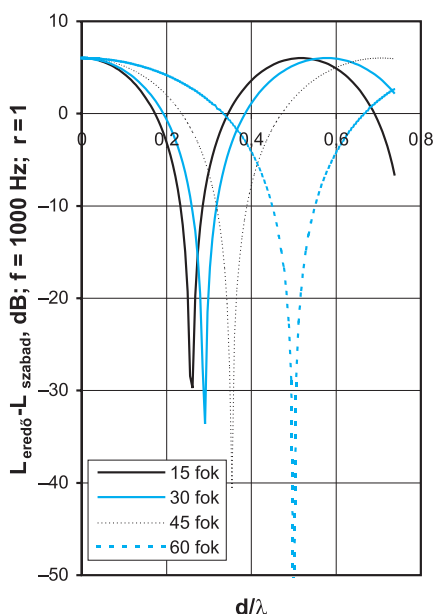
- a beesési szögnek van egy határértéke, amely felett teljes visszaverődés jön létre, tehát a reflexiós tényező abszolút értéke 1; ennek a szögnek a nagyságát a (2.94) képlet határozza meg

(2.88b) alapján, feltételezve, hogy a II. közegben a hullám terjedési sebessége nagyobb, mint az I. közegben:

$$\sin(\gamma_{be, \hat{a}tár}) = \frac{c_I}{c_{II}}; \quad (2.94)$$

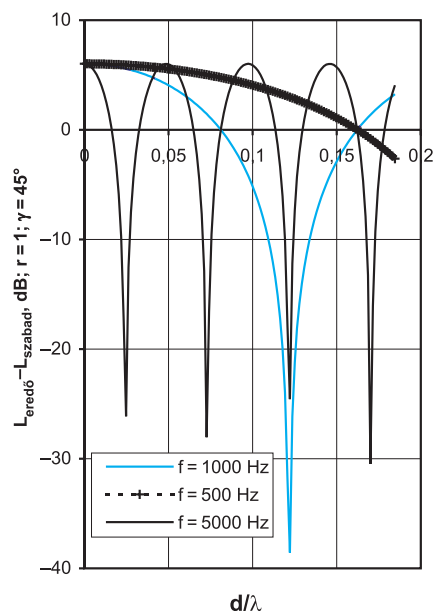
- ha a beesési szög 90° , akkor a reflexiós tényező értéke -1 , ami teljes visszaverődést és fázisfordítást jelent.

A 2.14a, d ábra az I. közegben a közeghatártól d távolságra, ill. a hullámhosszra normalizált d/λ távolságra kialakuló eredő hangnyomásszint és az azonos helyen a szabad téri hangterjedésben kialakuló hangnyomásszint különbségét szemlélteti. Az 2.14a ábrán a beesési szög a paraméter: minél nagyobb a beesési szög, annál messzebb kerül az első minimum a közeghatártól; a 2.14b ábrán a frekvencia a paraméter: minél nagyobb a frekvencia, annál közelebb esik az első minimum a közeghatárhoz, hiszen a nyomás első minimuma negyed hullámhossznál, azaz $\lambda/4$ értéknél van; ugyanez látható a 2.14c ábrán de 0° -os beesési szöggel; a 2.14d ábrán a reflexiós tényező a paraméter: a számításban a reflexiós tényező valós értékű volt; látható, hogy minél nagyobb a reflexiós tényező, annál élesebb a minimum $\lambda/4$ értéknél.



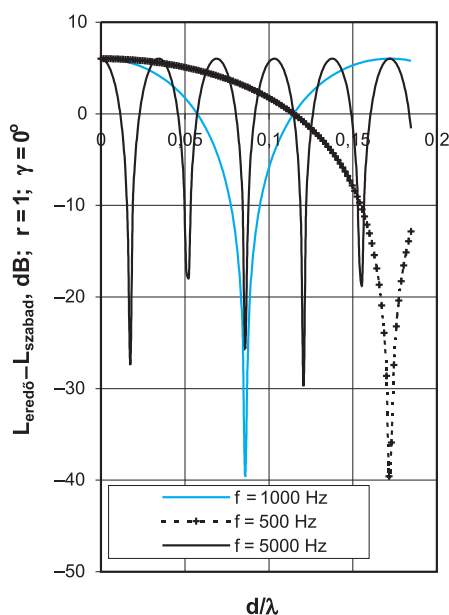
2.14a ábra. A hangvisszaverődés során kialakuló eredő hangnyomásszint és a szabadtéri terjedéshez tartozó hangnyomásszint különbsége síkhullámú terjedés és különböző beesési szögek (γ) esetén

d/λ a hangvisszaverő felülettől értelmzett, hullámhosszra normalizált távolság; r reflexiós tényező

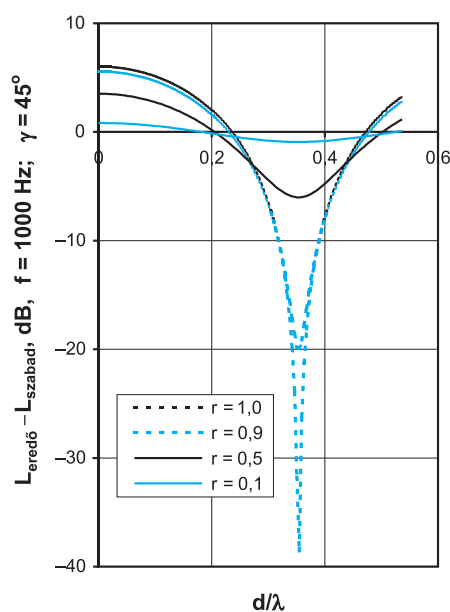


2.14b ábra. A hangvisszaverődés során kialakuló eredő hangnyomásszint és a szabadtéri terjedéshez tartozó hangnyomásszint különbsége síkhullámú terjedés és különböző frekvenciák esetén

d távolság a hangvisszaverő felülettől; r reflexiós tényező; γ beesési szög



2.14c ábra. A hangvisszaverődés során kialakuló eredő hangnyomásszint és a szabadtéri terjedéshez tartozó hangnyomásszint különbsége síkhullámú terjedés és különböző frekvenciák esetén
Magyarázat mint a 2.14b ábránál



2.14d ábra. A hangvisszaverődés során kialakuló eredő hangnyomásszint és a szabadtéri terjedéshez tartozó hangnyomásszint különbsége síkhullámú terjedés és különböző valós reflexiós tényezők (r) esetén
 d/λ a hangvisszaverő felület és a megfigyelés helye közötti, hullámhosszra normalizált távolság; r reflexiós tényező; γ beesési szög

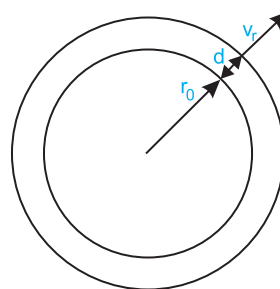
2.2.6. Pontszerű vagy gömb alakú hangforrás hangtere [IV.5], [IV.2]

A következő hangterjedési modell a pontszerű hangforrás hangterét írja le: ez a gömbhullámú hangtér, a gömbhullámú hangterjedés. Mind az elmélet, mind a gyakorlat szempontjából sokkal fontosabb a síkhullámú terjedés modelljénél: különböző formájú és kiterjedésű hangot sugárzó alakzatok elemi, pontszerű sugárzók összegzésével modellezhetők, az ideális pontszerű hangforrások gömbszimmetrikus teret keltenek maguk körül.

- Minden hullámterjedési formára igaz az, hogy a Huygens–Fresnel-elv szerint egy hullámfront burkolójának minden pontjáról újabb elemi hullámok indulnak ki, a keletkező hullám ezen elemi hullámok interferencia révén kialakuló eredője. Azonban olyan terjedési modellekre is szükség van, ahol már a legegyszerűbb leírásban is megjelenik a valósághoz kapcsolható hangforrás.
- A valósághoz közelítve olyan terjedési forma szükséges, ahol az elemi hullámok a forrástól távolodva széttartóak, a hullám a tér minden irányába terjedhet.
- A valóságban a hangforrásoktól elegendően nagy távolságra a források pontszerűvé válnak.

Mindezeket figyelembe vevő legegyszerűbb modell a lélegző gömb: egy középpont körül r_0 távolságra levő gömbfelület, amely a nyugalmi helyzete

körül rezgőmozgást végez. A teljes felület azonos fázisban, azonos amplitúddal mozog, tágul vagy zsugorodik. A modell vázlata a 2.15. ábrán látható. A lélegző gömb kiválasztott modellje azt eredményezi, hogy a hangterjedést leíró minden mennyiség – nyomás, részecskesebesség, intenzitás stb. – gömbszimmetrikus, tehát csak a sugárirányú helyfüggést kell vizsgálni.



2.15. ábra. Gömbhullám terjedésének modellje

A gömbhullámú hangtér sajátosságait a 2.2.2. részben ismertettek alapján, a gömbszimmetria felhasználásával célszerű feldolgozni. A hangterjedés vizsgálata során az egyik tényező a részecskesebesség és a sebességpotenciál közötti összefüggés. Ez a sugár mint változó figyelembevételével a (2.95) képlettel fejezhető ki. A nyomás és a sebességpotenciál közötti, valamint a közegsűrűség és a nyomás közötti korábban megismert összefüggés a jelen esetre is érvényes, az áttekinthetőség érdekében ezek megismételve a (2.96) és (2.97) képletekben találhatók.

A síkhullámhoz képest a terjedés geometriája eltér, ezért a folytonossági feltétel felírása – azonos fizikai tartalommal ugyan – eltérő. A 2.15. ábrán látható dr sugarú gömbhéjban levő anyagmennyiség változása, dM kifejezhető a sűrűség változásával (2.98). Ugyanakkor a tömegváltozás felírható a gömbhéjba belépő és az abból kilépő anyagmennyiség különbségként a (2.99) összefüggés szerint is:

$$v(r) = -\frac{\partial \Phi(r)}{\partial r}; \quad (2.95)$$

$$p = \rho \frac{\partial \Phi(r)}{\partial t}; \quad (2.96)$$

$$\frac{\partial \rho(r)}{\partial t} = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial p(r)}{\partial t}; \quad (2.97)$$

$$dM = d\rho \cdot 4 \cdot r^2 \cdot \pi \cdot dr = \frac{4 \cdot r^2 \cdot \pi}{c^2} \cdot \frac{\partial p}{\partial t} \cdot dt \cdot dr; \quad (2.98)$$

$$dM = 4 \cdot r^2 \cdot \pi \cdot \rho(r) \cdot v_r(r) \cdot dt - 4 \cdot (r + dr)^2 \cdot \pi \cdot \rho(r + dr) \cdot v_r(r + dr) \cdot dt = -4 \cdot \pi \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \cdot v_r \cdot \rho \right) \cdot dr dt. \quad (2.99)$$

A (2.98) és (2.99) egyenletek egyenlősége a sebességpotenciál-függvényre rendezhető át. E függvényen további matematikai műveleteket végezve a $\Phi(r)$ sebességpotenciál-függvényre vonatkozó hullámegyenlet vezethető le, amelyet a (2.100) egyenlet mutat. Lényeges sajátosság az, hogy a hullámegyenlet nem önmagában a sebességpotenciál függvényre, hanem az $r \times \Phi(r)$ szorzatra vonatkozik:

$$\frac{\partial^2}{\partial r^2} (r \cdot \Phi(r)) = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2}{\partial t^2} (r \cdot \Phi(r)). \quad (2.100)$$

A hullámegyenlet általános megoldása, mint minden hullámterjedés megoldása során, a forrástól távolodó és ahhoz közeledő hullám kombinációja. Az előbbi helyfüggést kifejező tagja $-k \cdot r$, az utóbbiét $+k \cdot r$ lenne. Ebből jelenleg a távolodó, tehát a növekvő r irányába tartó hullám meghatározása szükséges. Szinuszos változást feltételezve a $p(r,t)$ hangnyomás és a $v(r,t)$ részecskesebesség a (2.101) és (2.102) összefüggés szerint fejezhető ki. Mindkét kifejezésben az exponenciális tagban megfigyelhető a hely- és időfüggés hullámegyenletre jellemző alakja. Mind a nyomás, mind a sebesség amplitúdója csökkenő az r koordináta, tehát a távolság növekedtével. Ez a számítás szempontjából annak következménye, hogy a hullámegyenlet nem önmagában a sebességpotenciálra, hanem a sebességpotenciál és az r koordináta szorzatára vonatkozik. A részecskesebesség kifejezésében felfedezhető a síkhullámnál talált összefüggés, amely a távolféri komponenset adja meg. p_l állandó, mértékegysége N/m. Mindkét kifejezés komplex a terjedés és veszteségek egyszerűbb leírása érdekében:

$$p(r,t) = \frac{p_l}{r} \cdot e^{i \cdot (\omega \cdot t - k \cdot r)}; \quad (2.101)$$

$$v(r,t) = \frac{i}{k \cdot \rho_L \cdot c} \cdot \frac{\partial p}{\partial r} = \frac{p_l}{\rho_L \cdot c \cdot r} \cdot \left(1 + \frac{1}{i \cdot k \cdot r} \right) \cdot e^{i \cdot (\omega \cdot t - k \cdot r)}. \quad (2.102)$$

A további elemzés céljából érdemes a valós függvényeket is megadni. A (2.109) képlet a nyomás terjedését fejezi ki valós

alakban. A (2.110) összefüggés a részecskesebesség közelítése, amelyben kr kis értéke és a képzetes egységgel való szorzás miatt a nyomáshoz képest 90° fáziseltérés tapasztalható. A részecskesebesség amplitúdója a közel térben másodfokú hiperbola szerint csökken. Ennek következménye az, hogy egy bizonyos távolság után a közelítéri összetevő elhanyagolható. A részecskesebesség távolféri alakja hasonló a síkhullámnál kapott sebesség-összefüggéssel, ami – szemlélettel összhangban – arra utal, hogy ha a kr szorzat nagy, tehát a hullámhosszhoz képest a megfigyelő a forrástól távol helyezkedik el, akkor környezetében a gömbhullámot a terjedés szempontjából síkhullámnak tekintheti. A távolféri sebesség-összetevő amplitúdója a nyomáshoz hasonlóan a távolság függvényében hiperbolafüggvény szerint csökken, l. a (2.111) összefüggést. A gömbhullám térfogatsebességét is felhasználva a (2.102), (2.110) és (2.111) összefüggéseknek megfelelő részecskesebességek láthatók a 2.18a és 2.18b ábrán. A vízszintes tengely minkét esetben a gömb középpontjától mért és a hullámhosszra normalizált távolság, r/λ . A függőleges tengelyen a három összefüggéssel meghatározott sebességamplitúdó abszolút értéke látható 100 Hz, illetve 4000 Hz frekvencián. Az ábrákból a közel tér és a távolfér határa kijelölhető.

A gömbhullámmodell lehetőséget ad arra is, hogy a hangforrás akusztikai teljesítménye és a hangterjedés közötti kapcsolatot kidolgozható legyen. Első lépésben a hangforrás „forrásrősségét” a térfogatsebessége jellemzi, amely amplitúdó jellegű, jele Q , mértékegysége m^3/s . Ha a lélegző gömb sugara r_0 , akkor a térfogatsebesség, a lélegző gömb felületének rezgésebbesség amplitúdója v_{lr} , ill. a nyomás rezgésamplitúdója, p_l között a következő összefüggés írható fel:

$$Q = 4 \cdot \pi \cdot r_0^2 \cdot v_{lr} = \frac{4 \cdot \pi}{\rho_L \cdot c \cdot k \cdot i} \cdot p_l \cdot (1 + i \cdot k \cdot r_0) \cdot e^{-i \cdot k \cdot r_0}. \quad (2.103)$$

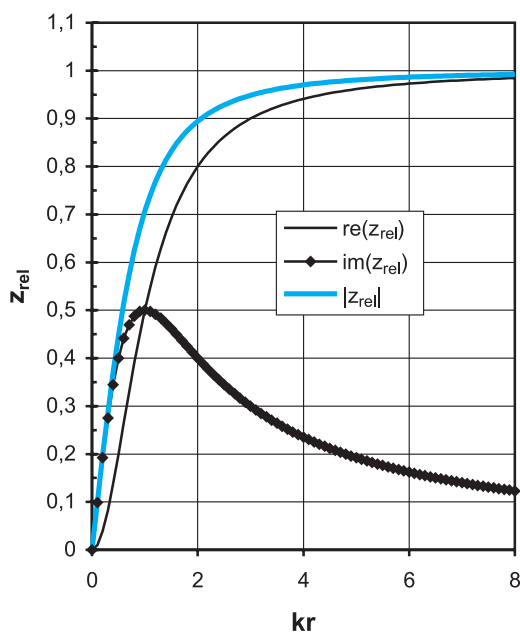
Ha a hangforrás sugara a hullámhossz $1/6$ részénél kisebb, tehát $k \cdot r_0 \ll 1$, akkor a forrás térfogatsebesség-amplitúdója és a hanghullám nyomásamplitúdója között a (2.104) összefüggéseknek megfelelő kapcsolat írható fel. A terjedés számításához ezt az összefüggést lehet pl. a (2.101)-be, vagy (2.102)-be helyettesíteni:

$$p_l = \frac{i \cdot \omega \cdot \rho_L \cdot Q}{4 \cdot \pi}. \quad (2.104)$$

Gömbhullámú terjedés esetén a karakterisztikus hullámimpedancia a (2.105a) összefüggés szerint alakul. Látható, hogy távolságfüggő, egy ellenállás jellegű valós tagból és egy képzetes, tömeg jellegű tagból áll. A távolférben, tehát ha $k \cdot r \gg 1$, a (2.105a) kifejezés a síkhullámú terjedésre jellemző karakterisztikus hullámimpedanciájának értékére egyszerűsödik. A forrás közelterében az ellenállás és a tömeg jellegű tag éppúgy megmarad, mint az általános alakban látható távolságfüggés. A 2.16. ábrán z_{0rel} , a karakterisztikus hullámimpedancia $\rho_L \cdot c$ -re normalizált értéke látható – l. a (2.105b) a $k \cdot r$ szorzat függvényében: a valós és képzetes rész, valamint az abszolút érték:

$$z_0 = \frac{p}{v_r} = \rho_L \cdot c \cdot \frac{(k \cdot r)^2}{1 + (k \cdot r)^2} + \frac{i \cdot \omega \cdot \rho \cdot r}{1 + (k \cdot r)^2}; \quad (2.105a)$$

$$z_{0rel} = \frac{z_0}{\rho_L \cdot c}. \quad (2.105b)$$



2.16. ábra. A gömbhullámú terjedéshez tartozó z_{rel} relatív karakterisztikus hullámimpedancia $re(z_{rel})$ valós része, $im(z_{rel})$ képzetes része és $|z_{rel}|$ abszolút értéke a (kr) szorzat függvényében

z_{rel} a karakterisztikus hullámimpedancia értéke $\rho_L c$ -re normalizálva

A kr érték növekedése egyúttal a frekvencia növekedését is jelenti. Látható, hogy ha $k \cdot r$ nagyobb, mint 6, akkor:

$$z_0 \approx \rho_L \cdot c. \quad (2.106)$$

A gömbhullám egységnyi felületen keresztül szállított teljesítménye, azaz I intenzitása meghatározható:

$$I = \lim_{\tau \rightarrow \infty} \frac{1}{\tau} \cdot \int_0^{\tau} p \cdot v dt. \quad (2.107)$$

A gömbhullámú terjedés főbb sajátosságai:

- ha a gömbhullámot pontszerű hangforrás vagy lélegző gömb – olyan gömbhéj, amelynek felülete a nyugalmi helyzet körül harmonikus rezgőmozgást végez, és a felület azonos fázisban és azonos amplitúdóval rezeg – hozza létre, akkor a keletkező hangtér a gömb középpontjára gömbszimmetrikus lesz, a rezgése sebesség sugárirányú, a hullámterjedés jellemzői csak az r jelű távolságtól függenek; az azonos rezgési állapotú helyek koncentrikus gömbfelületeket alkotnak;
- ha a lélegző gömb sugara sokkal kisebb, mint a hullámhossz, és a lélegző gömb térfogat sebességének m^3/s -ban kifejezett amplitúdója Q , akkor a p_1 amplitúdó abszolút értéke a (2.108) összefüggés szerint fejezhető ki, a térfogatsebesség és a nyomás között 90° fáziseltérés van:

$$|p_1| = \frac{\omega \cdot \rho_L}{4 \cdot \pi} \cdot Q; \quad (2.108)$$

- a hangforrás körül a hangnyomás gömbszimmetrikus, az idő- és helyfüggésben megfigyelhető a hullámterjedés kifejezése; a harmonikus rezgés amplitúdója is helyfüggő, a középponttól távolodva az $1/r$ függvény szerint csökken; a képletben p_1 a nyomásamplitúdó egy kezdeti értéke, állandó, amelyet a hangforrás forráserősségét kifejező térfogatsebességgel a (2.108) összefüggés kapcsol össze:

$$p(r, t) = \frac{p_1}{r} \cdot \cos(\omega \cdot t - k \cdot r); \quad (2.109)$$

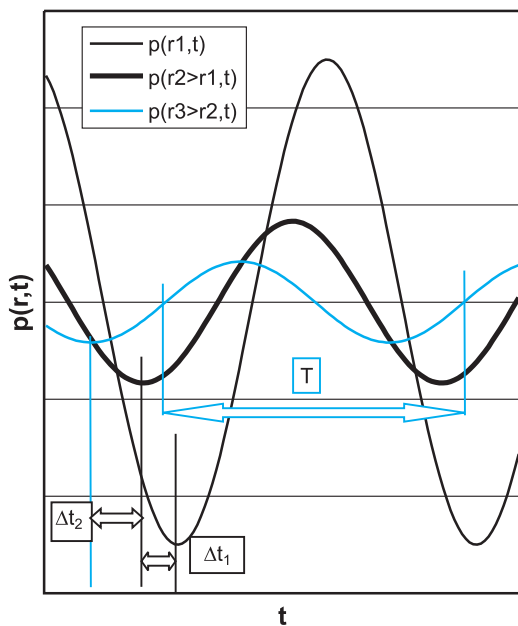
- a nyomás hely- és időfüggését a 2.17. és 2.18. ábra szemlélteti; a helyfüggést bemutató ábrán három időpontban felvett hangnyomás figyelhető meg az r távolság függvényében; megfigyelhető az idő és a távolság szerinti periodicitás – T periódusidő és λ hullámhossz az ábra jelölésével, valamint a Δt időbeli és a Δx hely szerinti eltolások, amelyekre a síkhullámnál ismertettek változatlanul igazak;
- a részecskesebesség a köztérben és a távotérben minőségileg eltérő sajátosságokkal rendelkezik; a köztérben az amplitúdó $1/r^2$ szerint csökken, a nyomás és a sebesség között 90° fáziseltérés van; a távotérben az amplitúdó távolságfüggése megegyezik a nyomás helyfüggésével ($1/r$), a nyomás és a sebesség azonos fázisban van; a távotéri terjedés az amplitúdók csökkenésétől eltekintve a síkhullámú terjedés sajátosságait mutatja:

$$v_{köztér} \approx \frac{Q}{4 \cdot r^2 \cdot \pi} \cdot \sin(\omega \cdot t - k \cdot r); \quad (2.110)$$

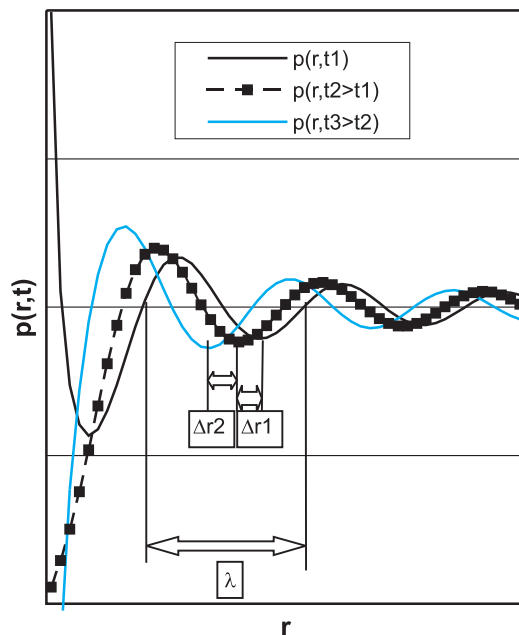
$$v_{távol} \approx \frac{\omega \cdot Q}{4 \cdot r \cdot c \cdot \pi} \cdot \cos(\omega \cdot t - k \cdot r). \quad (2.111)$$

A 2.18a, 2.18b ábrán a köztéri, távotéri, valamint a (2.102) összefüggéssel meghatározott pontos sebességamplitúdó látható a hullámhosszra normalizált távolság, r/λ függvényében. Látható, hogy a köztér felső határa $r/\lambda = 0,2$, a távotér alsó határa $r/\lambda = 1$;

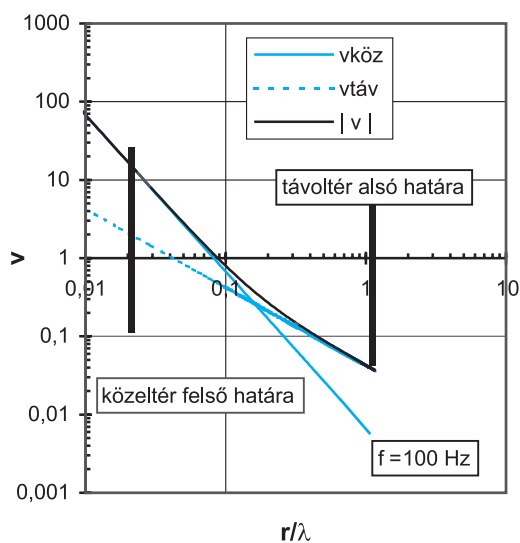
- karakterisztikus hullámimpedancia a távotérben megegyezik a síkhullámú terjedés hullámimpedanciájával;
- a távotérben a gömbhullám által szállított, egységnyi felületen áthaladó teljesítmény – intenzitás – a síkhullámhoz hasonló módon adható meg; az intenzitás gömbhullámú hangterjedés esetén is a hangnyomás négyzetével arányos; ugyanakkor a hangnyomás effektív értékének csökkené-



2.17a ábra. A hangnyomás időfüggése három különböző távolságban gömbhullámú terjedés esetén
 t idő, változó; $r_3 > r_2 > r_1$ távolság paraméterek; T periódusidő;
 $p(r,t)$ hangnyomás a távolság és idő függvényében

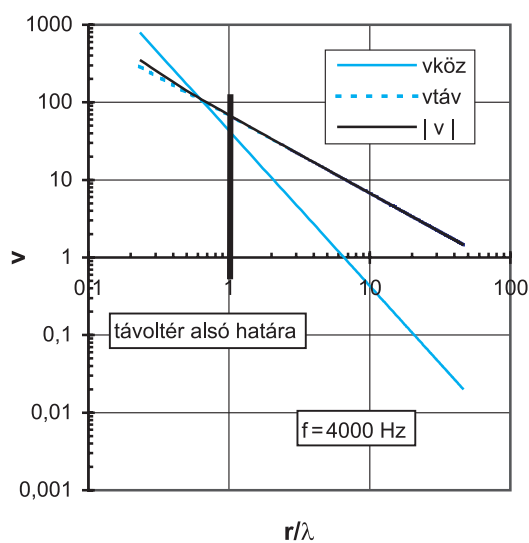


2.17b ábra. A hangnyomás távolságfüggése három különböző időpontban gömbhullámú terjedés esetén
 r távolság változó; $t_3 > t_2 > t_1$: időpont paraméterek;
 λ hullámhossz; $p(r,t)$ hangnyomás a távolság és idő függvényében



2.18a ábra. Részecskesebesség és közeltéri, távoltéri közelítése $f=100$ Hz frekvencián

$vköz$ részecskesebesség amplitúdójának közeltéri közelítése,
 $vtáv$ részecskesebesség amplitúdójának távoltéri közelítése;
 $|v|$ részecskesebesség abszolút értéke



2.18b ábra. Részecskesebesség és közeltéri, távoltéri közelítése $f=4000$ Hz frekvencián

$vköz$ részecskesebesség amplitúdójának közeltéri közelítése,
 $vtáv$ részecskesebesség amplitúdójának távoltéri közelítése;
 $|v|$ részecskesebesség abszolút értéke

se miatt az intenzitás a távolság négyzetével csökken:

$$I(r) = \frac{p_{eff}^2(r)}{\rho_L \cdot c}; \quad (2.112)$$

- a távotérben a hullám energiasűrűsége és intenzitása között a síkhullámú terjedésnél meghatározott kapcsolat áll fenn;
- a gömbszimmetrikus hangtér miatt a forrás W hangteljesítménye egyszerűen meghatározható a (2.113) összefüggés szerint, vagy az r távolságra kialakuló hangnyomás effektív értékének négyzetéből, vagy akár a hangforrás térfogatsebessége effektív értékének négyzetéből:

$$\begin{aligned} W &= 4 \cdot r^2 \cdot \pi \cdot I(r) = \\ &= 4 \cdot r^2 \cdot \pi \cdot \frac{p_{eff}^2(r)}{\rho_L \cdot c} = \frac{\omega^2 \cdot \rho_L \cdot Q_{eff}^2}{4 \cdot \pi \cdot c}. \end{aligned} \quad (2.113)$$

Az összefüggés középső részét, amelyet négyzetes távolságtörvénynek is neveznek, és amely a gyakorlati zajcsökkentési megoldások mérlegelése során fontos szemléleti pillér, célszerű szintekben is felírni:

$$L_w = L_p(r) + 10 \cdot \lg \frac{4 \cdot r^2 \cdot \pi}{1m^2}. \quad (2.114)$$

Az összefüggés, amelynek második tagja a gömbhullámú terjedéshez tartozó $D_{táv}$ távolsági csillapítás, azt jelenti, hogy a pontszerű, a tér minden irányába azonos akusztikai teljesítményt sugárzó hangforrástól r távolságra kialakuló hangnyomásszint és a hangforrás hangteljesítményszintje között a távolság teremt kapcsolatot. Minél nagyobb a távolság, annál kisebb a hangnyomásszint. A távolság kétszeresre növelése 6 dB hangnyomásszint-csökkenést eredményez. Ez természetesen az ideális gömbhullámú terjedés sajátossága.

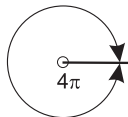
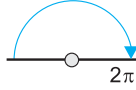
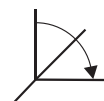
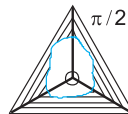
A (2.114) összefüggés a hangteljesítmény meghatározásának lehetőségén túl több más fontos elemet is tartalmaz:

- indokolja azt, hogy nemcsak a síkhullám, hanem – kisebb megszorításokkal – a gömbhullámterjedés esetén is helyes és célszerű a (2.5), (2.6) és (2.62) összefüggések kapcsán ismertetett vonatkoztatásiérték-választás: a síkhullámú terjedés a gömbhullámú terjedés közelítése a hangforrástól elegendően nagy távolságban;
- a gyakorlati zajcsökkentés számára – szomorú – következtetésekre vezet; a mindennapi tapasztalataink azt mutatják, hogy egy működő hangforrástól távolodva annak hangját egyre halkabban

halljuk, tehát a hangforrás és a védendő terület közötti távolság növelése – ha mód van rá – zajcsökkentési módszerként is alkalmazható; e módszer hatékonysága azonban csekély, mert 6 dB hangnyomásszint-csökkenéshez a kiindulótávolságot meg kell kétszerezni: ha a hangforrás és a megfigyelés helye között a távolság 3 m, akkor a 6 dB zajcsökkentés eléréséhez szükséges távolság 6 m; ha azonban a hangforrás és a megfigyelés helye közötti távolság 30 m, akkor a 6 dB zajcsökkentéshez szükséges távolság 60 m;

- a (2.114) képlet előzményeiben kiindulófeltétel volt az, hogy a hangforrás gömbszimmetrikus, és az, hogy a környezetben nincs hangvisszaverő felület; a gyakorlatban azonban a hangforrás gyakran hangvisszaverő felületen, két hangvisszaverő felület metszéspontján, vagy akár három felület metszéspontjában helyezkedik el; ezek az egyszerű elvi esetek a következőképpen magyarázhatók: a kiinduló esetben a hangforrás a környezetet $\Omega = 4 \cdot \pi$ térszögben „látja”; a további esetekben a térszög kisebb, és a (2.114) összefüggés ennek megfelelően módosul; a térszög felezése azonos hangteljesítmény mellett mindig 3 dB hangnyomásszint-növekedést eredményez, tehát nem mindegy, hogy egy hangforrás hol helyezkedik el; a gyakorlat modellezése szempontjából említésre érdemes hangforrás-elhelyezkedéseket a 2.2. táblázat foglalja össze.

2.2. táblázat. Térszög a hangforrás helye alapján

Elrendezés vázlata	Térszög
	4π
	2π
	π
	$\pi/2$

A térszöget figyelembe vevő hangteljesítményszint–hangnyomásszint kapcsolatát a (2.115a) képlet mutatja a (2.113) képlet általánosítása alapján. A (2.7) képlettel bevezetett távolsági csillapítás a gömbhullámú terjedésben a (2.115b) összefüggésre adódik:

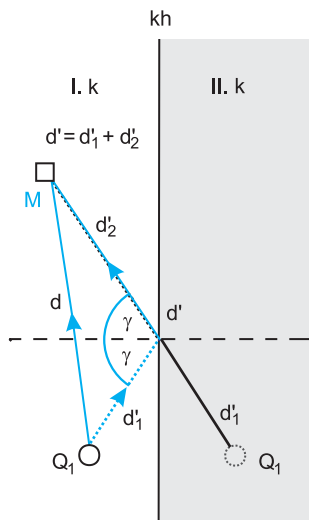
$$L_w = L_p + 10 \cdot \lg \left(\frac{r^2 \cdot \Omega}{1 \text{ m}^2} \right); \quad (2.115a)$$

$$D_{\text{táv}} = 10 \cdot \lg \left(\frac{r^2 \cdot \Omega}{1 \text{ m}^2} \right) \quad (2.115b)$$

2.2.7. Gömbhullám visszaverődése sík felületű közeghatárról

A vizsgálandó elrendezés vázlatos ábrája a 2.19. ábrán látható. A hangforrás lélegző gömb, kisméretű, tehát a mind a hangvisszaverő felület, mind a megfigyelési pont (M) a hangforrás távlerében található. A távlerében a részecske sebesség sugárirányú, a hangnyomással azonos fázisban van. Ezért a hangvisszaverődés a síkhullámú terjedésnek megfelelően közelíthető.

A forrás és a megfigyelési pont közötti távolság d , a hangforrás térfogatsebessége Q . A hangvisszaverődés útja egyenes, a beesési és a visszaverődési szög megegyezik egymással, mint a síkhullámú terjedésnél. A hangvisszaverődés pályája d' . A visszaverődés geometriája miatt szemléletesen úgy is modellezhető a jelenség, mintha a visszavert hullám vesszővel jelölt



2.19. ábra. Gömbhullám visszaverődése közeghatárról

I. k, II. k, kh: lásd a 2.12. ábrát; d , d_1 , stb.: távolságok az ábra szerint

Q , Q' a hangforrás és a tükörforrás térfogatsebesség amplitúdója; M a megfigyelés helye; d , d' , d_1 , d_2 távolságok az ábra szerint; γ beesési és visszaverődési szög

tükörforrástól indulna ki. A tükörforrás térfogatsebessége Q' , amely a közeghatár hangelnyelési tényezője segítségével határozható meg. Hasonló megfontolásból adható meg a tükörforrás hangteljesítménye, W' a hangforrás hangteljesítményéből. Ideálisan merev közeghatár esetén a tükörforrás és az eredeti hangforrás azonos hangteljesítményű. A valóságos határolóeszközök hangelnyelési tényezője nullánál nagyobb, így a tükörforrás teljesítménye kisebb lesz, mint az eredeti forrásé:

$$|Q'| = |Q| \cdot \sqrt{1 - \alpha}; \quad (2.116)$$

$$W' = W \cdot (1 - \alpha). \quad (2.117)$$

Az I. közegben az eredő hangnyomás, p_e a közvetlen és a visszavert hullám hangnyomásának összege, l. a (2.118) összefüggést. A hangvisszaverő felületet a korábbiakhoz hasonlóan szintén az r reflexiós tényező jellemzi. Ily módon a közeghatár normális irányú részecske sebességére vonatkozó peremfeltétel is teljesül:

$$p_e = i \cdot \sqrt{\frac{W \cdot \rho_L \cdot c}{4 \cdot \pi}} \cdot \left(\frac{e^{-i \cdot k \cdot d}}{d} + \frac{r \cdot e^{-i \cdot k \cdot d'}}{d'} \right) \cdot e^{i \omega t}. \quad (2.118)$$

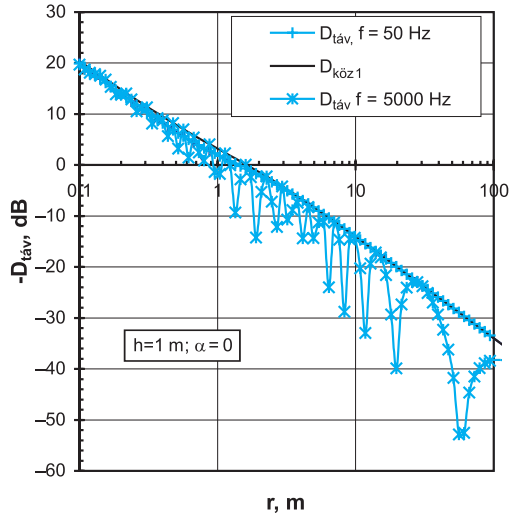
Az eredő hullám intenzitása, I_e azonban nem lesz egyenlő általános esetben a két hullám intenzitásának összegével. Ismét felhasználva azt, hogy a hangforrás és a tükörforrás is kisméretű, tehát az eredő hullámintenzitás arányos a hangnyomás abszolút értékének négyzetével valamint feltételezve, hogy a reflexiós tényező valós, az eredő hullám intenzitása a (2.119) összefüggés szerint alakul. Az első tag a beeső hullám, a második a visszavert hullám intenzitása. A harmadik tag a közvetlen és visszavert hullám összegzéséből adódik:

$$I_e = \frac{|p_e|^2}{\rho_L \cdot c} = \frac{W}{4 \cdot \pi} \cdot \left(\frac{1}{d^2} + \frac{1 - \alpha}{d'^2} + \frac{2 \cdot \sqrt{1 - \alpha} \cdot \cos(k \cdot (d' - d))}{d \cdot d'} \right) \quad (2.119)$$

Az összefüggés harmadik tagjának trigonometrikus része periodikus változást jelent, ami pesszimális esetben elhagyható, így a méretezés a (2.120) képlettel végezhető:

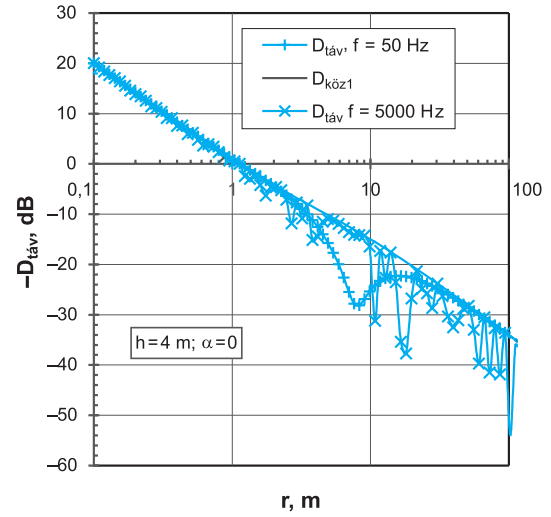
$$\frac{|p_e|^2}{\rho_L \cdot c} \approx \frac{W}{4 \cdot \pi} \cdot \left(\frac{1}{d^2} + \frac{1 - \alpha}{d'^2} + \frac{2 \cdot \sqrt{1 - \alpha}}{d \cdot d'} \right) \quad (2.120)$$

A műszaki gyakorlatban, ha a hangforrás széles sávú vagy időben változó frekvenciájú jelet állít elő, a hangvisszaverő felület reflexiós tényezője valós, a megfigyelés helyén a közvetlen hang és a közeghatárról érkező visszavert hang eredőjét közelítőleg a (2.120) összefüggés szerint határozható meg. Az egyes távolságok, d és d' jelentését a 2.19. ábra szemléltette. Az ábrán és a képletben W a hangforrás akusztikai teljesítménye, α a hangvisszaverő felület hangelnyelési tényezője. A hangvisszaverődés során a beesési szög és a visszaverődési szög, γ , γ' egyenlő. Az összefüggés szemléletes tartalma az, hogy a hangvisszaverődés ha-



2.20. ábra. A hangvisszaverődés szemléltetése gömbhullámú terjedés esetén

A 4π térszögbe sugárzó hangforrás a talaj felett $h = 1$ m magasságban van, a talaj α hangelnyelési tényezője $\alpha = 0$, ami ideálisan merev hangvisszaverő felületet jelent; $D_{táv}$ a (2.7) összefüggéssel bevezetett távolsági csillapítás



2.21. ábra. A hangvisszaverődés szemléltetése gömbhullámú terjedés esetén

A 4π térszögbe sugárzó hangforrás a talaj felett $h = 4$ m magasságban van, a talaj α hangelnyelési tényezője $\alpha = 0$, ami ideálisan merev hangvisszaverő felületet jelent; $D_{táv}$ a (2.7) összefüggéssel bevezetett távolsági csillapítás

tását úgy lehet tekinteni, mintha a visszaverő sík mögött tükör hangforrás helyezkedne el, amelynek akusztikai teljesítménye $W \cdot (1 - \alpha)$. Mindkét hangforrás gömbszerű, a tér minden irányában azonos teljesítményt sugároz. A képlet valójában az intenzitásokat összegzi. Szintekben megadott formáját a (2.121) összefüggés mutatja be, ahol az eredő hangnyomásszintet és a hangforrás hangteljesítményszintjét L_{pe} , L_w jelöli:

$$L_{pe} = L_w + 10 \cdot \lg \left(\frac{1}{4 \cdot \pi \cdot d^2} + \frac{1 - \alpha}{4 \cdot \pi \cdot d'^2} + \frac{\sqrt{1 - \alpha}}{2 \cdot \pi \cdot d \cdot d'} \right) \quad (2.121)$$

A (2.119) képletből a (2.7) összefüggésben bevezetett $D_{táv}$ távolsági csillapítás közvetlenül meghatározható:

$$D_{táv} = -10 \cdot \lg \left(\frac{1}{4 \cdot \pi \cdot d^2} + \frac{1 - \alpha}{4 \cdot \pi \cdot d'^2} + \frac{\sqrt{1 - \alpha} \cdot \cos(k \cdot (d' - d))}{2 \cdot \pi \cdot d \cdot d'} \right) \quad (2.122a)$$

A közelítő, pesszimális összefüggést a (2.123b) egyenlet adja:

$$D_{köz} = -10 \cdot \lg \left(\frac{1}{4 \cdot \pi \cdot d^2} + \frac{1 - \alpha}{4 \cdot \pi \cdot d'^2} + \frac{\sqrt{1 - \alpha}}{2 \cdot \pi \cdot d \cdot d'} \right) \quad (2.122b)$$

A (2.119)–(2.123) összefüggések harmadik tagját elhagyva a geometriai viszonyoktól és a hangelnyelési tényezőtől függő 0–3 dB hiba keletkezik,

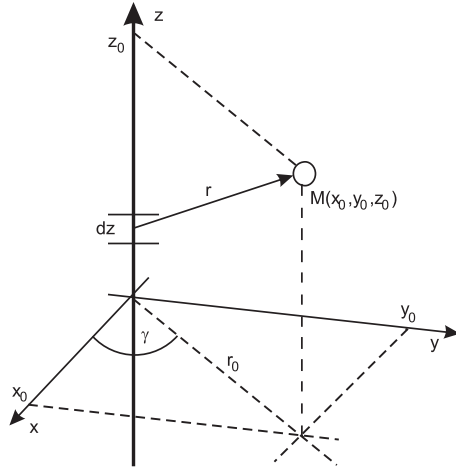
azonban ezzel a közelítéssel a hangvisszaverődés még szemléletesebben és egyszerűbben magyarázható: a megfigyelési helyre érkező eredő hang közvetlen és visszavert összetevőre bontható. E közelítést a (2.123) összefüggés mutatja:

$$L_{pe} \approx L_w + 10 \cdot \lg \left(\frac{1}{4 \cdot \pi \cdot d^2} + \frac{1 - \alpha}{4 \cdot \pi \cdot d'^2} \right) + (0 \rightarrow 3 \text{ dB}). \quad (2.123)$$

A (2.112.) összefüggés pár minőségi jellegét a 2.20. és 2.21. ábra szemlélteti. Látható, hogy a koszinuszos tag elhagyása a (2.122a) képletből a távolságfüggés periodikusan lengő jellegét simítja ki, a biztonság javára. A talaj hangelnyelési tényezője a görbe menetét – a reális adatok tartományában – kissé befolyásolja. A hangforrás talaj feletti magassága szintén méretezést befolyásoló tényező.

2.2.8. Vonalszerű hangforrás hangtere [IV.5], [IV.2]

A különböző forrásoktól származó környezeti zaj modellezése szempontjából a következő fontos modell a vonalszerű hangforrás. A vonalszerű helyett pontosabb megnevezése lélegző cső lenne, a modell felépítése a 2.22. ábrán látható. A „lélegző, vékony cső” a z tengellyel esik egybe, amelynek környezetében nincs hangvisszaverő objektum. A cső vékony, sokkal kisebb az átmérője, d_0 , mint a távolság és a hullámszám szorzata, tehát $k \cdot r \gg d_0$.



2.22. ábra. Vonalszerű hangforrás hangterének meghatározása

A lélegző jelző azt fejezi ki, hogy a cső fala a teljes tartományban azonos amplitúdóval és fázisban rezeg nyugalmi helyzete körül.

A lélegzőcső-forrás erősségére a hosszegységnyi csőszakaszból kiáramló térfogatsebesség-amplitúdó, q' a jellemző, mértékegysége $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$. A lélegző cső a modellben harmonikus rezgést végez. A részletes levezetésből (a hullámegyenlet felírása és az idő- és a helykoordináták szeparálása) az adódik, hogy a hangnyomás szintén harmonikus rezgés lesz az idő függvényében.

A hangnyomás helyfüggésének meghatározására a hullámegyenlet megoldásánál egyszerűbb lehetőség is adódik, ha csak a távolodó hullám meghatározása a cél. A dz hosszúságú csődarab által az r távolságú, bejelölt pontban keletkező elemi hangnyomást a (2.124) összefüggés adja meg. Az összefüggés a (2.101) és (2.104) képletekből származik, pontszerű hangforrás környezetében kialakuló hangnyomást fejez ki. Más-képpen magyarázva a dz hosszúságú csődarabot pontszerű hangforrásnak lehet tekinteni. Az eredő hangnyomást összeg-

zéssel, tehát integrálással lehet meghatározni a (2.125) képlet szerint. A (2.116) összefüggés fizikai tartalma a (2.98) és (2.100) képletekből származik:

$$d\underline{p} = \frac{i \cdot k \cdot \rho_L \cdot c}{4 \cdot \pi \cdot r} \cdot q' \cdot e^{-i \cdot k \cdot r} \cdot dz; \quad (2.124)$$

$$\underline{p} = \frac{i \cdot k \cdot \rho_L \cdot c \cdot q'}{4 \cdot \pi} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{e^{-i \cdot k \cdot r}}{r} dz. \quad (2.125)$$

A dz elemi csődarab és az M megfigyelési pont közötti r távolság, amely értelemszerűen merőleges a cső tengelyére, néhány lépésben átalakítható, l. a (2.126)–(2.132) összefüggéseket, így a (2.125) képletben levő integrál helyettesítéssel 0-adrendű, másodfajú Hankel-függvényre vezet. A jelölések közül (r_0, x_0, y_0, z_0) jelentése a 2.22. ábrán látható. A többi mennyiség célszerűen megválasztott helyettesítés:

$$r = \sqrt{x_0^2 + y_0^2 + (z - z_0)^2}; \quad (2.126)$$

$$z - z_0 = \xi = -i \cdot r_0 \cdot \sin(\alpha); \quad (2.127)$$

$$r_0 = \sqrt{x_0^2 + y_0^2}; \quad (2.128)$$

$$r = r_0 \cdot \cos(\alpha); \quad (2.129)$$

$$dy = d\xi = -i \cdot r_0 \cos(\alpha) d\alpha; \quad (2.130)$$

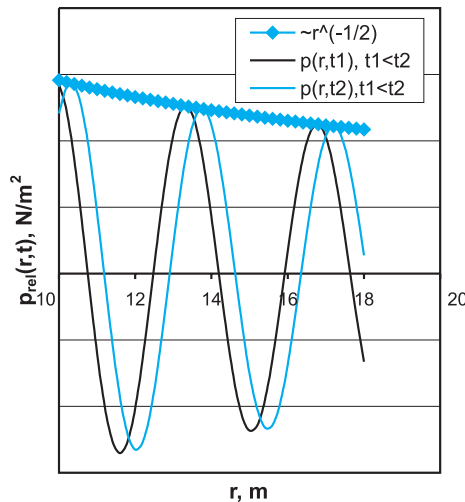
$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{e^{-i \cdot k \cdot r}}{r} dz = -i \cdot \pi \cdot H_0^{(2)}(k \cdot r); \quad (2.131)$$

$$\underline{p} = \frac{k \cdot \rho_L \cdot c \cdot q'}{4} \cdot H_0^{(2)}(k \cdot r). \quad (2.132)$$

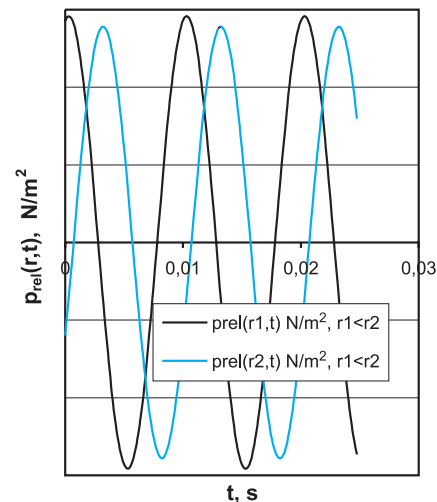
A Hankel-függvény $k \cdot r \gg 1$ feltételekkel alkalmazható közelítő alakjának felhasználásával a hangnyomás a következő lesz:

$$\underline{p}(r) \approx \frac{k \cdot q' \cdot \rho_L \cdot c}{4} \cdot \sqrt{\frac{2}{\pi \cdot k \cdot r}} \cdot e^{-i \left(k \cdot r - \frac{\pi}{4} \right)}. \quad (2.133)$$

A 2.23. ábrán a hangnyomás helyfüggése látható két eltérő időpontban, a 2.24. ábrán pedig időfüggése szerepel két eltérő helyen felvéve. Mindkét ábrán megfigyelhetők a hullám-



2.23. ábra. A hangterjedés helyfüggése



2.24. ábra. A hangterjedés időfüggése

terjedés korábban megismert jellegzetességei, valamint az ampli-túdócsökkenés a hely függvényében. A helyfüggés meghatározásakor r a cső tengelyére merőleges távolságot jelenti.

A csőtől elegendően nagy távolságra a sugárirányú részecskesebesség és a hangnyomás fázisban lesz, így a cső hangteljesítménye a síkhullámnál megismert módon határozható meg. Az egységnyi hosszú csőszakasz W' hangteljesítményét W/m mértékegységben a (2.134) összefüggés fejezi ki:

$$W' = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{|p(r)|^2}{\rho_L \cdot c} = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \frac{p_{eff}^2(r)}{\rho_L \cdot c} = \frac{q'^2 \cdot \rho_L \cdot c \cdot k}{8}. \quad (2.134)$$

Tendenciájában azonos eredmény keletkezik akkor, ha a vonalszerű hangforrás inkoherens elemekből áll [2.2], [2.3]. Az inkoherens vonal forrás egyszerű lehetőséget ad a véges hosszúságú, inkoherens forrás környezetében kialakuló hangnyomás effektív értékének meghatározására a (2.135) képletnek megfelelően: r a megfigyelési pont és a végtelen hosszú, egyenes forrás távolsága, ϕ a végtelen hosszú egyenes forrás egy szakaszának látószöge, $p_{eff}(r, \infty)$ a végtelen hosszú sugárzó által keltett hangnyomásszint, $p_{eff}(r, \phi)$ pedig a ϕ szögben látszó szakasztól származó hangnyomás effektív értékének négyzete:

$$\frac{p_{eff}^2(r, \infty)}{p_{eff}^2(r, \phi)} = \frac{2 \cdot \pi}{\phi}. \quad (2.135)$$

A vékony, végtelen hosszú, egyenes „lélegző cső” vagy vonalszerű hangforrás hangtere a következő sajátosságokkal rendelkezik:

- a hangtér a „lélegző cső” körül hengerszimmetrikus;
- a vékony cső vagy vonalszerű hangforrás egységnyi hosszú szakasza hangteljesítményének szintje, L'_w és r távolságra kialakuló hangnyomásszint, $L_p(r)$ között a kapcsolatot a (2.136) összefüggés fejezi ki; a távolság kétszerezése 3 dB hangnyomásszint-csökkenést eredményez. A képlet második tagja a vonalszerű hangforrástól származó hengerszimmetrikus hangtér esetében a $D_{táv}$ távolsági csillapítást jelenti:

$$L'_w = L_p(r) + 10 \cdot \lg \frac{2 \cdot r \cdot \pi}{1 \text{ m}}. \quad (2.136)$$

Ha a megfigyelési pontból vonalszerű forrásnak csak egy szakasza látszik, és a látószög ϕ , akkor a hangnyomásszint, $L(\phi)$ a végtelen hosszú forráshoz tartozó hangnyomásszinthez, $L(\infty)$ -hoz képest a látószögek arányában csökken a következő összefüggés alapján:

$$L(\phi) - L(\infty) = 10 \cdot \lg \left(\frac{\phi}{2 \cdot \pi} \right) \quad (2.137)$$

2.2.9. Felületek hangsugárzása [IV.5], [IV.2], [2.3]

Rezgőfelületek hangsugárzásának minden jellegzetessége erősen függ attól, hogy a felület milyen rezgést végez. Ezért e témakör részletes ismertetését a 3. fejezetet követően (Testhang terjedés szilárd, rugalmas közegben) a 4. fejezet tartalmazza. Az általános elvi megoldás a pontszerű, 2π térszögbe sugárzó elemi gömbsugárzók által elsugárzott hangteljesítmény összegzésével adható meg, akár koherens, akár inkoherens sugárzók is az elemi sugárzók.

Egy S nagyságú sík felület végtelen kiterjedésű, merev falban helyezkedik el. Ennek elemi kis, dS méretű felületeleme egy oldalra, 2π térszögbe sugároz. A felületelem térfogatsebessége egységnyi felületre vonatkoztatva q'' , mértékegysége $m^3/s/m^2$. A (2.101) és (2.104) összefüggés alapján a felületelem által elsugárzott, a felületelemtől r térbeli távolságra levő megfigyelési ponton kialakuló hang hangnyomását a (2.138) összefüggés adja meg. Az eredő hangnyomásszint összegzéssel, tehát integrálással határozható meg. Az integrálást a teljes sugárzó felületre kell elvégezni:

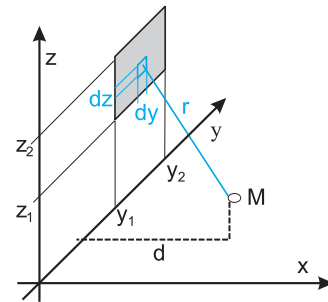
$$dp = \frac{i \cdot k \cdot \rho_L \cdot c}{4 \cdot \pi \cdot r} \cdot q'' \cdot e^{-i \cdot k \cdot r} \cdot dS; \quad (2.138a)$$

$$p = \frac{i \cdot k \cdot \rho_L \cdot c}{4 \cdot \pi} \cdot \int_S \frac{q'' \cdot e^{-i \cdot k \cdot r}}{r} dS. \quad (2.138b)$$

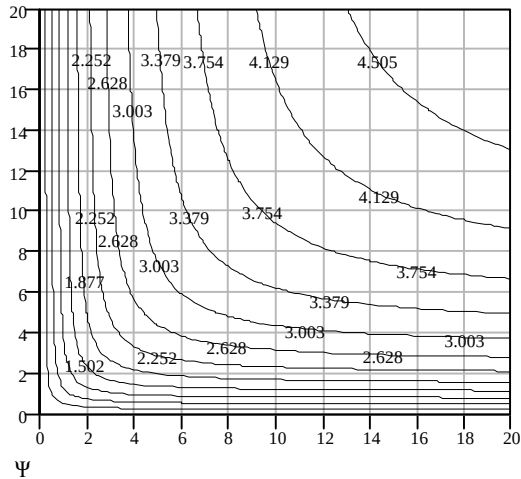
Ha a hangot sugárzó felület elemi sugárzóit inkoherens gömbsugárzók, akkor a 2.25. ábra elrendezését felhasználva további eredményre lehet jutni. Az ábrán látható $dS = dx \cdot dy$ méretű felületelem hangteljesítménye W , az általa keltett hangnyomása effektív értékének négyzetét, $p_{eff}^2(dS)$ a (2.138) képlet adja meg. A teljes felület nagysága S . Az eredő hangnyomás effektív értékét, p_{eff}^2 a (2.139) képlet fejezi ki. Az integrál ismert értékre megoldható. A képletben szereplő y_1, y_2, z_1, z_2 mennyiségek az integrálás határait, azaz a hangot sugárzó felület szélei jelölik, a megfigyelési pont és a felület közötti távolság d :

$$p^2(dS) = W' \cdot dS \cdot \frac{\rho_L \cdot c}{2 \cdot \pi \cdot r^2}; \quad (2.138c)$$

$$\frac{p_{eff}^2}{\rho_L \cdot c} = \frac{W'}{2 \cdot \pi} \cdot \int_{y=y_1}^{y_2} \int_{z=z_1}^{z_2} \frac{dy dz}{d^2 + y^2 + z^2}. \quad (2.139)$$

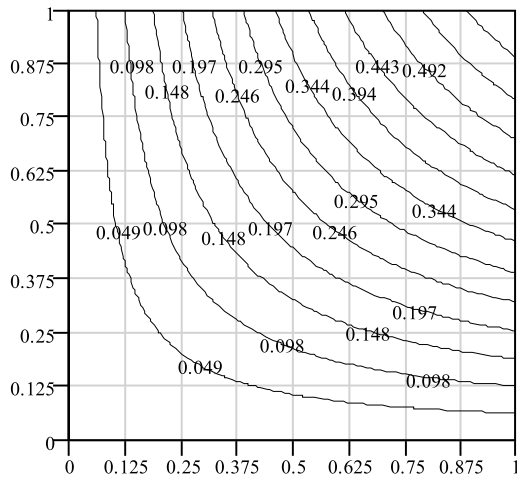


2.25. ábra. Inkoherens elemi sugárzókból álló felület hangsugárzása

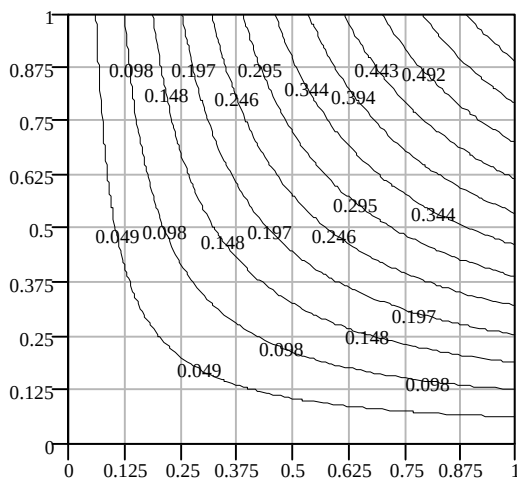


2.26a ábra. $\Psi(y, z)$ értéke szintvonalas ábrázolásban

A vízszintes tengelyen a téglalap alakú felület vízszintes méretének a megfigyelési pont távolságára normalizált értéke, a/d , a függőleges tengelyen pedig a függőleges méretének a megfigyelési pont távolságára normalizált értéke, b/d szerepel



2.26b ábra. $\Psi(y, z)$ értéke szintvonalas ábrázolásban
Magyarázat mint a 2.26a ábránál



2.26c ábra. $\Psi(y, z)$ értéke szintvonalas ábrázolásban
Magyarázat mint a 2.26a ábránál

Az integrálás arra a speciális esetre, a $y_1 = z_1 = 0$ azonos átalakítások után:

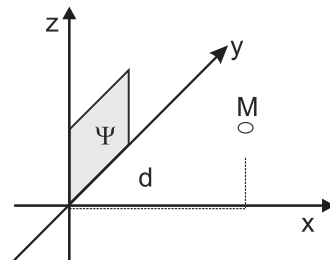
$$\frac{p_{\text{eff}}^2}{\rho_L \cdot c} = \frac{W'}{2 \cdot \pi \cdot d^2} \cdot \Psi(y, z); \quad (2.140)$$

$$\Psi(y, z) = \int_0^{\frac{y_2}{d}} \int_0^{\frac{z_2}{d}} \frac{dydz}{1 + \left(\frac{y}{d}\right)^2 + \left(\frac{z}{d}\right)^2}. \quad (2.141)$$

A $\Psi(y, z)$ függvény szintvonalas ábrázolásban a 2.26a, 2.26c ábrákon látható, a vízszintes és függőleges tengelyen y/d és z/d értékei szerepelnek.

Ha a hangot sugárzó felület a 2.27. ábra szerinti elrendezésben van a koordináta-rendszerben, és a felületegységre vonatkozó hangteljesítményszintje L'_w , akkor a felület síkjától d távolságban a hangnyomásszint $L_p(d)$ a (2.142) képlettel határozható meg. A téglalap alakú felület élhossza a és b :

$$L_p = L'_w + 10 \cdot \lg \left(\frac{\Psi\left(\frac{a}{d}, \frac{b}{d}\right)}{2 \cdot \pi \cdot d^2} \right) \quad (2.142)$$

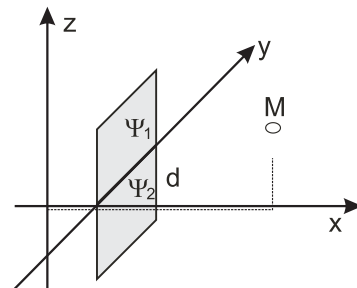


2.27. ábra. $\Psi(y, z)$ a sugárzófelület helyének függvényében

A 2.28. ábra szerinti elrendezésben Ψ értéke a következő képlettel határozható meg:

$$\Psi = \Psi_1 + \Psi_2. \quad (2.143)$$

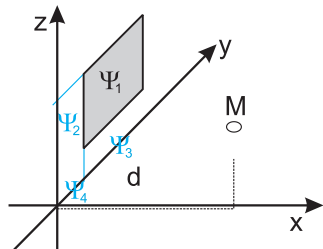
A 2.29. ábra elrendezésében Ψ értékét a (2.144)



2.28. ábra. $\Psi(y, z)$ a sugárzófelület helyének függvényében

képlet fejezi ki, ahol nincs sugárzó, ott Ψ negatív lesz:

$$\Psi = \Psi_1 - \Psi_2 - \Psi_3 + \Psi_4 \quad (2.144)$$



2.29. ábra. $\Psi(y, z)$ a sugárzófelület helyének függvényében

2.3. A levegő abszorpciója által okozott többletcsillapítás, további, a terjedést befolyásoló tényezők

A 2.2.1. pontban említettek szerint a hangterjedés során a hangforrás hangteljesítményszintje és a tér egy pontján kialakuló hangnyomásszint közötti kapcsolatot különböző, D -vel jelölt csillapítások teremtik meg. Az egyik ilyen csillapítás a levegő abszorpciójának hatását számszerűsíti.

A hullámterjedés során a levegő viszkozitása és hővezetése miatt a közeg a szállított energia egy részét kivonja a terjedő hullámból. Hasonló energiakivonás játszódik le például az oxigén molekulák rezgési relaxációja során. Az energiakivonás többletcsillapítást eredményez, tehát a hangnyomásszint a tér egy pontján kisebb lesz, mint a geometriai terjedésből meghatározható. A csillapításra számos elméleti, laboratóriumi kísérletből és helyszíni mérésekből származó eredmény, összefüggés, adat szü-

letett. Ezek közül néhányat a következőkben felsorolunk. A D_{atm} csillapítási tényező a távolság lineáris függvénye.

■ [IV.1] nyomán a 20°C , $\Delta t = \pm 10^\circ \text{C}$ hőmérséklet környezetében a csillapítás értékét a (2.145) összefüggés adja meg, amelyben Φ a relatív páratartalom százalékban kifejezve, f a frekvencia, és r jelöli a távolságot. Látható, hogy a csillapítás a frekvencia négyzetével arányos, a távolság lineáris függvénye:

$$D_{atm} = \frac{7,4 \cdot f^2 \cdot r \cdot 10^{-8}}{\Phi \cdot (1 + 4 \cdot 10^{-6} \cdot \Delta t \cdot f)}; \text{ dB.} \quad (2.145)$$

■ A táblázatos adatmegadások a hőmérséklettől és relatív páratartalomtól mint külső körülményektől függő adatokat tartalmaznak. Ha épületen kívüli hangterjedéshez adnak meg adatokat, akkor az adatok D_{atm} értékét fejezik ki a frekvencia függvényében, a mértékegység jellemzően dB/km. A 2.3. táblázat a [III.9] szabványból közöl néhány adatsort. A helyiségekben lejátszódó hangterjedéséhez illeszkedő adatmegadás szintén lehet ilyen forma. Az utózengetési idő meghatározásához illeszkedő m energiacsillapítási tényező mértékegysége $1/m$, néhány jellemző adatát a 2.4. táblázat foglalja össze.

Különösen a 2.3. táblázat adatai mutatják jellegzetesen, hogy az atmoszferikus csillapítás hatása az épületléptékű tervezésben első közelítésben elhanyagolható, ha a terjedési távolságok 50 m-nél kisebbek.

Külső térben az atmoszferikus csillapításon túl további tényezőket is figyelembe kell venni, elsősorban nagyobb terjedési távolságok számításakor: a meteorológiai hatás, a talaj csillapíthatósága, a nö-

2.3. táblázat. A D_{atm} dB/km atmoszferikus csillapítás a levegőben a [III.9] nyomán

Jellemzők		f_{okt} Hz						
t, °C	Φ , %	125	250	500	1000	2000	4000	8000
0	50	0	1	3	9	24	67	131
0	70	0	1	2	6	18	51	113
0	90	0	1	2	5	13	40	95
10	50	1	1	2	5	15	44	105
10	70	1	1	2	4	10	31	75
10	90	1	1	2	4	9	24	60
20	50	1	1	3	5	11	28	69
20	70	1	2	3	5	11	23	51
20	90	1	1	3	5	11	23	45

2.4. táblázat. Az m (1/m) energiacsillapítási tényező a levegőben. Az adatok 20 °C hőmérsékletű helyiségre vonatkoznak a relatív páratartalom mellett

Jellemzők		f_{okt} Hz						
adatforrás	Φ , %	125	250	500	1000	2000	4000	8000
IV.2	40		$1,2 \cdot 10^{-4}$	$3,8 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$3,1 \cdot 10^{-3}$	$8,5 \cdot 10^{-3}$	$2,8 \cdot 10^{-2}$
	60		$8 \cdot 10^{-5}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$6,5 \cdot 10^{-4}$	$2,0 \cdot 10^{-3}$	$6,0 \cdot 10^{-3}$	$1,7 \cdot 10^{-2}$
IV.11	50		$7,5 \cdot 10^{-5}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$7,5 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$7,5 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-2}$

Megjegyzés: f_{okt} az oktávsvakok középfrekvenciája, Φ relatív páratartalom

vényzet, erdősávok hatása stb. Ezek az épületlépté-
kű tervezésben, ahol a jellemző távolságok ~ 50 m
nagyságrendnél kisebbek, nem játszanak lényeges
szerepet, általában gyakorlatilag elhanyagolhatók.

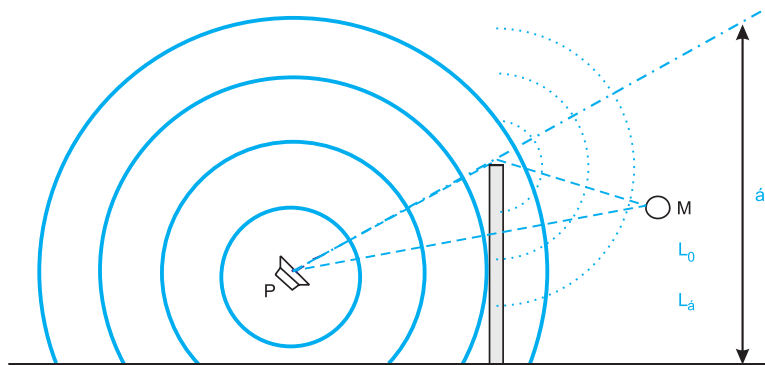
2.4. Térbeli akadályok hatása a hangterjedésre

2.4.1. A jelenség

Ha a hangterjedés útjában, a hangforrás és a megfi-
gyelési pont között akadály – tömör, fal jellegű szer-
kezet, tömör terepakadály, építmény, domborzat stb.
– áll, akkor a hangteljesítményszint és a hangnyo-
másszint közötti kapcsolatban megtalálható $D_{táv}$ sza-
badtéri távolsági csillapításon túl többletcsillapítás
alakul ki: a hangnyomásszint a távolság függvényé-
ben gyorsabban csökken, mint az a geometriai csil-
lapításból meghatározható. E csökkenés azonban
csak a tér egy meghatározott részén érvényesül:
markánsan ott, ahol a megfigyelési pont a terep-
akadály árnyékában van és kismértékben az árnyé-
kolás határhelyzetében. Nem alakul ki többletcsil-
lapítás az árnyékolási zónán túl. A szituációt a 2.32.
ábra szemlélteti, az adott elrendezéshez tartozó ár-
nyékolási zónát az ábra mutatja.

A hang behatolása az árnyékszónába éppúgy a hul-
lámelhajlás jelenségének a következménye, mint a
fénytanban, a magyarázat a Huygens–Fresnel-elvre
támaszkodik. A hullámterjedést általánosságban úgy
kell tekinteni, hogy a hullámfront minden egyes
pontjából minden időpillanatban elemi hullámok in-
dulnak ki, ezek interferencia révén létrejövő eredő-
je a következő időpillanatban és helyen kialakuló
hullámfront. Ha a hanghullám olyan akadályhoz ér-
kezik a terjedés során, amelyen nem tud áthatolni,
az akadály széléin kialakuló hullámfrontból indul-
nak ki azok a további hullámok, amelyek a terep-
akadály mögé, a hangforrás felől nézve az árnyé-
kolt területre behatolnak (2.30. ábra). Ez első köze-
lítésben kedvezőtlen jelenség, hiszen azt jelenti,
hogy hiába takarják el a zaj ellen védendő objektu-
mokat tömör falakkal – pl. építményekkel –, a hang
ott is hallható lesz. Részletesebben vizsgálva azon-
ban az árnyékolás hatékony zajcsökkentési eszköz-
nek bizonyul, hiszen a geometriai csillapításon túl
a hangterjedésben többletcsillapítás keletkezik az
árnyék hatására.

A többletcsillapítást a (2.145) egyenlet értelmezte
a 2.30. ábrához kapcsolódva. Az M megfigyelési,
mérési helyen a zajárnyékoló objektum nélkül ki-
alakuló, a P hangforrástól származó hangnyomás-



2.30. ábra. Az árnyékolás jelensége

P hangforrás; M mérési, megfigyelési hely; a árnyékolási zóna; L_0 hangnyomásszint a megfigyelési pontban a fal hatása nélkül;
 L_a hangnyomásszint a megfigyelési pontban a fal hatásával

szint L_0 , az árnyékolófal létrehozása után pedig $L_{\dot{a}}$. Az árnyékolóobjektum $D_{\dot{a}}$ többletszabályozása tehát:

$$D_{\dot{a}} = L_0 - L_{\dot{a}} \quad (2.146)$$

2.4.2. Az árnyékolási csillapítás meghatározása pontszerű hangforrás esetén

Az árnyékolóobjektum által okozott többletszabályozás alapvetően a geometriai viszonyoktól függ. A 2.31. ábrán vékony fal jellegű objektum látható. A P pontszerű hangforrás és az M megfigyelési pont közötti távolság d . A „hangsugár” útvonalának, azaz a hangforrást és a megfigyelési pontot összekötő, az árnyékolóobjektumot kikerülő legrövidebb útvonal hossza pedig $a + b + e$. A vékony fal jellegű árnyékolóobjektumnál $e = 0$, vastag, a terjedés irányában kiterjedt objektum esetében e távolságot is figyelembe kell venni, amint azt a 2.32. ábra is mutatja. Az árnyékolóobjektum többletszabályozása erősen függ attól, hogy az effektív árnyékolási magasság, h_{eff} mekkora: minél nagyobb h_{eff} értéke, annál nagyobb a csillapítás. Az árnyékoló objektumot megkerülő út és a PM szakasz különbsége az z útkülönbség, amelytől az árnyékolás következtében létrejövő többletszabályozás függ. Az e távolság, tehát az árnyékolóobjektum vastagsága csak akkor vehető a (2.147) összefüggés szerint figyelembe, ha értéke a hullámhossznál sokkal kisebb. Egyébként kétszeres árnyékolást kell számítani:

$$z = a + b + e - d. \quad (2.147)$$

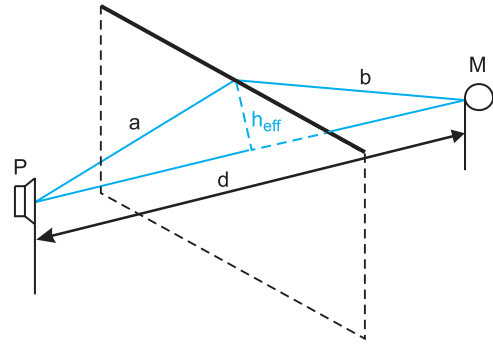
A csillapítás nagysága az ún. Fresnel-számtól (jele N) függ, amelynek nevezőjében a hang λ hullámhossza látható:

$$N = \frac{2 \cdot z}{\lambda}. \quad (2.148)$$

Az árnyékolási csillapítás értékére többféle – részben elméleti, részben kísérleti úton meghatározott – összefüggés található. Ezek közül néhány példát mutatnak a következő összefüggések és ábrák. Az összefüggések és grafikonok azonos körülményekre vonatkoznak: pontszerű hangforrás, egyszeres elhajlás az árnyék felett, három irányban végtelen kiterjedésű fal, az atmoszferikus csillapítás nincs figyelembe véve. Az eredmények az N Fresnel-szám függvényében a 2.33. ábrán láthatók:

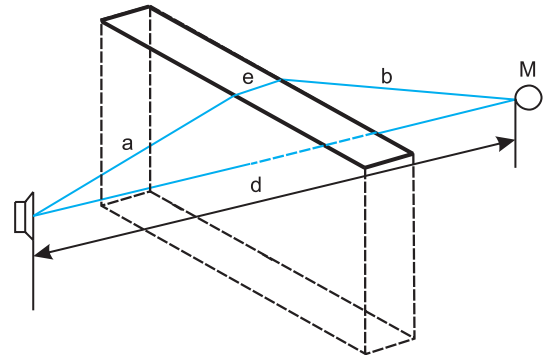
■ Readfearn nyomán [IV.1]-ben hivatkozva:

$$D_{\dot{a}} = 10 \cdot \lg(6 \cdot N + 1) + 5. \quad (2.149)$$



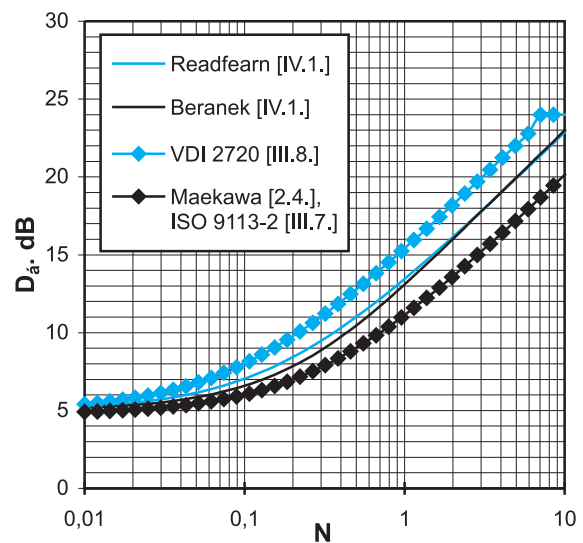
2.31. ábra. Vékony fal árnyékolási csillapításának meghatározása

P hangforrás; M mérési, megfigyelési hely; a, b, d távolságok az ábra szerint; h_{eff} hatásos árnyékolási magasság



2.32. ábra. Vastag fal árnyékolási csillapításának meghatározása

P hangforrás; M mérési, megfigyelési hely; a, b, d, e távolságok az ábra szerint



2.33. ábra. Az árnyékolási csillapítás a Fresnel-szám függvényében

■ Beranek nyomán [IV.1]:

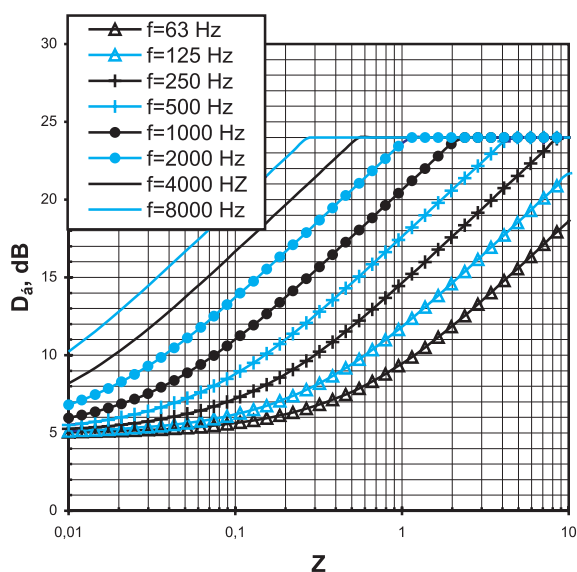
$$D_a = 20 \cdot \lg \left(\frac{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot N}}{\tanh(\sqrt{2 \cdot \pi \cdot N})} \right) + 5. \quad (2.150)$$

■ [III.8] nyomán, a biztonsági tartalék nélkül:

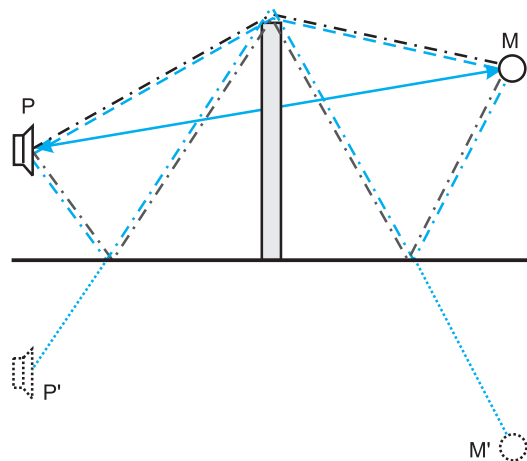
$$D_a = 10 \cdot \lg(1 + 10 \cdot N) + 5. \quad (2.151)$$

■ [III.7] alapján, amely megegyezik Maekawa összefüggésével [2.4]:

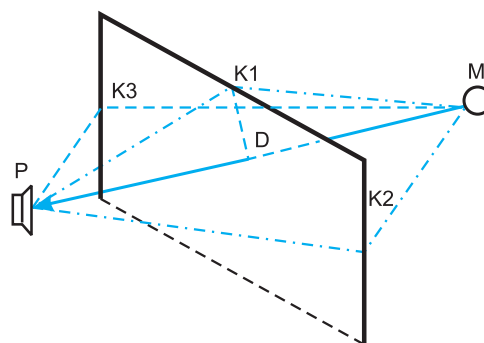
$$D_a = 10 \cdot \lg(3 + 10 \cdot N). \quad (2.152)$$



2.34. ábra. Az árnyékolási csillapítás az f frekvencia és a Z útkülönbség függvényében



2.35. ábra. Hangvisszaverődés a talajról, árnyékolás esetén P hangforrás; P' hangforrás tükörképe a talajra; M megfigyelési hely; M' megfigyelési hely tükörképe



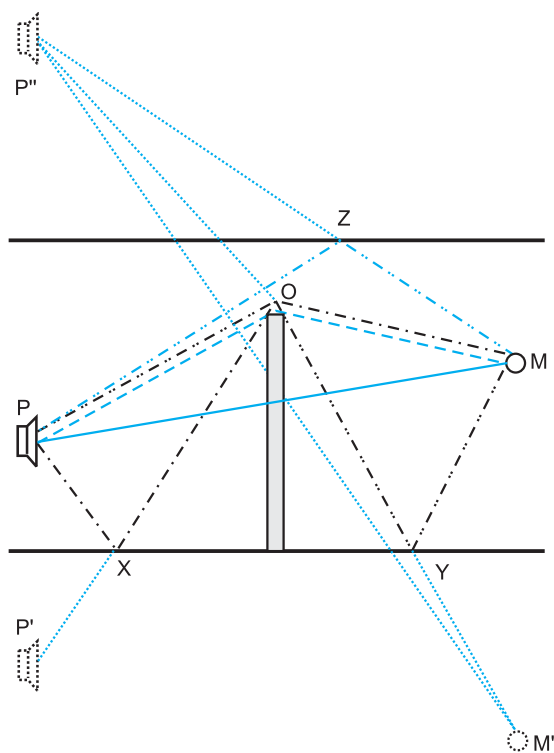
2.36. ábra. Hangterjedés véges hosszúságú árnyékolófal körül

A gyakorlati számítások elvégzéséhez bármelyik összefüggést ki kell fejteni úgy, hogy a frekvenciafüggés közvetlenül látható legyen. Erre mutat példát a 2.34. ábra [III.7]-ből kiindulva, szintén az említett körülmények között.

A valóságos viszonyok között a talaj hangvisszaverő hatását is figyelembe kell venni. A hangforrásnál ez a 2. fejezet alapján egyszerűen belátható, azonban arra is gondolni kell, hogy az árnyékoló-objektum felső éle másodlagos hangforrásként működik. Ezért legegyszerűbb esetben négy hangterjedési út hatásával kell számolni, ha az objektum vízszintes irányban végtelen kiterjedésű. Ezt szemlélteti a 2.35. ábra. A véges hosszúságú árnyékolóobjektum a vízszintes irányban is hangterjedéseket tesz lehetővé, amelyek a kiinduló árnyékolási hatást továbbbrontják, 2.36. ábra $K1$, a fal tetején átvezető terjedési út mellett a $K2$ és $K3$, valamint ezek tükörképei is hatások lesznek.

Zárt helyiségben a hang nemcsak a padlóról, hanem a mennyezetről is visszaverődik. Ennek számításbavétele szintén a hangforrás tükrözésével oldható meg, amint azt a 2.37. ábra is mutatja. A hangforrás tükörképe a padlóra P' , erre a hangterjedési útra az árnyékolás határos. A hangforrás tükörképe a mennyezetre P'' , a $P''-M$ hangterjedését azonban kikerüli az árnyékolóobjektumot, a terjedésben ezen az úton csak a geometriai csillapítás jelenik meg.

A vonalszerű hangforrások környezetében kialakuló árnyékolási többletcillapítás eltér a pontszerű hangforrások környezetében tapasztalható hatásoktól. Vonalszerű hangforrásként jellemzően a közlekedés – közúti, vasúti – modellezhető, ezért a térbeli akadályok hatását ilyen környezetben a következő alfejezet tárgyalja.

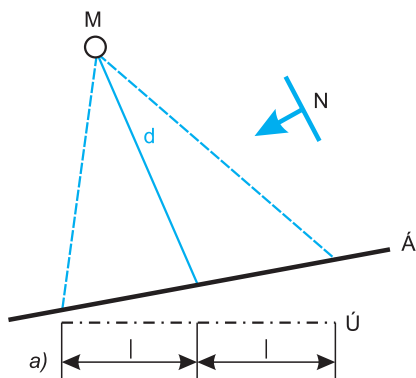


2.37. ábra. Hangvisszaverődés és árnyékolás a padlóról és a mennyezetről

P hangforrás; P' hangforrás tükörképe a talajra; P'' hangforrás tükörképe a mennyezetre; M megfigyelési pont; M' megfigyelési pont tükörképe a padlóra; X a zajforrásoldalon a visszaverődési pont; Y visszaverődési pont az árnyékolt oldalon; Z visszaverődési pont a mennyezetről

2.5. Közúti közlekedés okozta hang terjedése a [III.4] nyomán

A közúti közlekedés első közelítésben inkoherens, vonalszerű hangforrásnak tekinthető. Frekvenciajellege nem függ lényegesen a vizsgált helyétől és



2.38. ábra. Hangterjedés elemei közlekedési zaj és árnyékolás esetén

a) felülnézet; b) oldalnézet N irányból; $\hat{U}$ az útvonal egy szakaszának tengelye; $\hat{A}$ az árnyékolóobjektum egy szakaszának nyomvonala; M megfigyelési pont; a, b, d, r_M, r_U az ábrának megfelelő távolságok, h_{fal} az árnyékolóobjektum tényleges magassága

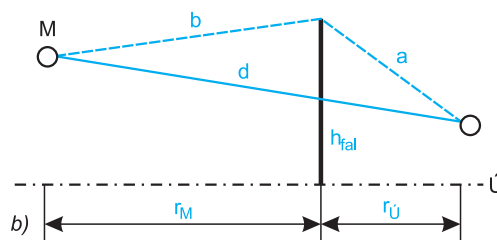
a forgalom jellegzetességeitől, ezért a hangterjedés, az árnyékolás és más tényezők hatása forgalmi, geometriai és egyéb elsődleges adatokból közvetlenül meghatározható. Másképpen a közlekedési zaj frekvenciajellege meglehetősen stabil, ezért a hangterjedést befolyásoló tényezők közvetlenül A hangnyomásszintben is kifejezhetők. (Az A hangnyomásszint részletes ismertetése a 6.2. alfejezetben található.)

A terjedés számításakor a kiindulóadat az út tengelyétől 7,5 m távolságra meghatározott A hangnyomásszint, amely a forgalmi adatoktól függ (sebesség, járműforgalom és összetétel). A terjedés további jellemzőit a 7,5 m távolságra számított A hangnyomásszinthez képest értelmezik, meghatározásuk útszakaszonként történik, amit j indexel azonosítanak. Az épületléptékű tervezésben a hangterjedést befolyásoló fontosabb tényezők a következők: a távolsági csillapítás: $D_{j,táv}$; az árnyékolási csillapítás: $a_{j,a}$; a látószög-csillapítás: $D_{j,s}$; a hangvisszaverődés okozta hangnyomásszint-növekedés: $K_{j,h}$. A további tényezőknek az épületléptékű tervezésben kisebb a szerepe (növényzav hatása, talaj- és meteorológiai viszonyok miatti csillapítás). Az egyes tényezők a 2.38. ábra alapján értelmezhetők.

A távolsági csillapítás értékét a (2.153) összefüggés adja. A képlet a $C_{d,j}$ tényezőt keresztül a talaj elnyelésének hatását is figyelembe veszi, értéke 12,5, ha a talaj szilárd burkolatú terület, míg 15 akkor, ha a terület füves vagy mezőgazdasági művelésű. A távolság, d_j térbeli, a vizsgált útszakasz felezőpontját és a megfigyelési pontot összekötő szakasz hossza:

$$D_{j,táv} = C_{d,j} \cdot \lg \left(\frac{7,5}{d_j} \right) \quad (2.153)$$

A látószög-csillapítás, $D_{j,szög}$ akkor jelenik meg, ha egy útszakasz látószöge 2π -nél kisebb. Értéke a



γ látószögtől függ, a (2.154) képletnek megfelelően. A látószöget radiánban kell behelyettesíteni:

$$D_{j,szög} = 10 \cdot \lg \frac{\gamma}{2 \cdot \pi}. \quad (2.154)$$

Az összefüggés megegyezik a 2.3.8. pontban kapott eredménnyel.

A hangvisszaverődés miatti korrekció attól függ, hogy az útszakasz megfigyelési ponttal szemközti oldalán milyen jellegű a beépítés és milyen magas. A korrekció növeli a hangnyomásszintet, értéke 0,5 és 3 dB között változik.

A j akadály által okozott árnyékolási csillapítás – l. a (2.156) képletet – nagysága szintén a z útkülönbségtől függ – l. a (2.155) képletet a 2.35. ábra jelöléseivel –, ha az árnyékolóobjektum szélessége mindkét irányban legalább háromszor olyan hosszú, mint az út tengelye és a megfigyelés helye között a távolság, megnövelve a védendő terület szélessé-

gével. A meteorológiai tényező minden méret jellegű paramétertől függ a (2.157) összefüggésnek megfelelően:

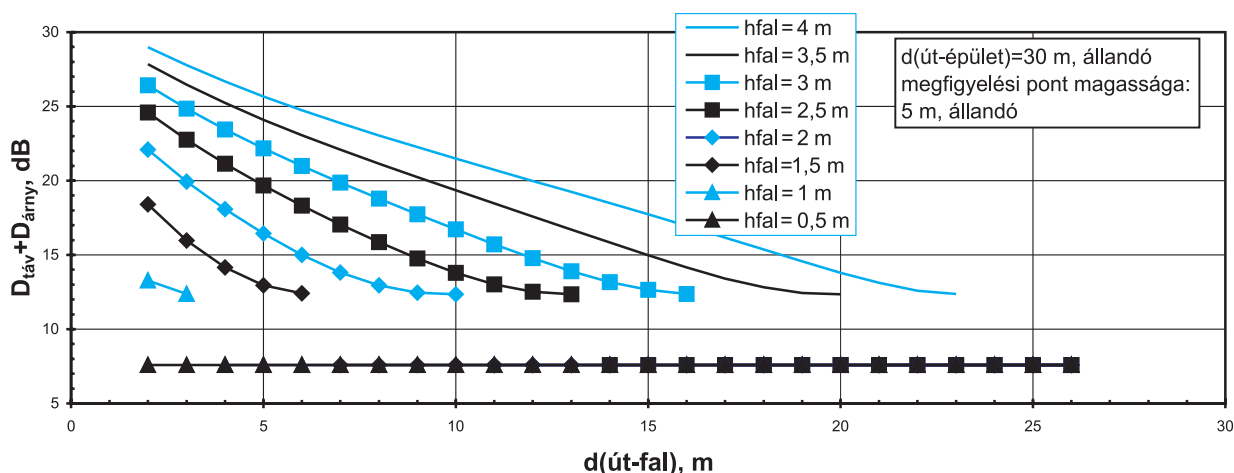
$$z_j = a_j + b_j - d_j; \quad (2.155)$$

$$D_a = 10 \cdot \lg(3 + 80 \cdot z_j \cdot K_{j,met}); \quad (2.156)$$

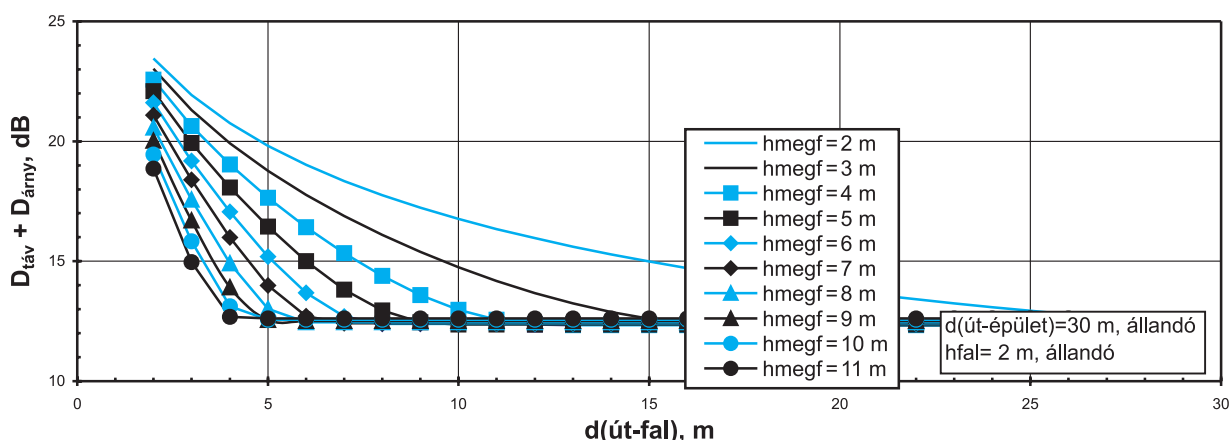
$$K_{j,met} = e^{-\left(\frac{1}{2000} \cdot \sqrt{\frac{a_j \cdot b_j \cdot d_j}{2 \cdot z_j}}\right)}. \quad (2.157)$$

Az árnyékolás révén elérhető többletcsillapítás általában nem haladja meg a 14 dB-t.

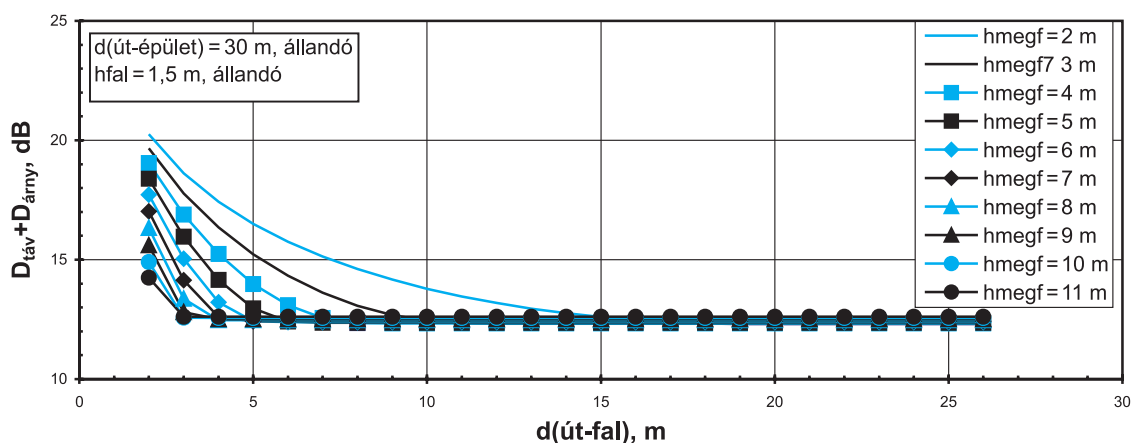
A zajárnyékoló objektummal elérhető csillapítás értékeléséhez a 2.39.–2.42. ábrák néhány tendencia jellegű számított eredményt mutatnak be. A kiindulási szituáció városi környezetben haladó közút, így a hangforrás magassága 0,5 m, az út és a védendő hely között szilárd burkolatú terület található.



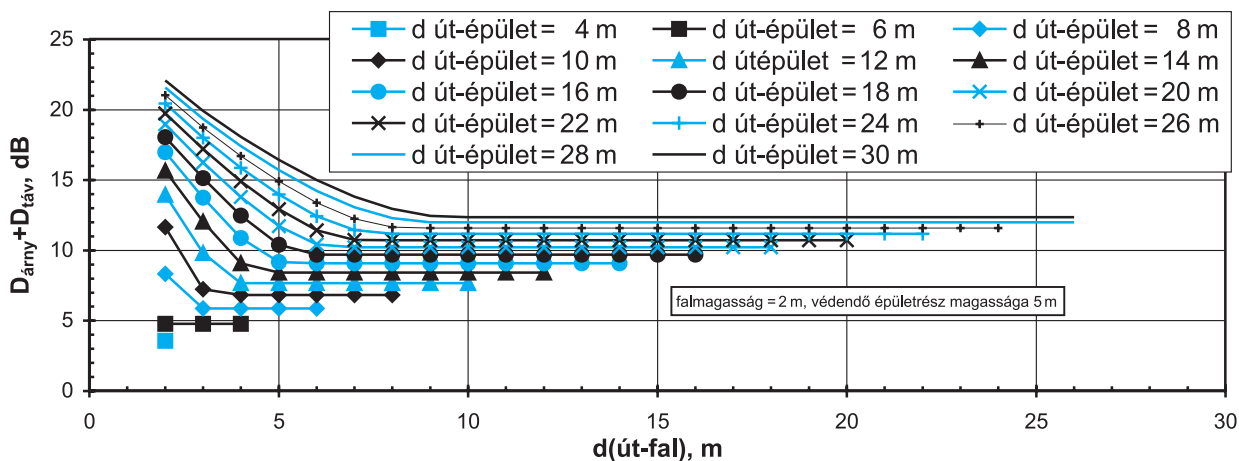
2.39. ábra. A távolsági és árnyékolási csillapítás együttes értéke, példa



2.40. ábra. A távolsági és árnyékolási csillapítás együttes értéke, példa



2.41. ábra. A távolsági és árnyékolási csillapítás együttes értéke, példa



2.42. ábra. A távolsági és árnyékolási csillapítás együttes értéke, példa

A 2.39. ábrában az út és a megfigyelési pont közötti távolság 30 m, a megfigyelési pont magassága 5 m, mindkettő állandó. A görbesereg vízszintes tengelyén az út tengelye és az árnyékolófal közötti távolság látható, a paraméter $hfal$, a fal magassága. Az eredmény az árnyékolási és távolsági csillapítás összege. Látható, hogy az árnyékolás révén elért többletcsillapítás annál kisebb, minél messzebb van az objektum a zajforrástól, ill. minél alacsonyabb az objektum. Ha a megfigyelési pont „éppen kilátszik” az árnyék mögül, az árnyékolási csillapítás lecsökken az alsó határra, végül csak a távolsági csillapítás marad.

A 2.40. és 2.41. ábrán az út és a megfigyelési pont távolsága állandó, szintén 30 m, az árnyékolóobjektum magassága szintén állandó 2 m, ill. 1,5 m paraméterként változik a megfigyelési pont magassága, valamint az út és a fal közötti távolság. Megfigyelhető, hogy a megfigyelési pont magasságának növelésével csökken az árnyékolás révén elérhető többletcsillapítás és végül csak a távolsági csillapítás marad. Hasonlóan csökken az elérhető csillapítás a fal magasságának csökkenésével. A távolsági csillapítás változása nem ellensúlyozza az árnyékolási csillapítás változását.

A 2.42. ábrán az út és a fal közötti távolság függvényében látható az árnyékolási és távolsági csillapítás összege. A paraméter a védendő hely és az út közötti távolság. Látható, hogy a megfigyelési pont-út távolság növekedtével nő a távolsági csillapítás, és ehhez adódik az árnyékolási csillapítás, amíg a megfigyelési pont „árnyékban van”.

2.6. Hangterjedés helyiségekben

2.6.1. Az áttekintés célja

A síkhullám és a gömbhullám jellegű hangterjedés vizsgálata és tulajdonságainak meghatározása során a 2. fejezet az akadálytalan, tehát a hangvisszaverődések nélküli terjedésen túl részletesen elemezte a hangvisszaverődések sajátosságait. Ezekre az ismeretekre alapozva lehetséges a helyiségekben kialakuló hangterek elemzése is. A vizsgáldás célja többi között a következő, a helyiségek akusztikai

tervezését segítő tulajdonságok minőségi és mennyiségi meghatározása:

- kapcsolat a helyiségben működő hangforrás és a helyiségben kialakuló átlagos hangnyomásszint között;
- a hangnyomásszint helyfüggésének leírása;
- kapcsolat a helyiség méretei és a határolószervek akusztikai minősége, valamint a helyiség akusztikai szempontból értelmezhető dinamikai sajátosságai – pl. visszhangosság, a gyorsan változó tulajdonságú hangforrás hatásának követése a térben – között.

Megelőlegezve a soron következő fejezeteket, a helyiségekben lejároló folyamatokat lényegében háromféle, azonos elméleti gyökerű közelítés írja le. Ezek a közelítések részben közvetlenül segítik az akusztikai tervezést, részben a korszerű, számítástechnikai eszközök alkalmazását feltételező módszerek elvi és szemléleti alapjául szolgálnak.

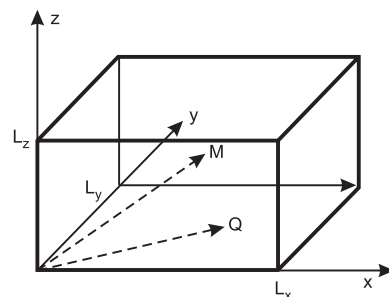
Az ismeretekből a fejezet alapvetően azokat veszi sorra, amelyek az általános tervezési gyakorlat-hoz illeszkednek, annak számára hasznosítható következtetéseket, tendenciákat adnak.

2.6.2. A hangjelenségek hullámméleleti leírása [IV.4], [IV.6]

Az analitikus megoldás és az áttekinthetőbb összefüggések elérése érdekében a vizsgálandó helyiség legyen téglatest alakú, éleinek hossza L_x , L_y , L_z . A hangjelenségeket a sebességpotenciálra vagy a hangnyomásra vonatkozó hullámegyenletek írják le, amelyeknek homogén, tehát hangforrást nem tartalmazó alakja a (2.37) és a (2.41) sorszámokon található. A részecskesebesség és a sebességpotenciál kapcsolatát a (2.43) összefüggés fejezi ki. A hangforrást is figyelembe vevő inhomogén hullámegyenletet általános formában a (2.47) összefüggés mutatja be. A hangforrás e közelítésben a hullámhosszhoz képest kisméretű, teljes felülete azonos fázisban és azonos amplitúdóval harmonikus rezgőmozgást végez, tehát ideális lélegző gömb. Emiatt mind a nyomás, mind a részecskesebesség az idő harmonikus függvénye.

A helyiségekben kialakuló hangtér leírásához látható elrendezési vázlat a 2.43. ábrán. M jelöli a megfigyelés, Q pedig a hangforrás helyét.

A p hangnyomás hullámegyenlete harmonikus rezgések esetén a k hullámszám segítségével is felírható a (2.158) összefüggés szerint. A határfelület rezgőmozgása a felület síkjára merőleges, a határfelületen a helyiséget kitöltő levegő rezgése sebességének felületre merőleges összetevője egyenlő a ha-



2.43. ábra. Hasáb alakú terem elrendezési vázlata

tárfelület azonos irányú rezgése sebességével. Az eddigiekhez hasonlóan a hangnyomás és a részecskesebesség határfelületen kialakuló értékei közötti kapcsolatot a határfelület specifikus impedanciája, Z fejezi ki. Mindezt a gradiensképzés a felület normális irányú deriválással egyszerűsödik, a (2.159) összefüggés szerint. A határfelület specifikus impedanciájának hatását pedig a (2.160) összefüggés fejezi ki:

$$\nabla^2 p + k^2 \cdot p = 0; \quad (2.158)$$

$$v_n = \frac{i}{\omega \cdot \rho_L} \cdot \frac{\partial p}{\partial n}; \quad (2.159)$$

$$\frac{Z}{\rho_L \cdot c} \cdot \frac{\partial p}{\partial n} + i \cdot k \cdot p = 0. \quad (2.160)$$

A (2.158) egyenlet megoldásai, amelyek teljesítik a (2.160) egyenletben megfogalmazott peremfeltételt, csak a hullámszám k_n jelű diszkrét, meghatározott értékei esetén adnak 0-tól különböző értéket. Ezeket a k_n értékeket sajátértékeknek nevezzük, n pedig a módusszám. A sajátértékekhez tartozó $\Phi_n(r)$ sajátfüggvények, n -től és az általános, r helykoordinátától függenek, ortogonális rendszert alkotnak, amely a (2.161) összefüggés szerinti tartalommal rendelkezik:

$$\int_V \Phi_n(r) \cdot \Phi_m(r) dV = \begin{matrix} K_n, n=m \\ 0, n \neq m \end{matrix}, \quad (2.161)$$

ahol az integrálás miatt K_n mértékegysége m^3 .

A hangforrást is figyelembe vevő inhomogén hullámegyenlet szinuszos időfüggvényű változások esetén (2.162) alakú, ahol $q(r)$ a tetszőleges forrásfüggvény; egy elemi dV térfogatelem térfogatsebességét a $dV \cdot q$ szorzat fejezi ki:

$$\nabla^2 p + k^2 \cdot p = -i \cdot \omega \cdot \rho_L \cdot q(r) \quad (2.162)$$

Mind a térfogatsebesség, mind a hangnyomás a sajátfüggvények segítségével sorba fejthető a (2.163) és (2.164) összefüggések szerint. A térfogatsebesség együtthatók a (2.165) összefüggés alapján határozhatók meg. A nyomás és térfogatsebesség sorba fejtett értékeit az inhomogén hullámegyenletbe visszahelyettesítve az ortogonalitást felhasználva a nyomás sorba fejtett alakjához tartozó együtthatók a (2.166) összefüggés szerint fejezhetők ki:

$$q(r) = \sum_n Q_n \cdot \Phi_n(r); \quad (2.163)$$

$$p(r) = \sum_n P_n \cdot \Phi_n(r); \quad (2.164)$$

$$Q_n = \frac{1}{K_n} \cdot \int_V q(r) \cdot \Phi_n(r) dV; \quad (2.165)$$

$$P_n = i \cdot \omega \cdot \rho_L \cdot \frac{Q_n}{k^2 - k_n^2}. \quad (2.166)$$

Ha a hangforrás az r_0 koordinátájú helyen található és pontszerű, akkor a forrásfüggvény a dirac-delta segítségével adható meg. A forrásfüggvény sorba fejtett alakjához tartozó együtthatók ekkor is (2.166) segítségével határozhatók meg.

A (2.166) összefüggés valós sajátértékei nem tartalmazzák a veszteségek hatását. Kiterjedt, rugalmas, veszteséges közegben terjedő hullámok esetén a veszteség hatása többek között a komplex hullámszámmal is kifejezhető a (2.167) képlet szerint. ω_n a hullámszám n -edik saját, veszteségmentes értékéhez tartozó sajátfrekvencia, δ_n az n -edik sajátértéken fejezi ki a veszteséget. Feltételezve, hogy a veszteségi tényező számértéke sokkal kisebb, mint a sajátfrekvencia, a (2.157) szerinti négyzetre emelésben négyzetes tagként elhanyagolható. A helyiség egy tetszőleges r koordinátájú helyén a hangnyomás értéke a fentiek alapján a (2.168) összefüggés szerint fejezhető ki, ahol Q a hangforrás térfogatebessége (m^3/s):

$$k_n = \frac{\omega_n}{c} + i \cdot \frac{\delta_n}{c}; \quad (2.167)$$

$$p(r) = i \cdot Q \cdot c^2 \cdot \omega \cdot \rho_L \cdot \sum_n \frac{\phi_n(r) \cdot \phi_n(r_0)}{K_n \cdot (\omega^2 - \omega_n^2 - 2 \cdot i \cdot \delta_n \cdot \omega_n)} \quad (2.168)$$

Ha pl. a lélegző gömbként modellezett hangforrás akusztikai teljesítménye ismert, akkor a (2.168) összefüggés egyszerűen átrendezhető a teljesítményt tartalmazó alakra, amint az pl. a (2.113) képletben is megjelenik.

A sajátfrekvenciák közelítő meghatározása érdekében kézenfekvő lehetőség kínálkozik: a falak legyenek ideálisan merevek, tehát a határfelületen a rezgésebesség értéke legyen 0. A homogén egyenlet a három koordinátairányban szeparálható, és eszerint a sajátértékek is, a sajátfüggvények is szétbonthatók a három koordinátairány szerint. A hullámszám sajátértéke veszteségmentes esetre pl. az x irányban a (2.169) összefüggés szerint alakul. Az eredő, n_x, n_y, n_z módusszámokhoz tartozó hullámszám értéke a (2.170) képlettel, a megfelelő sajátfrekvencia a (2.171) összefüggés szerint fejezhető ki. A sajátfüggvény x irányú alakját a (2.172) képlet, az eredő sajátfüggvényt a (2.173) képlet adja meg. A sajátfüggvény y és z irányú alakja formálisan megegyezik az x irányú alakkal. A módusszámok indexe azt a koordinátairányt jelöli, amelyhez tartozik.

- Az összefüggések részleteit tekintve megállapítható pl.:
- a sajátfüggvény (2.164) formája azt biztosítja, hogy a peremek mentén a részecskesebesség 0 lesz;
 - a (2.160) és (2.161) összefüggések szerint a merev határolószerkezetek között a saját frekvenciák úgy épülnek fel, hogy a terem élhossza a félhullámhossz egész számú többszöröse lehet:

$$k'_{nx} = \frac{n_x \cdot \pi}{L_x}; \quad (2.169)$$

$$k'_{nx,ny,nz} = \sqrt{k'^2_{nx} + k'^2_{ny} + k'^2_{nz}} = \pi \cdot \sqrt{\left(\frac{n_x}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{L_z}\right)^2}; \quad (2.170)$$

$$f_{nx,ny,nz} = \frac{k'_{nx,ny,nz} \cdot c}{2 \cdot \pi}; \quad (2.171)$$

$$\phi_{nx}(x) = \cos\left(\frac{n_x \cdot \pi \cdot x}{L_x}\right) \quad (2.172)$$

$$\phi_{nx,ny,nz}(x, y, z) = \phi_{nx}(x) \cdot \phi_{ny}(y) \cdot \phi_{nz}(z). \quad (2.173)$$

A változók szerinti szeparálás nemcsak a sajátfüggvényre, hanem magára a hangnyomásra is elvégezhető.

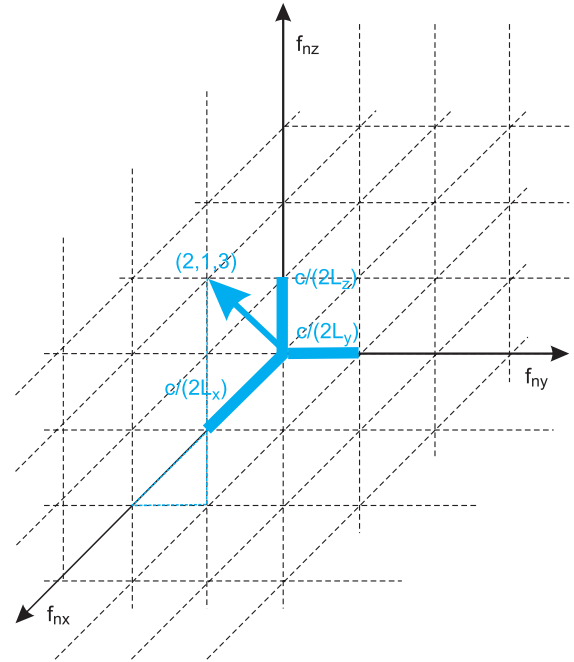
Széles sávú gerjesztés esetén a gerjesztésre jellemző térfogatebesség frekvenciafüggvényéből kell kiindulni és a hangnyomás frekvenciafüggvényét ebből kell meghatározni a (2.168) összefüggés szerint. Az időtartományra visszatérés folytonos jel esetén Fourier-integrállal lehetséges. Ha sávhangnyomás meghatározása a feladat, akkor első lépésként a térfogatebesség frekvenciafüggvényét integrálni kell a vizsgálandó frekvenciasávra. Ebből a szempontból érdekes az is, hogy a frekvenciasávban hány sajátfrekvencia található. Meg kell tehát határozni a sajátfrekvenciák sűrűségét, azaz az egységyi frekvenciasávra eső sajátfrekvenciák számát a frekvenciafüggvényében.

E feladat szemléletesen pl. a sajátfrekvenciák f_{nx}, f_{ny}, f_{nz} térbeni ábrázolásával oldható meg (2.44. ábra). A rácsponatok felelnek meg egy-egy sajátfrekvenciának. Az elemi cellák térfogata:

$$V_{\text{cella}} = \frac{c^3}{8} \cdot \frac{1}{L_x \cdot L_y \cdot L_z}. \quad (2.174)$$

A sajátfrekvenciák abban a térnyolcadban helyezkedhetnek el, ahol mindhárom tengely pozitív. A 0 és f közötti frekvenciataromány térfogata:

$$V_f = \frac{4 \cdot f^3 \cdot \pi}{3 \cdot 8} = \frac{f^3 \cdot \pi}{6}. \quad (2.175)$$



2.44. ábra. Sajátfrekvenciák ábrázolása az f_{nx}, f_{ny}, f_{nz} térben

A térbeli módusok száma a két térfogat hányadosa:

$$N_{\text{tér}} = \frac{4 \cdot \pi}{3} \cdot \left(\frac{f}{c} \right)^3 \cdot L_x \cdot L_y \cdot L_z. \quad (2.176)$$

Hasonló logikával határozható meg a felületi és az él menti módusok száma is. Összességében a módusok N_f számát a (2.177) összefüggés adja meg:

$$N_f = \frac{4 \cdot \pi}{3} \cdot V \cdot \left(\frac{f}{c} \right)^3 + \frac{\pi}{4} \cdot S \cdot \left(\frac{f}{c} \right)^2 + \frac{1}{8} \cdot L \cdot \left(\frac{f}{c} \right) \quad (2.177)$$

ahol a helyiség térfogata, összfelülete és éleinek hossza rendre: V, S, L .

A módussűrűség a (2.177) összefüggés f szerinti deriváltja lesz. Ezért pl., ha egy tetszőleges f_0 frekvencia Δf környezetében kell a módusszámot meghatározni, a (2.178) összefüggés szerint kell eljárni. Ily módon lehet többek között az egyes tercsávokban, oktávcsávokban található módusok számát is kiszámítani:

$$N(f_0, \Delta f) = \frac{\partial N_f(f_0)}{\partial f} \cdot \Delta f. \quad (2.178)$$

A modellt a valósághoz közelebb viszi, ha a határoló-szerkezeteket nem tekintik ideálisan merevnek. Az áttekinthető összefüggések érdekében azonban az egymással szemközti határoló-szerkezetek azonos tulajdonságúak és specifikus bemeneti impedanciájuk, pl. az x tengelyre merőleges falak esetében Z_x helyesen fejezi a közeghatáron kialakuló hangnyomás és a határolófelület normális irányú rezgése közötti kapcsolatot. A megoldás érdekében a hangnyomást a három koordinátairány szerint szeparálva kell felírni. A homogén egyenlet az x irányban eszerint a (2.179) képlet szerint alakul. A közeghatáron a részecskesebességet (2.43) összefüggés nyomán a (2.180) és (2.181) képlet fejezi ki, hiszen a mérőirányok eltérőek. Az x irányban a hangnyomás általános alakja a veszteségek figyelembevétele érdekében komplex formájú, l. a (2.182) összefüggést. A képlet síkhullámú terjedést fejez ki, részben a $+x$ irányban – ez esetben a kitévőben az együttható negatív – részben pedig a $-x$ irányban. Ezt a peremfeltételekbe visszahelyettesítve akkor keletkezik nemtriviális megoldás, ha a hullámszám x irányú összetevője, k_x kielégíti a (2.183) összefüggést, amely k_x értékeire diszkrét megoldásokat ad meg:

$$\frac{\partial^2 p_x}{\partial x^2} + k_x^2 \cdot p_x = 0. \quad (2.179)$$

$$\text{Ha } x = 0, \text{ akkor } \frac{Z_x}{\rho_L \cdot c} \cdot \frac{\partial p_x}{\partial x} = i \cdot k \cdot p_x. \quad (2.180)$$

$$\text{Ha } x = L_x, \text{ akkor } \frac{Z_x}{\rho_L \cdot c} \cdot \frac{\partial p_x}{\partial x} = -i \cdot k \cdot p_x. \quad (2.181)$$

$$p_x(x) = P_{mx} \cdot e^{-i \cdot k_x \cdot x} + P_{px} \cdot e^{+i \cdot k_x \cdot x}; \quad (2.182)$$

$$e^{i \cdot k_x \cdot L_x} = \pm \frac{k - k_x \cdot \frac{Z_x}{\rho_L \cdot c}}{k + k_x \cdot \frac{Z_x}{\rho_L \cdot c}}. \quad (2.183)$$

A fal impedancia rendszerint komplex, ezért a (2.184) összefüggés szerint írható fel. A peremeken megjelenő veszteségek miatt a hullámszám is komplex, l. a (2.185) összefüggést:

$$Z_x = R_x + i \cdot X_x; \quad (2.184)$$

$$k_x = \chi_x - i \cdot \kappa_x. \quad (2.185)$$

Ha – elvi szélső értékként – a határoló-szerkezet impedanciája nagy számértékű, képzetes, tömeg vagy rugó jellegű, akkor a határoló-szerkezeten nincs teljesítményvesztés, a reflexió tényező abszolút értéke 1. Ebben az esetben a hullámszám megengedett értéke a veszteség nélküli hullámszám környezetében lesz.

Ha – szintén elvi szélső értékként – a határoló-szerkezet impedanciája nagy számértékű, valós, akkor az ehhez tartozó reflexió tényező abszolút értéke egynél kisebb, a határoló-szerkezeten teljesítményátvitel történik. Reálisan feltételezhető, hogy a bemeneti impedancia valós része sokkal nagyobb, mint a levegő karakterisztikus hullámellenállása, a hullámszám képzetes része sokkal kisebb, mint a valós rész. Így a hullámszám képzetes részére adódik olyan összefüggés, amely a lehetséges értékeket kifejezi:

$$e^{k_x \cdot L_x} \approx 1 - \kappa_x \cdot L_x \approx 1 - \frac{2 \cdot k \cdot \rho_L \cdot c}{\chi_x \cdot R_x}. \quad (2.186)$$

A hullámszám három koordinátairányhoz tartozó megengedett értékei, k_{nx}, n_y, n_z ennek alapján szintén diszkrét értékek:

$$k_{nx, ny, nz} = k'_{nx, ny, nz} - i \cdot \frac{2 \cdot \omega \cdot \rho_L}{k'_{nx, ny, nz}} \cdot \left(\frac{1}{L_x \cdot R_x} + \frac{1}{L_y \cdot R_y} + \frac{1}{L_z \cdot R_z} \right). \quad (2.187)$$

Az összefüggés azt jelenti, hogy ha a határoló-szerkezet bemeneti impedanciája valós és nagy számértékű, akkor a szerkezeten akusztikai teljesítmény távozik a rendszerből. Ennek következtében a térbeli viselkedést leíró hullámszám lehetséges értékei komplexek lesznek. A valós rész közelítőleg megegyezik a veszteségmentes határoló-szerkezet feltételezése során levezetett hullámszámok megengedett értékeivel, a képzetes rész pedig a határoló-szerkezet valós impedanciáját is tartalmazza.

A hangnyomás x irányú összetevőjének közelítő értéke pedig a következő lesz – szintén a sorba fejtés, tehát a modális közelítés eredményeként:

$$p_{nx}(x) \approx C_{nx} \cdot \cos(k'_{nx} \cdot x + \phi_{nx}), \quad (2.188)$$

$$\text{ahol } \phi_{nx} \approx -\frac{i \cdot k}{k_x \cdot R_x}. \quad (2.189)$$

A (2.188) összefüggés azt a jelenséget tükrözi, hogy veszteséges határoló-szerkezetek esetén nem jelentkezik éles állóhullámú kép, hiszen a határoló-szerkezeten teljesítményátalakulás történik, amit a térből a határoló-szerkezet felé haladó hullám – nem állóhullám – által szállított teljesítmény pótol.

Az y és z koordinátairányhoz tartozó hangnyomás-összetevő formálisan az x irányúval azonos alakú lesz.

A teremben állandósult állapotban a hangnyomás a (2.168) összefüggés szerint alakul ki, ha a hangforrás szinuszos hangot állít elő. A figyelembe vett módusok sajátfrekvenciája közel van egymáshoz, a fázisok azonban szinte véletlenszerűen váltakoznak. A (2.168) összefüggés frekvenciafüggést kifejező része emiatt kismértékben módosítható a további, analitikusan felírható megoldások elérése érdekében. Az n -edik módushoz tartozó hangnyomás-összetevő abszolút értéke, $|p_n|$

a (2.190a) szerint alakul; az összefüggésben $|A_n|$ a gerjesztés és a mérési pont hatását tartalmazza. A (2.168) összefüggéssel formálisan összevetve $|A_n|$ értéke meghatározható, l. a (2.190b) képletet:

$$|p_n| = \frac{|A_n|}{\sqrt{(\omega^2 - \omega_n^2)^2 + 4 \cdot \omega^2 \cdot \delta_n^2}}; \quad (2.190a)$$

$$|A_n| = \left| \frac{Q \cdot c^2 \cdot \omega \cdot \rho_L \cdot \phi_n(r) \cdot \phi_n(r_0)}{K_n} \right|. \quad (2.190b)$$

Az összefüggés formálisan is, tartalmában is közel áll az egy szabadsági fokú rezgőrendszer vizsgálata során az állandósult állapot kiterésére meghatározott összefüggéssel. Mindkettő veszteséges rezgőrendszer viselkedését írja le, a terem sok sajátfrekvenciája miatt az eredő hangnyomás a módusok hatásának összegzéséből adódik.

A terem dinamikai tulajdonságainak vizsgálata – tehát az a sajátosság, ahogyan a hangforrás állapotának változásait a térbeli hangnyomás követni képes – a tranziens jelenségek nyomonkövetésével végezhető el. Ennek legegyszerűbb esete az egy szabadsági fokú rendszer modellezéséhez hasonlóan a rövid idejű impulzussal végzett gerjesztés. A rendszer frekvenciaátviteli függvényét – jelen esetben pontszerű hangforrás működésére adott hangnyomásválaszt – a (2.168) összefüggés adja meg, amelyben a veszteségi tényező szorzójaként szereplő ω_n szorzó kis hibával ω -val helyettesíthető. Ennek megfelelője a Laplace-transzformáció segítségével meghatározott, dirac-delta gerjesztésre adott válaszfüggvény, l. a (3.57) és (3.58) egyenleteket. Ezért a teremben, amelyben sok sajátfrekvencia eredője adja a hangnyomást, a dirac-delta gerjesztésre adott válasz – jele $g(t)$ – a (2.191) összefüggés szerint írható fel formálisan, ha $t > 0$:

$$g(t) = \sum_n \frac{A_n}{\omega_n} \cdot e^{-\delta_n \cdot t} \cdot \sin(\omega_n \cdot t_n) \quad (2.191)$$

Ha a gerjesztés nem impulzus, hanem tetszőleges, de a $t = 0$ időpontban kikapcsolják, – jele $s(t)$ – akkor a terem választ, azaz a kialakuló hangnyomás időfüggvényét – $p_v(t)$ – konvolúcióval lehet megadni, a $t > 0$ időtartományban is, amelynek kifejtett alakja a (2.192) képlet második része. A jelölések értelmezését a (2.193) – (2.196) egyenletek adják meg.

$$p_v(t) = \int_{-\infty}^0 s(\tau) \cdot g(t-\tau) d\tau = \sum_n \frac{A_n}{\omega_n} \cdot e^{-\delta_n \cdot t} \cdot c_n \cdot \cos(\omega_n \cdot t + \gamma_n); \quad (2.192)$$

$$a_n = \int_{-\infty}^0 s(x) \cdot e^{\delta_n \cdot x} \cdot \cos(\omega_n \cdot x) dx; \quad (2.193)$$

$$b_n = \int_{-\infty}^0 s(x) \cdot e^{\delta_n \cdot x} \cdot \sin(\omega_n \cdot x) dx; \quad (2.194)$$

$$c_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}; \quad (2.195)$$

$$\gamma_n = \arctg\left(\frac{b_n}{a_n}\right) \quad (2.196)$$

Megjegyzések a (2.192)–(2.196) összefüggésekhez.

- az integrálás azért tart 0-ig, mert a hangforrást a 0 időpontban kikapcsolták, tehát $s(t) = 0$, ha $t > 0$;
- a τ integrálási változó a konvolúció elvégzéséhez;
- A_n értéke a hangforrás helyzetét és térfogatsebességét, valamint a mérési pont helyzetét tükrözi, l. a (2.168) és 2.190) összefüggéseket;
- a_n , b_n és c_n együtthatók a tranziens folyamat modális amplitúdói;
- a (2.192) összefüggés azt fejezi ki, hogy a hangforrás kikapcsolása után lejátszódó tranziens folyamat módusonként játszódik le; természetesen azoknak a módusoknak lesz csak meghatározó szerepe, amelyeknek megfelelő frekvenciák az eredeti jel spektrumában is szerepelnek.

A tér energiasűrűsége arányos a hangnyomás effektív értékének négyzetével – l. pl. a 2.2.3. pontot –, ahol a (2.183) összefüggésben szereplő koszinuszos tagok a négyzetre emelésben azonos és eltérő indexű tagok szorzataként szerepelnek. A térbeli átlagos energiasűrűség, $E(t)$ meghatározása során az eltérő indexű koszinuszos tagok kiesnek, és végül az impulzusgerjesztésre a térbeli átlagos energiasűrűség, illetve a hangnyomás effektív értékének négyzete a következő lesz:

$$E(t) = \frac{p_{\text{eff}}^2(t)}{\rho_L \cdot c^2} = \sum_n |c_n|^2 \cdot e^{-2 \cdot \delta_n \cdot t}. \quad (2.197)$$

A lecsengési folyamat gyorsaságára a veszteségre jellemző, δ_n helyett az utózungési idő is alkalmazható, a jelen esetben módusonként értelmezve. Az utózungési idő a jelen esetben is az az időtartam, amely alatt a térbeli energiasűrűség, azaz a hangnyomás effektív értékének négyzete a kiindulóérték egymilliomod részére lecsökken. Jele T_n , kapcsolatát a veszteségre jellemző δ_n tényezővel a következő összefüggés mutatja:

$$T_n = \frac{9,908}{\delta_n}. \quad (2.198)$$

Állandósult állapotban a térbeli átlagos hangnyomás szintén az egyes módusok hatásának eredője. Az egyes módusokhoz tartozó amplitúdó abszolút értékét a (2.190a) és (2.190b) összefüggések fejezik ki. Ebbe a korábbiak alapján a hangforrás hangteljesítménye, vagy a lélegző gömb térfogatsebessége is behelyettesíthető. A hangnyomást a (2.199), a hozzá tartozó fázisszöveget pedig a (2.200) képlet adja meg. Az eredő hangnyomás, p pedig a (2.201) szerint határozható meg. Az összefüggésnek az a legfontosabb tartalma, hogy egy térben minél több módus épül fel, annál nagyobb lesz a hangforrás meghatározott teljesítménye hatására létrejövő térbeli átlagos hangnyomás.

$$p = \sum_n |p_n| \cdot \cos(\omega \cdot t + \gamma_n); \quad (2.199)$$

$$\gamma_n = \arctg\left(\frac{2 \cdot \omega \cdot \delta_n}{\omega^2 - \omega_n^2}\right) \quad (2.200)$$

$$|p|^2 = \frac{1}{2} \cdot \sum_n |p_n|^2. \quad (2.201)$$

A helyiség egy tetszőleges pontján kialakuló hangnyomás a terem sajátfrekvenciái, tehát rezonanciafrekvenciái segítségével írható fel. A hang-

nyomás frekvenciája megegyezik a gerjesztés frekvenciájával. Az egyes sajátfrekvenciákhoz tartozó amplitúdók részben a veszteségtől, részben pedig a gerjesztőfrekvencia és a sajátfrekvencia közötti különbségtől függenek, l. a (2.190) összefüggéseket.

A sajátfrekvenciák értékét közelítőleg a (2.169)–(2.171) összefüggések szerint lehet meghatározni. Az n_x, n_y, n_z módusszámok 0 vagy tetszőleges egész értéket vehetnek fel. Az egyes módusszám-kombinációk jelentése:

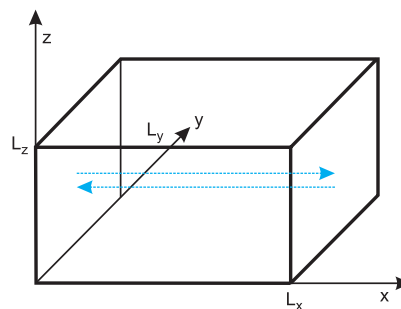
- ha két módusszám értéke egyenlő nullával: a helyiség két szemközti, párhuzamos fala között alakul ki állóhullám; a terjedés iránya a nem nulla módusszámhoz tartozó tengely iránya (2.45. ábra), ahol x irányú állóhullám alakult ki;
- ha egy módusszám értéke nulla: az állóhullámok a helyiség valamelyik síkjával párhuzamos síkban, a másik két határfelület síkjáról visszaverődve alakulnak ki; a 2.46. ábrán az xz síkban alakul ki állóhullám;
- ha egyik módusszám sem 0, akkor térbeli visszaverődések során alakul ki állóhullám (2.47. ábra).

A teremben meghatározott erősségű – térfogatsebességű – hangforrás működésének hatására kialakuló hangnyomás többi között attól függ, hogy a vizsgálandó frekvenciatartományban hány sajátfrekvencia található. A sajátfrekvenciák száma részben a terem térfogatával, részben a felületével, részben éleinek összes hosszával arányos annak megfelelően, hogy a sajátfrekvenciák három-, két- vagy egyirányú visszaverődés során épülnek fel a (2.177) összefüggés szerint. A Δf frekvenciasávba eső módusok száma a (2.178) összefüggés szerint határozható meg.

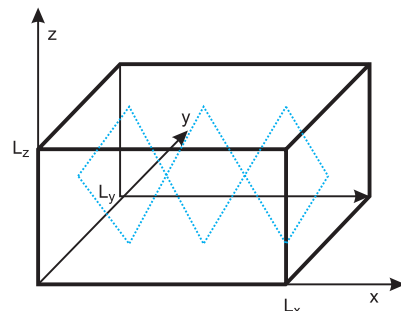
A valóságnak megfelelő határolószerkezetek a veszteség nélküli terem sajátfrekvenciáit kismértékben megváltoztatják, az eltérések a határolószerkezetek bemeneti impedanciájától függenek. A sajátfrekvenciák a (2.187) összefüggésből számíthatók.

A valóságnak megfelelő határolószerkezetek a hangnyomás sajátfüggvényét kismértékben változtatják, a változás elsősorban a fázisban jelenik meg a (2.187)–(2.189) szerint. Ez azt fejezi ki, hogy valóságos, tehát veszteséges határolószerkezetek között nem alakul ki tiszta állóhullám, hanem az állóhullámhoz a határolószerkezeteken lezajló teljesítményátalakulást „visszapótló”, teljesítményt szállító haladó hullám adódik.

Ha a hangteret rövid idejű impulzussal gerjesztjük, akkor az eredő hangnyomás effektív értéke a kezdeti, hirtelen felnövekvő értékről exponenciális jelleggel csökken le. Minden egyes módusnak meg-

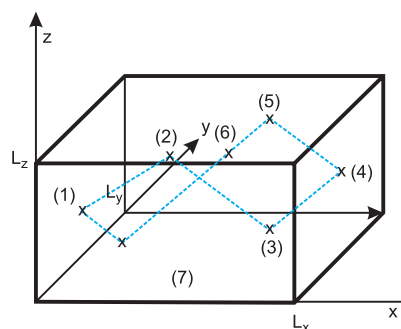


2.45. ábra. Egy koordinátairányban felépülő sajátfrekvencia hangvisszaverődéseinek szemléltetése



2.46. ábra. Két koordinátairányban (síkban) felépülő sajátfrekvencia hangvisszaverődéseinek szemléltetése

A hangterjedés az x és a z irányban játszódik le, ennek megfelelően a hangvisszaverő felületek az $x=0$ és az $x=L_x$ sík (x irányú terjedés), valamint $z=0$ és az $z=L_z$ sík (z irányú terjedés)



2.47. ábra. Három koordinátairányban (térben) felépülő sajátfrekvencia hangvisszaverődéseinek szemléltetése
(1)...(7): a visszaverődések sorszáma

felelő sajátfrekvencián lezajlik az exponenciális időfüggésű csökkenés, a teljes lecsengési folyamat ezek eredője.

Állandósult állapotban a térbeli hangnyomás négyzete az egyes módusokhoz tartozó amplitúdók összegzéséből határozható meg. Minél több módus alakul ki egy frekvencia környezetében, annál nagyobb lesz a térbeli átlagos hangnyomás értéke. Az állandósult állapot hangnyomásának térbeli átlagos effektívérték-négyzete egyenesen arányos a hangforrás hangteljesítményével. A veszteségi tényező növelése pedig csökkenti a hangnyomást.

2.6.3. A teremben lezajló akusztikai folyamatok geometriai közelítése, az utószög idő értelmezése

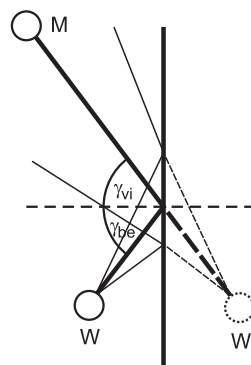
Magas frekvencián mind a terem állandósult állapota, mind a dinamikus állapota az egyes hangvisszaverődések nyomon követésével is modellezhető. A modell elvileg tetszőleges alakú, a későbbi számpéldán az egyszerűség érdekében hasáb alakú terem. A hangforrás és a megfigyelés helye rögzített. A megfigyelés helyére több módon érkezik a hangforrástól hang:

- közvetlenül, hangvisszaverődések nélkül;
- egyszeres, kétszeres visszaverődések után;
- többszörös visszaverődések után.

Az egyes visszaverődések meghatározását a (2.118)–(2.120) összefüggések, a 2.19. ábra mutatják be olyan esetre, ha a közeget, tehát a teret határoló épületszerkezet felülete sík. Ha azonban a határoló szerkezet felülete nem sík, a tagozódások a hullámhosszal összemérhetők, a hang a visszaverődéskor szóródik, tehát olyan irányokban is hangvisszaverődés alakul ki, amelyekhez tartozó visszaverődési szög eltérő lesz a beesési szögtől. Ezt szemlélteti a 2.48. ábra – hangvisszaverődés sík felületről a geometriai közelítés alapján –, és a 2.49. ábra – diffúz hangvisszaverődés.

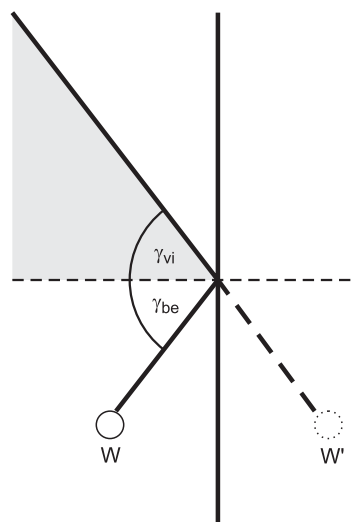
A közvetlen hang, az egyszeres és kétszeres visszaverődések szemléltetése a 2.50. ábrán látható, amely egy előadóterem függőleges metszetét vázolja. A közvetlen hang jele K , az egyszeres visszaverődéseké $EV1$ és $EV2$, a kétszeres visszaverődéseké pedig $KV1$ és $KV2$. Természetesen az ábrán láthatónál sokkal több hangvisszaverődés alakul ki még egy egyszerű formájú, hasáb alakú teremben is. Az egyszeres visszaverődéshez a hangforrást egyszer kell tükrözni, a kétszereshez pedig kétszer. Azonos módon lehet a többszörös visszaverődéseket is nyomonkövetni.

Minél hosszabb a hang által megtett út, annál hosszabb idő telik el a kibocsátástól a megfigyelés helyéig a hang véges terjedési sebessége miatt, azaz annál nagyobb lesz az időkéés a közvetlen hang és a visszavert hang között. A hangterjedés útjának hatása nemcsak az időkülönbségekben jelenik meg. Az egyes terjedési utak lényegében gömhullámú terjedésként követhetők nyomon, pontosabban a gömhullámú terjedés egy meghatározott térirányra alkalmazható, a négyzetes távolságtörvény szerint csökken az intenzitás. Ehhez további intenzitást csökkentő tényező a határoló szerkezetek hangelnyelési tényezője lesz. Mindezek alapján egyszeres visszaverődés esetén teremben is a (2.119)–(2.123) össze-



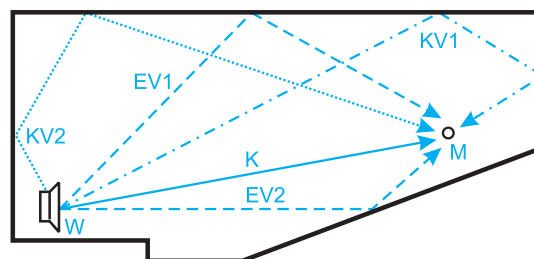
2.48. ábra. Hangvisszaverődés sík felületről a geometriai közelítés alapján

A γ_{be} beesési szög és a γ_{vi} visszaverődési szög egyenlő; W a hangforrás, W' a tükör forrás hangteljesítménye



2.49. ábra. Hangvisszaverődés tagolt felületről (diffúz visszaverődés)

A γ_{be} beesési szög és a γ_{vi} visszaverődési szög nem szükségszerűen egyenlő, a visszaverődés több irányban, egy szögtartományban játszódik le



2.50. ábra. Közvetlen hang, egyszeres és kétszeres hangvisszaverődések teremben

K közvetlen hangút; $EV1$, $EV2$ hangút egyszeres visszaverődéssel; $KV1$, $KV2$ hangút kétszeres visszaverődéssel

függés szerint lehet az eredő hangnyomást meghatározni.

Ha a teremben a hangforrás rövid idejű hangimpulzust kelt, a terem válasza impulzussorozat, $g(t)$ lesz. Minden egyes válaszipulzus a visszaverődésektől függő időben érkezik a megfigyelési pontba, nagysága, D_n a megtett úttól és a visszaverődések számától, jellegétől függ. Ezt fejezi ki a következő összefüggés is. A keskeny időimpulzus a modellezhetőség érdekében $\delta(t)$ dirac-delta:

$$g(t) = \sum_n D_n \cdot \delta(t - t_n) \quad (2.202)$$

Az amplitúdó a gömbhullámú terjedés távolságfüggését és a hangvisszaverődések hatását tartalmazza. A (2.202) összefüggés fizikai tartalmát a 2.51. és 2.52. ábra szemlélteti valóságos, hasáb alakú teremre. A terem mérete $5 \times 10 \times 3$ m, a hangforrás az egyik sarok közelében, a megfigyelés helye a terem másik végében, a hátsó faltól 2 m távolságra található. A 2.51. ábra a közvetlen hangimpulzust, az első visszaverődés hangimpulzus-sorozatát, valamint a kétszeres visszaverődések sorozatait szemlélteti. Tekintettel arra, hogy a hasábnak hat éle van, első visszaverődésként hat impulzus figyelhető meg. Második visszaverődésként $6 \times 5 = 30$ impulzus alakul ki. A vízszintes tengelyen a hangimpulzus kibocsátásától eltelt idő, a függőleges tengelyen az egyes impulzusok hangnyomásszintje látható, a hangforrás hangteljesítményszintje a példában $L_w = 80$ dB. Valamennyi határolószerkezet ideálisan hangvisszaverő. Az egyes impulzusok csökkenő hangnyomásszintje az impulzusok által megtett egyre hosszabb utaknak köszönhető. A 2.52. ábrán bemutatott eredmény ugyanolyan méretű teremre vonatkozik, mint az előző próbaszámítás. Az eltérés csupán az, hogy a mennyezet hangelnyelési tényezője 0,7. Ezért mindazoknak az impulzusoknak az „erőssége” lecsökken, amelyekhez tartozó hangterjedési utak a mennyezeti visszaverődést is tartalmazzák.

Mindkét impulzussorozat arra utal, hogy az eredmény „kiszimitható”, ha az impulzusok szélesebbek. Minőségileg hasonló eredmények érhetők el a kikapcsolási jelenségek követésekor is. Ennek logikája az eddigi ismeretekre épül.

A kikapcsolási folyamat nyomon követéséhez a hangfor-

rásból – kisméretű lélegző gömb – a tér minden irányába induló hangimpulzust kell elképzelni, az impulzusok a térben egyenes vonalban terjednek, a határolószerkezetekről a geometriai visszaverődés szabályai szerint visszaverődnek.

- Minden egyes hangimpulzus terjedése a hangforrástól kiindulva a négyzetes távolságtörvényt követi, a távolság egyenesen arányos az eltelt t idővel és a c terjedési sebességgel.
- A közegecsillapítás exponenciális jellegű, az arányossági tényező az energiacsillapítási tényező, jele m , mértékegysége $1/m$, a távolságfüggés a terjedési idővel arányos: $e^{-m \cdot c \cdot t}$. Az m értékei normál légállapotú teremre a 2.4. táblázatban találhatók.
- Minden egyes visszaverődés a visszaverődő hullám intenzitását $(1 - \alpha)$ szorzóval csökkenti, az n hangvisszaverődéssel keletkező hatványkifejezés exponenciális kifejezéssel helyettesíthető; α a határolószerkezetek átlagos hangelnyelési tényezője:

$$(1 - \alpha)^{n \cdot t} = e^{n \cdot t \cdot \ln(1 - \alpha)}.$$

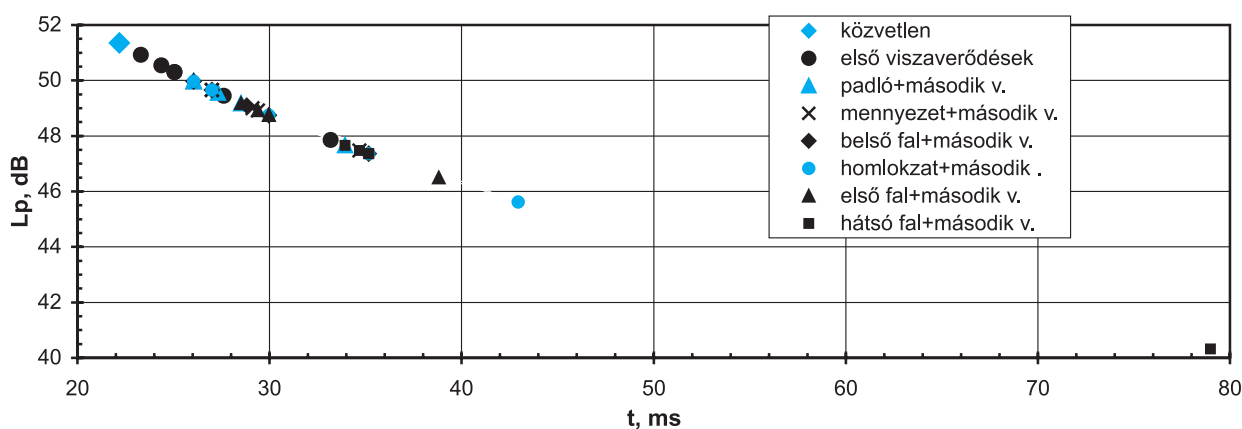
- t idő és n visszaverődés után az intenzitást a következő kifejezés adja meg, ahol K a hangforrás erősségének hatásait tartalmazó állandó:

$$I = \frac{K}{(c \cdot t)^2} \cdot e^{t \cdot (-m \cdot c + n \cdot \ln(1 - \alpha))}. \quad (2.203)$$

- Példaként az x tengelyre merőleges határolószerkezeteken létrejött hangvisszaverődést tekintve, ha a terem x tengely irányú mérete L_x , és a terjedés iránya az x tengellyel γ_x szöget zár be, akkor t terjedési idő alatt megtörtént visszaverődések száma n_t , az időegység alatti visszaverődések száma ennek $1/t$ -ed része.

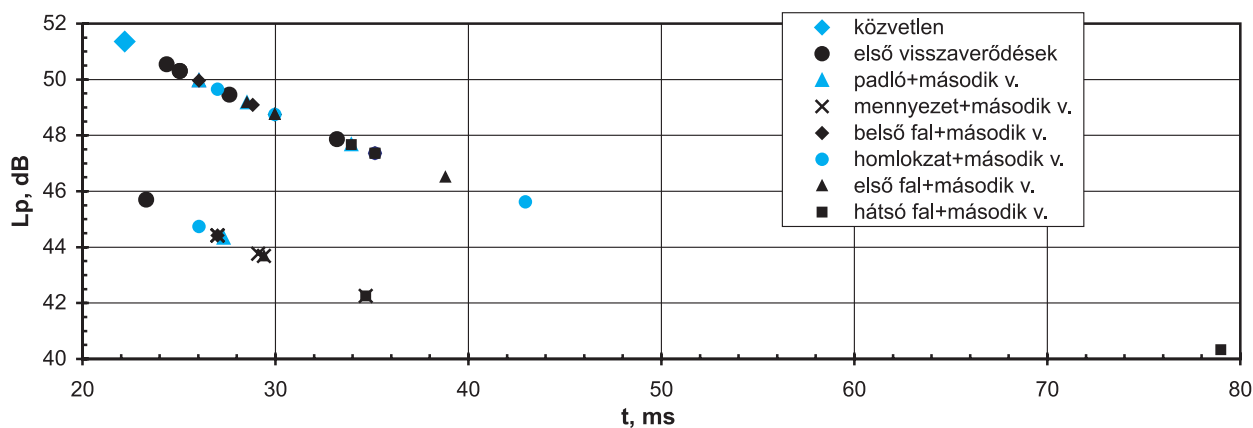
$$n_t = \frac{c \cdot t \cdot |\cos(\gamma_x)|}{L_x}. \quad (2.204)$$

- A visszaverődések szög szerinti átlagos számához a (2.204) képletet átlagolni kell. Ehhez azt is figyelembe kell venni, hogy a lehetséges irányok az x tengely körül térben helyezkednek el, az x tengellyel bezárt szög pedig $0 - \pi$ értéket vehet fel; a térszög szerinti integrálást két szögirányba kell felbontani; az integrálást elvégezve az átlag értéke



2.51. ábra. Hangimpulzusok visszaverődése határolószerkezetekről, ideálisan merev szerkezetek esetén

A közvetlen hangút számítása a (2.114) képlet szerint, a visszaverődések a (2.123) közelítő összefüggéssel történtek



2.52. ábra. Hangimpulzusok visszaverődése határolószerkezetekről. A mennyezet hangelnyelési tényezője 0,7, a többi határolószerkezeté 0

A közvetlen hangút számítása a (2.114) képlet szerint, a visszaverődések a (2.123) közelítő összefüggéssel történtek

1/2, ami többek között úgy is magyarázható, hogy a térbeli átlagos beesési szög 60°.

- Az időegység alatti átlagos visszaverődések száma, n az előzők alapján a (2.205) összefüggéssel fejezhető ki, összegezve a három térirányban keletkező visszaverődéseket; tehát az átlagos visszaverődések száma a határolószerkezetek összes S felületével egyenesen, a helyiség V térfogatával fordítottan arányos:

$$n = \frac{c}{2} \cdot \left(\frac{1}{L_x} + \frac{1}{L_y} + \frac{1}{L_z} \right) = \frac{c \cdot S}{4 \cdot V}. \quad (2.205)$$

Egy meghatározott megfigyelési ponton a teljes energiasűrűség az idő függvényében az egyes irányokból érkező csillapodott impulzusok energiasűrűségének összege, és ez összegezhető a teljes térre is. Így a tér teljes energiája az idő függvényében, $E(t)$ exponenciálisan csökken a kiindulóállapothoz, E_0 -hoz képest. Ezt a folyamatot lecsengési folyamatnak is nevezzük. Az összefüggés a tér $E(t)$ energiasűrűségére gyakorlatilag azonos alakú lesz, a folyamat kezdeti értéke az állandósult állapotához tartozó E_0 energiasűrűség, az időfüggvény ekkor az energiasűrűség exponenciális csökkenését fejezi ki:

$$E(t) = E_0 \cdot e^{-c \cdot t - m - c \cdot t \left(\frac{S \cdot \ln(1-\alpha)}{4V} \right)}. \quad (2.206)$$

- A lecsengési folyamat, amely a fenti levezetésben impulzusgerjesztés hatására alakult ki, azonos alakban írható le folyamatosan működő hangforrás kikapcsolásakor is.

A rendszer – terem – dinamikai sajátossága ez esetben is a T_{rev} utózungési idővel jellemezhető, azaz azzal az idővel, amely alatt a térbeli energia a kiindulóérték egymilliomod részére csökken:

$$\begin{aligned} T_{rev} &= \frac{24 \cdot \ln(10)}{c} \cdot \frac{V}{4 \cdot m \cdot V - S \cdot \ln(1-\alpha)} = \\ &= 0,163 \cdot \frac{V}{4 \cdot m \cdot V - S \cdot \ln(1-\alpha)}. \end{aligned} \quad (2.207)$$

Ha α értéke nem túl nagy, a nevezőben levő ln -es tag linearizálható; a levegő csillapítása miatt létrejövő terjedési veszteség bizonyos korlátok között szintén elhanyagolható, így el lehet jutni az időben korábban létrejött, részben tapasztalati úton meghatározott Sabine-formulához:

$$T_{rev} = \frac{0,163 \cdot V}{S \cdot \alpha}. \quad (2.208)$$

A nevezőben levő kifejezés a terem egyenértékű hangelnyelési felülete A , mértékegysége m^2 , amely a következő képlettel számítható ki akkor, ha az elnyelés csak a határfelületeken jön létre:

$$A = \sum_i \alpha_i \cdot S_i. \quad (2.209)$$

Az átlagos hangelnyelési tényező a vizsgált terem valamennyi határolószerkezetére vonatkozik, azoknak az egyes részfelületekkel súlyozott átlaga, így számítható:

$$\alpha = \frac{1}{\sum S_i} \cdot \sum S_i \cdot \alpha_i. \quad (2.210)$$

Ha a terem hangelnyelése nemcsak a határfelületeken jön létre, hanem térbeli elnyelőelemek is működnek, illetve vannak olyan hangelnyelő szerkezetek, elemek, amelyeket nem a hangelnyelési tényező, hanem azok egyenértékű hangelnyelési felülete jellemez célszerűen – pl. az emberi test vagy a bútorzat, amelyek felületnagysága nehezen értelmezhető –, akkor a (2.209) összefüggés a (2.211)-re módosul. Az egyenértékű hangelnyelési felülettel jellemzett objektumok száma j , elnyelési felületük A_j :

$$A = \sum_i \alpha_i \cdot S_i + \sum_j A_j. \quad (2.211)$$

2.6.4. A teremakusztika statisztikus közelítése

Az előző pontban nyomon követett lecsengési folyamat részben a geometriai szemléleten, részben a statisztikus szemléleten alapult. Az utóbbit azt jelenti, hogy a visszaverődések számát is, a beesési szöget is átlagként vettük figyelembe az összefüggésekben.

A statisztikus szemlélet keretei között szintén meghatározható az utózungési idő, az eredmény az előzőekkel azonos. A folyamat statisztikus szemléleten alapuló nyomon követése az eddigiekhez képest a tervezés szempontjából nem ad több információt.

Egy másik lényeges feladat azonban még megoldatlan, ez a terem állandósult állapotában a bevitt akusztikai teljesítmény és az átlagos hangnyomásszint közötti kapcsolat bevezetése.

Az állandósult állapot azt jelenti, hogy egyensúly alakult ki a terembe bevitt akusztikai teljesítmény és a határolószervezeteken, valamint a levegő csillapítása miatt elnyelődő akusztikai teljesítmény között. Az elnyelődő akusztikai teljesítmény a hangtér átlagos adataival írható le.

A terembe bevitt akusztikai teljesítmény, W_{be} , a határolószervezeteken és a levegőben elnyelődő akusztikai teljesítmény, W_A és W_L , között a kapcsolatot a (2.212) összefüggés fejezi ki. A térbeli energiasűrűség, w megváltozásának oka a teljesítménybevétel, a tér teljes energiája a statisztikus közelítésnek megfelelően az energiasűrűség és a terem térfogatának szorzata:

$$W_{be} = W_A + W_L = -V \cdot \frac{\partial w(t)}{\partial t}. \quad (2.212)$$

A (2.206) összefüggés energiasűrűségre vonatkozó alakját (2.212)-ba helyettesítve és kis értékű hangelnyelési tényezőre az utózungési idő linearizált alakját alkalmazva összefüggés található a hangtér w átlagos térbeli energiasűrűsége és a hangforrás W hangteljesítménye között. A hangnyomás effektív értéke négyzetének térbeli átlaga azzal a megfontolással helyettesíthető, hogy a hangteret pontszerű forrás hozza létre, amely maga körül gömbhullámú terjedést hoz létre. A terjedés jellemzően a visszaverődések nem változtatnak:

$$w = \frac{4 \cdot W}{c \cdot A} = \frac{I}{c} = \frac{\tilde{p}_{eff}^2}{\rho_L \cdot c^2}. \quad (2.213)$$

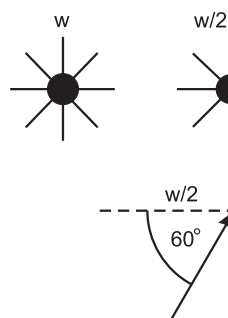
Teremben folyamatosan működő hangforrás és a teremben kialakuló hangnyomás effektív érték négyzetének térbeli átlaga között kölcsönös kapcsolat van, amely a hangforrás hangteljesítményszintje, L_w , és a térbeli átlagos hangnyomásszint, L_p között a (2.214) képlettel fejezhető ki. A kapcsolat a

teljesítményegyensúly kifejezésén alapul, tehát azon, hogy a terembe bevitt akusztikai teljesítmény a határfelületeken elnyelődik. A határfelületek elnyelődését az A egyenértékű hangelnyelési felület fejezi ki:

$$L_w = L_p + 10 \cdot \lg \left(\frac{A}{4} \right) \quad (2.214)$$

A képletben éppúgy, mint a korábban levezetett (2.196) összefüggésben is, $1/4$ -es szorzó jelent meg, azt tükrözve, hogy a hangelnyelésben nem a teljes térbeli energiasűrűség – és intenzitás – vesz részt. E „csökkentő” tényezőnek szemléletes magyarázata is van, az $1/4$ tényező két $1/2$ -es tényezőből tevődik össze. Az egyik $1/2$ -es szorzó tényezőre az a magyarázat, hogy a hang térbeli átlagos beesési szöge 60° , az elnyelődés szempontjából hatékony a mérőleges összetevő. A másik $1/2$ -es szorzó azért jelenik meg, mert míg a tér egy általános belső pontjában 4π térszögből érkezik hang, addig a határfelületen csak 2π térszögből, ezért a határfelületen a térbeli átlagosnak a negyede játszik szerepet az elnyelés szempontjából. A két szemléletes magyarázatot a 2.53. ábra is mutatja.

Az energiasűrűség a hangforrás közelében azonban nem lesz állandó még a diffúz téri modellben



2.53. ábra. Az $1/4$ -es szorzó szemléletes magyarázata

sem. Ez azt is jelenti, hogy a forrás közelében a hangnyomás sem lesz állandó. A hangnyomás helyfüggésére két közelítés adódik.

A pontszerű, W teljesítményű, Ω térszögbe sugárzó hangforrástól r távolságra a közvetlen energiasűrűség, w_k a (2.215) összefüggéssel fejezhető ki, a (2.115a) összefüggéssel analóg gondolatmenet alapján:

$$w_k = \frac{W}{\Omega \cdot r^2 \cdot c}. \quad (2.215)$$

Kubusos terekben a diffúz térszűzben az energiasűrűség w_d lesz a (2.216) összefüggés szerint, feltételezve, hogy az átlagos hangelnyelési tényező nem nagy – figyelembe véve a

(2.213) és (2.207) képleteket. A diffúz térben működő hangforrás teljesítménye W , a térbeli átlagos hangnyelési tényező α :

$$w_d = \frac{4 \cdot W}{c \cdot S \cdot \tilde{\alpha}}. \quad (2.216)$$

Az eredő energiasűrűség a két rész összege, és ez kifejezhető a térbeli átlagos hangnyomás effektív értékének négyzetével (p_{eff}^2):

$$\frac{p_{eff}^2}{\rho_L \cdot c} = W \cdot \left(\frac{1}{\Omega \cdot r^2} + \frac{4}{A} \right) \quad (2.217)$$

Nagyméretű, elsősorban lapos terekben jobb közelítés adódik, ha a diffúz tér energiasűrűségét az első visszaverődés után megmaradó teljesítményrésszel közelítik a (2.218) képlet szerint. Az energiasűrűség indexe a továbbiak miatt R lesz:

$$w_R = \frac{4 \cdot W \cdot (1 - \tilde{\alpha})}{c \cdot S \cdot \tilde{\alpha}}. \quad (2.218)$$

A térre e közelítésben az egyenértékű hangnyelési felület helyett a teremállandó, R lesz a jellemző, mértékegysége szintén m^2 :

$$R = \frac{S \cdot \tilde{\alpha}}{1 - \tilde{\alpha}}. \quad (2.219)$$

Az eredő energiasűrűség ez esetben is a két rész, w_R és w_k összege, és a korábbiakkal megegyezően ez is kifejezhető a térbeli átlagos hangnyomás effektív értékének négyzetével (p_{eff}^2):

$$\frac{p_{eff}^2}{\rho_L \cdot c} = W \cdot \left(\frac{1}{\Omega \cdot r^2} + \frac{4}{R} \right) \quad (2.220)$$

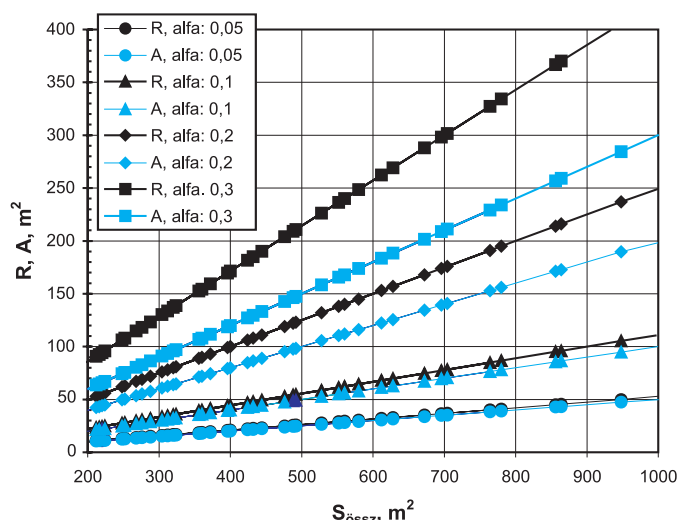
A hangforrás közvetlen környezetében annak közvetlen hatása érvényesül, a távolytérben a hangvisszaverődések hatásának számításbavételére kétféle közelítés adódott. Mindkét közelítésben a hang-

forrástól r távolságra kialakuló hangnyomásszint, $L(r)$ értékét adja meg, kiindulásként a hangforrás hangteljesítményszintje, L_w , és a térjellemző, A vagy R . Az egyik kubusos terekre ad jobb eredményt – l. a (2.221) összefüggést –, a másik közelítést nagyméretű, elsősorban lapos terekre célszerű alkalmazni [(2.222) összefüggés]. Az az Ω térszög, amelybe a hangforrás a teljesítményt lesugározza, a hangforrás helyzetétől függ, a 2.2. táblázat szerint:

$$L(r) = L_w + 10 \cdot \lg \left(\frac{1}{\Omega \cdot r^2} + \frac{4}{A} \right) \quad (2.221)$$

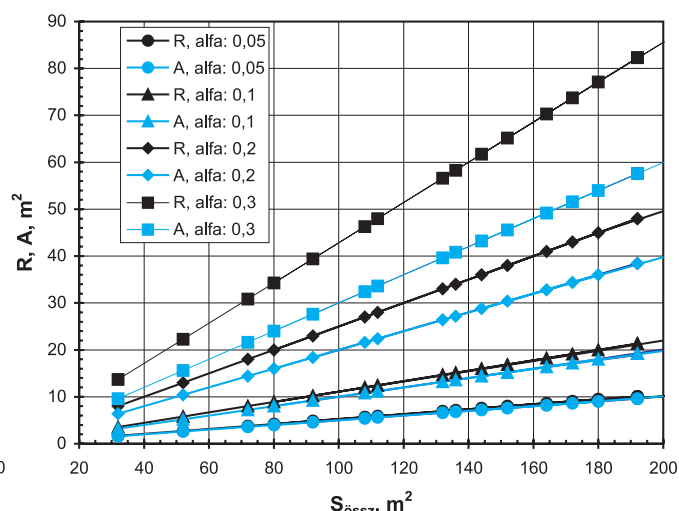
$$L(r) = L_w + 10 \cdot \lg \left(\frac{1}{\Omega \cdot r^2} + \frac{4}{R} \right) \quad (2.222)$$

A nagyságrendi becslések elősegítése, valamint tendenciák megállapítása érdekében e két összefüggés egyes részletei ábrákban is megtalálhatók. A 2.54a, 2.54b ábrán valóságos, hasáb alakú terekre végzett számítások alapján a terem összfelülete, $S_{össz}$ és az egyenértékű hangnyelési felület, A , ill. a teremállandó, R közötti kapcsolatot mutatja különböző átlagos hangnyelési tényezőkre (α). A 2.55. ábra az $L(r)$ hangnyomásszint és az L_w hangteljesítményszint különbségét, $-D_{táv}$ értékét ábrázolja az egyenértékű hangnyelési felület, ill. a teremállandó paramétereként a távolság függvényében, feltéve, hogy a hangforrás térszöge 2π . $D_{táv}$ -ot a (2.7) összefüggés értelmezi. Látható, hogy a terem összfelületének növekedése mind A -t, mind R -t megnöveli, az átlagos



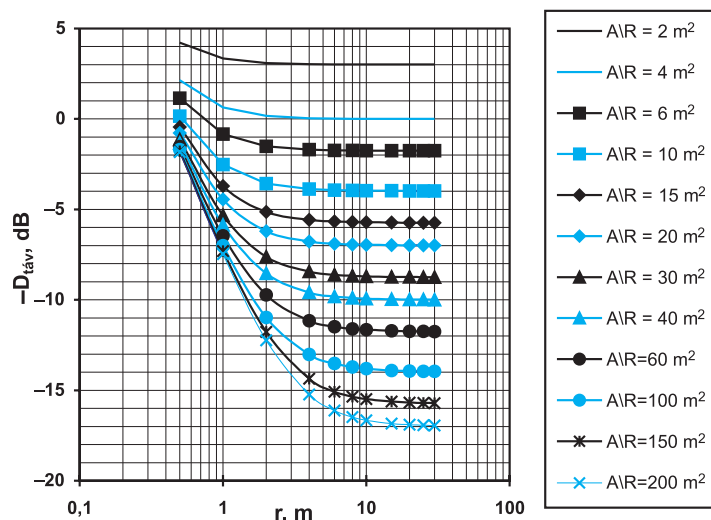
2.54a ábra. Összefüggés termék összfelülete és az egyenértékű hangnyelési felület, ill. a teremállandó között

R teremállandó, m^2 ; A egyenértékű hangnyelési felület, m^2 ; α a terem átlagos hangnyelési tényezője



2.54b ábra. Összefüggés termék összfelülete és az egyenértékű hangnyelési felület, ill. a teremállandó között

Magyarázat mint a 2.54a ábránál



2.55. ábra. A hangnyomásszint és a hangteljesítményszint különbsége, azaz $-D_{\text{táv}}$ értéke a távolság és a terem akusztikai jellemzői függvényében

A/R jelentése: a közölt grafikon mind az R teremállandóra, mind az A egyenértékű hangelnyelési felületre igaz, mert a (2.221) és (2.222) képlet azonos alakú; $A/R = 2 \text{ m}^2$ jelentése, vagy $A = 2 \text{ m}^2$ vagy $R = 2 \text{ m}^2$

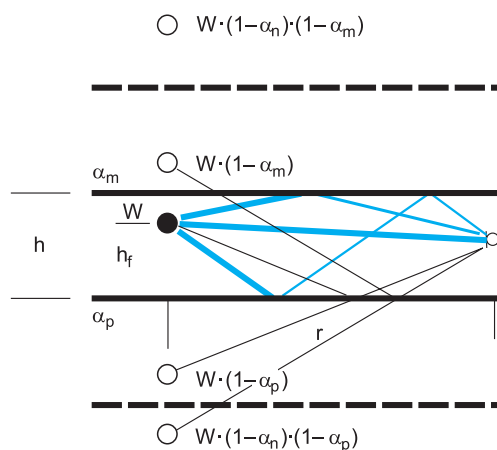
hangelnyelési tényezőhöz hasonlóan. A hangforrástól távolodva egy darabig a szabad feltéti hangterjedés sajátosságai figyelhetők meg, majd egy bizonyos távolság után a távolságfüggvény állandóvá válik e közelítés szerint. Ez azért jelentős tendencia, mert pl. ha zajcsökkentési célból hangelnyelő burkolatot építenek be, akkor az a köztérben nem hatásos, csak a távotérben. Az ábra alkalmas az elérhető hangnyomásszint-csökkenés becslésére is.

2.6.5. Hangterjedés nagyméretű, lapos terekben

A nagyméretű, lapos terek annyiban térnek el az eddig modellezett hangterektől, hogy általános helyen két határoló szerkezet van csak a hangforrás, ill. a megfigyelési pont közelében: a padló és a mennyezet, vagy álmennyezet. Ezek hangelnyelési tényezője a gyakorlatban akár 0 közeli, akár 1 közeli is lehet. Az alapvető tendenciákat, tehát a $D_{\text{táv}}$ függvényt – l. a (2.7) összefüggést – a távolság függvényében két egyszerű modell fogja meghatározni.

Az első modell [2.5] gondolatát alapul véve úgy épül fel, hogy a hangvisszaverő felület a padló és a mennyezet, hangelnyelési tényezőjük α_p , ill. α_m . A hangforrás pontszerű, gömbszimmetrikus teret kelt (l. a 2.2.6. pontot), a visszaverődés a geometriai sajátosságok szerint történik, a 2.2.7-ben elmondottak szerint. A „hangsugár” a mennyezetről, majd a padlóról, majd ismét a mennyezetről szenved visszaverődést. Ez a folyamat a hangforrás többszörös tükrözésével

követhető nyomon mind minőségileg, mind pedig számítással a 2.56. ábra alapján.



2.56. ábra. Hangterjedés meghatározása tükrözés segítségével nagyméretű, lapos térben

h a terem magassága; W a hangforrás hangteljesítménye; α_p , α_m a padló és a mennyezet hangelnyelési tényezője

A padló és a mennyezet közötti távolság a 2.56. ábrán h , a hangforrás és a megfigyelési pont magassága a padló felett h_f , a hangforrás hangteljesítménye W , a megfigyelési pont és a hangforrás közötti vízszintes távolság r . A számított visszaverődések száma n . A tükrözések hangteljesítménye a padló és a mennyezet hangelnyelése miatt csökken. Például a mennyezet feletti ötödik tükrözés hangteljesítményét a (2.223) összefüggés adja meg. A padló alatti tükrözések azonos logikával határozhatók meg. Az ábrán a felső tükrözés hangútjai kék vonallal felszerkesztve láthatók, az eltérő vonalvastagságok eltérő számú visszaverődést jelentenek. Az

alsó tükörforrásoktól csak a szerkesztési segédvonalak szerepelnek az áttekinthetőség érdekében:

$$W_{m,5} = W \cdot (1 - \alpha_m)^3 \cdot (1 - \alpha_p)^2. \quad (2.223)$$

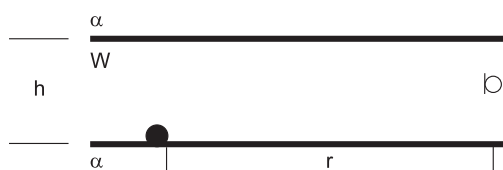
Az eredő hangnyomás effektív értékének, p_{er} -nek a négyzete az egyes tükörforrásoktól származó hangnyomás effektívérték négyzetek összegzésével számítható ki a (2.2.7.) fejezetben megismertek általánosításaként. Áttekinthetőbb lesz az összefüggés, és a tendencia is jobban felfedezhető, ha az alsó és felső hangvisszaverő felület hangelnyelési tényezője azonos, és a hangforrás $h/2$ magasságban van:

$$p_{er}^2 = \frac{W \cdot \rho_L \cdot c}{4 \cdot \pi \cdot r^2} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(1 - \alpha)^n}{1 + \left(\frac{\frac{h}{2} + n \cdot h}{r} \right)^2}. \quad (2.224)$$

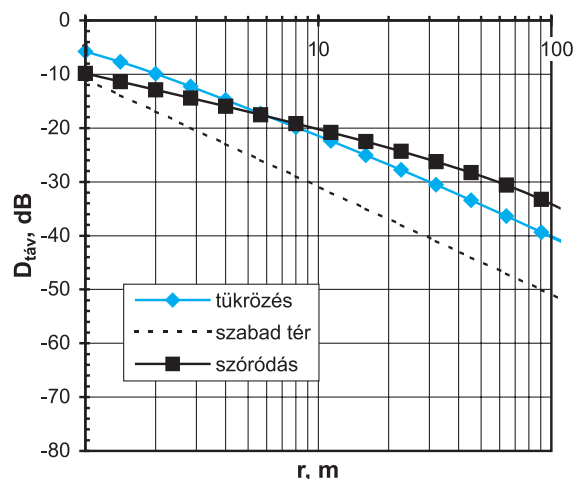
Az adott modell szerint, ha a padló és a mennyezet α hangelnyelési tényezője azonos, a tér magassága h , a hangforrás és a megfigyelési pont közötti távolság r , mindkét pont a tér fél magasságában helyezkedik el, akkor a (2.7) összefüggésben értelmezett távolsági csillapítást, amely a két határolószerkezet felületéről érkező sokszoros hangvisszaverődések hatását is tartalmazza, a (2.225) képlet fejezi ki:

$$\begin{aligned} D_{táv} &= L_w - L_p = \\ &= 10 \cdot \lg \frac{4 \cdot \pi \cdot r^2}{1 \text{ m}^2} - 10 \cdot \lg \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(1 - \alpha)^n}{1 + \left(\frac{h}{r} \right)^2 \cdot \left(\frac{1}{2} + n \right)^2}. \end{aligned} \quad (2.225)$$

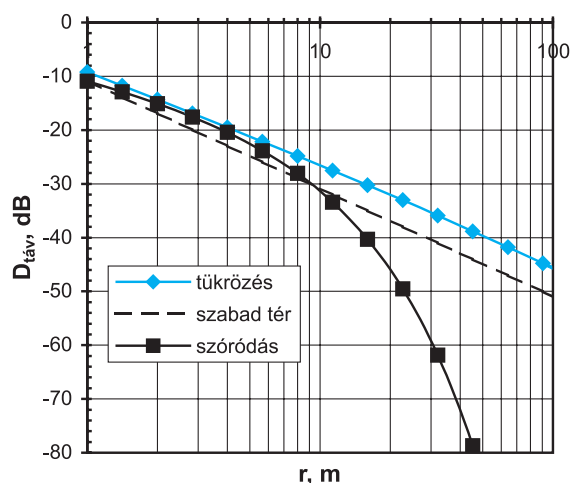
Látható, hogy a szabadtéri terjedéshez képest a méretarányoktól és a hangelnyelési tényezőtől függő, a terjedési csillapítást csökkentő tényező jelenik meg. A tendenciákat a 2.58. ábra szemlélteti. A 2.58a ábra merev határolószerkezetek hatását ($\alpha_m = \alpha_p = 0,03$), a 2.58b ábra erősen hangelnyelő szerkezetek hatását ($\alpha_m = \alpha_p = 0,8$), míg a 2.58c ábra egy valósághoz közel eső értékpár hatását ($\alpha_m = 0,7$, $\alpha_p = 0,1$) mutatja be. A tükrözés jelű görbe és a szabadtéri terjedést jelentő szabad tér jelű görbe között annál nagyobb az eltérés, minél kisebb a határolószerkezetek hangelnyelési tényezője. A tükrözés görbe meredeksége eltér a szabad téri terjedés meredekségétől.



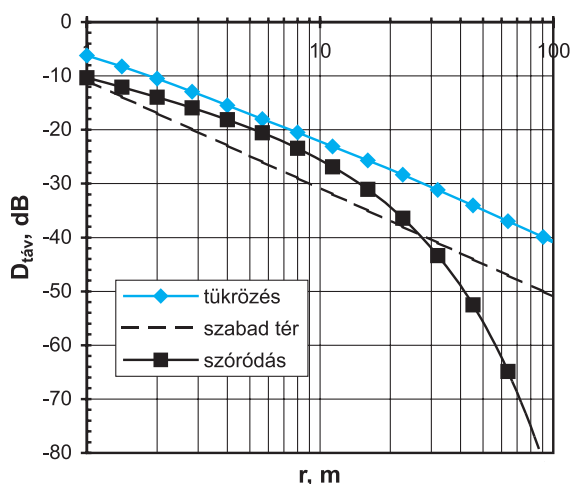
2.57. ábra. Elrendezési vázlat hangterjedés meghatározásához a [IV.2]-ben található modell alapján



2.58a ábra. A geometriai csillapítás a távolság függvényében a kétféle modell alkalmazásával, $\alpha_m = \alpha_p = 0,03$



2.58b ábra. A geometriai csillapítás a távolság függvényében a kétféle modell alkalmazásával, $\alpha_m = \alpha_p = 0,8$



2.58c ábra. A geometriai csillapítás a távolság függvényében a kétféle modell alkalmazásával, $\alpha_m = 0,7$, $\alpha_p = 0,1$

Egy másik modell [IV.2] két párhuzamos, véges, α hangelnyelésű határfelület közötti hangterjedést számítja, ha a hangforrás pontszerű, térszöge $2 \cdot \pi$. Átlagos, lényegében statisztikus közelítést alkalmaz az energetikai terjedésére. A távolsági csillapítás értékét a (2.226) képlet, valamint a 2.58. ábrán a szóródas nevű görbe mutatja. A távolságfüggés alapteredése 3 dB/kétszeres távolság, amelyet lineáris összefüggés keretében növel meg a határoló-szerkezetek hangelnyelése:

$$D_{\text{táv}} = L_w - L_p = 10 \cdot \lg(h \cdot r) + 4,34 \cdot \frac{\alpha \cdot r}{h} + 5. \quad (2.226)$$

E modell lehetővé teszi a terjedés útjában levő akadályok figyelembevételét is, szintén statisztikus közelítésben. A modell ilyen kiterjesztésének gyakorlati alkalmazása azonban bizonytalan, mert nehéz a gyakorlatban előforduló szituációk megfeleltetése a modell paramétereinek.

A 2.58. ábránál látható, hogy mintegy 20 m vízszintes távolságig a két modell nem ad lényegesen eltérő eredményt. 20 m felett az eltérés akkor lesz nagy, ha a hangelnyelési tényező megnő.

3.

REZGÉSTERJEDÉS (TESTHANG) AZ ÉPÜLETSZERKEZETEKBE

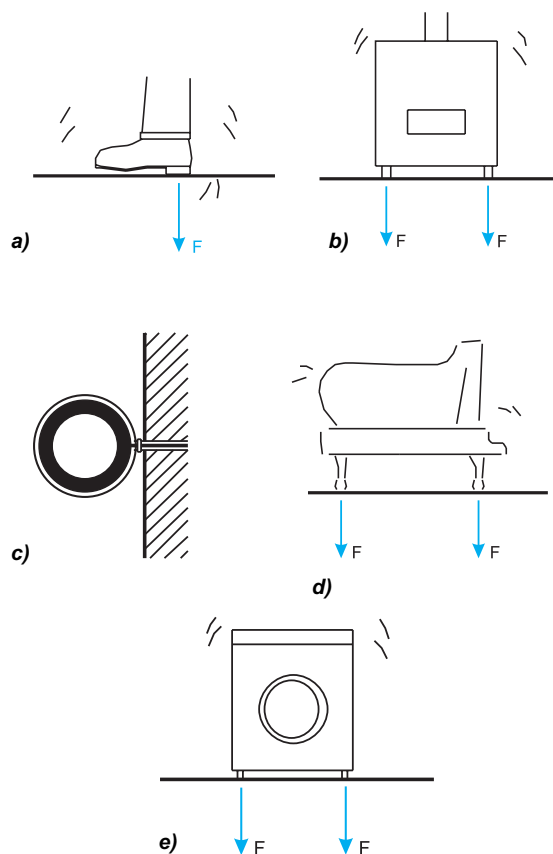
3.1. A testhang fogalom

Az épületek és helyiségek rendeltetésszerű használata során a társalgás, zenehallgatás, a technikai berendezések, a munkagépek működése léghangot kelt. A léghang a határolószervezeteknek ütközve részben visszaverődik, a hanghullám által szállított akusztikai teljesítmény egy része viszont behatol (léghangterhelés) a szerkezetbe. Ez úgy értendő, hogy a hang rezgést kelt a határolószervezetekben. Azt a jelenséget, hogy a hallható hangok tartományában (l. a 6. fejezetet a hallás tulajdonságairól) a határoló-szerkezetekben rezgések keletkeznek, testhang jelenségnek nevezik a német „Körperschall” kifejezés nyomán. Az angol „structure borne sound” megnevezés szintén ezt jelenti, a jelenség egy másik szempontjára, a hangsugárzásra hívja fel a figyelmet, amelyről a 4. fejezetben lesz szó.

A határolószervezetek rezgését nem csak léghangterhelés okozza. A járkálás és az ehhez hasonló helyiséghasználat közben a födém felületét impulzus jellegű, tehát rövid ideig tartó erőhatások érik, amelyek szintén rezgést keltenek. A határolószervezetre állított, esetleg rögzített gépi berendezések – vízellátási berendezések, kazán, szellőzőgépek, lift, garázskapu, termelőgépek stb. – a rögzítéseken keresztül szintén rezgésbe hozzák a határolószervezeteket, tehát testhangot keltenek.

A rendeltetésszerű épülethasználat mint testhangkeltés néhány lehetséges folyamatát a 3.1a-e ábra szemlélteti. A járkálás, a technikai berendezések működése, a csővezetékek rezgése, a hangszerek megszólaltatása, az egyes háztartási gépek működése közvetlen dinamikus erővel hatnak a határolószervezetekre, amelyek rezgése hangot kelt a szerkezet másik oldalán.

Tapasztalataink szerint a szerkezetekben keletkezett rezgések tovaterjednek. A 3. fejezet azzal foglalkozik, hogy melyek a rezgéskeltés és -terjedés működésmódjai, a terjedés milyen hullámformákban valósul meg, és a terjedés gátlásának melyek a fizikai alapjai.



3.1. ábra. A rendeltetésszerű épülethasználat, mint testhangforrás

a) járkálás; b) épülethez tartozó technikai berendezések működése;
c) csövek rezgése; d) hangszerek használata; e) háztartási gép, pl. mosógép működése

A határolószervezetek egy része a kisfrekvenciás tartományban koncentrált paraméterekkel modellezhető: egyes szerkezeti részek tömegként, mások veszteséges rugóként működnek. A tömeg jellegű viselkedés egyszerűen belátható, a rugalmas deformáció azonban önmagában is összetett folyamat, ezért a fejezetben először ezt tekintjük át. Ezután a legegyszerűbb rezgőrendszer sajátosságainak megismerésére kerül sor, mert ez a gyakorlatban jól hasz-

nálható elemzési, méretezési elvek megfogalmazását teszi lehetővé. A különféle hullámterjedési sajátosságokat a testhangterjedés vizsgálata követi.

3.2. Feszültség–deformáció párok

Az épületekben felhasznált anyagok és szerkezetek rugalmas viselkedésének megértéséhez először a hatások és deformációk alapvető eseteit tekintjük át.

Ha a rugalmas, lineáris közeg egy elemi részére nyomó igénybevétel hat, akkor az anyagban ennek ellenhatásaként nyomófeszültség keletkezik, az anyag pedig összenyomódik. Ha a nyomó igénybevétel rezgés jellegű, a keletkező feszültség és deformáció is két részből tevődik össze: az állandó nyomás hatására állandó feszültség és állandó összenyomódás, a változó nyomás összetevő hatására változó feszültség és összenyomódás jön létre. Mindent az 3.2. ábra szemlélteti arra az esetre, ha az anyag deformációja csak a jelölt x irányban történik. Az ábrán az anyag állandó p_0 nyomóterhelés hatása kialakuló vastagságát x_0 jelöli, a rezgés jellegű nyomó igénybevétel szinuszos, amplitúdója, körfrekvenciája, valamint az anyag belsejében keletkező nyomófeszültség amplitúdója p_1 , ω , σ_1 . A keletkező deformáció amplitúdója és a külső hatáshoz képesti fázis eltérése x_1 és ϕ . A rezgés jellegű szinuszos nyomást a (3.1) összefüggés, a kitérés rezgés összetevőjét a (3.2) összefüggés mutatja. Az egyen-

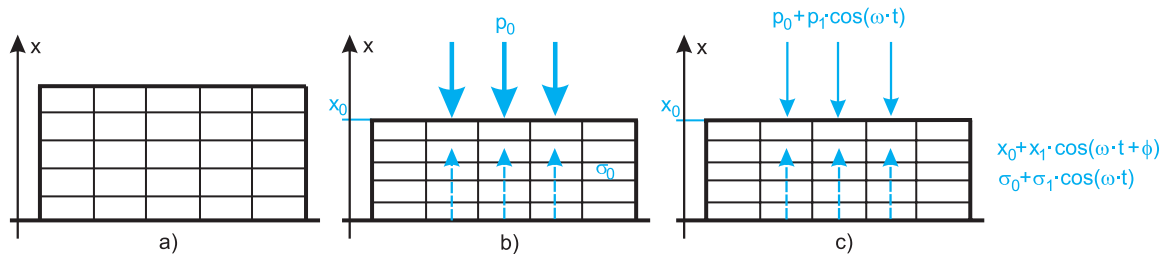
súly miatt a p_1 nyomásamplitúdó és a σ_1 nyomófeszültség-amplitúdó megegyezik egymással:

$$p(t) = p_1 \cdot \cos(\omega \cdot t); \quad (3.1)$$

$$x(t) = x_1 \cdot \cos(\omega \cdot t + \phi); \quad (3.2)$$

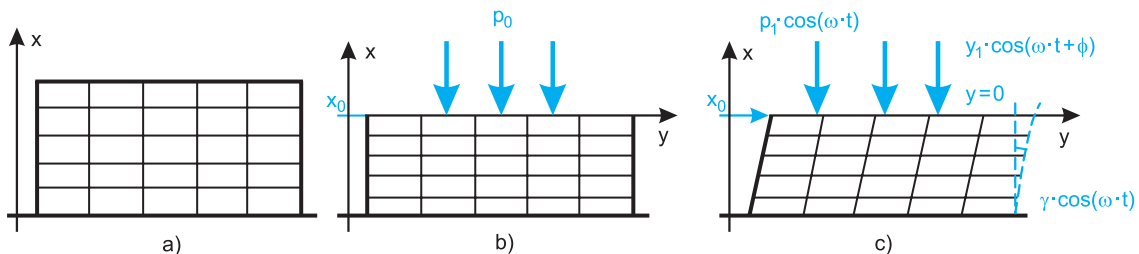
$$p_1 = \sigma_1. \quad (3.3)$$

Az elemi cellára a 3.3. ábra szerint oldalirányban ható nyomás hatására az anyagban nyírófeszültség keletkezik, és az elemi cella szögdeformációt szenved. Az állandó nyomásra szuperponálódó, rezgés jellegű nyomásösszetevő az előzőekhez hasonlóan az állandó feszültségre szuperponálódó feszültség rezgést és szögdeformációt okoz. A szögdeformáció a rezgést létrehozó nyomás irányában kitérést eredményez, amely kisjelű közelítés esetén a szögdeformáció lineáris függvényeként írható fel. Mindent a 3.3. ábra mutatja, ahol egyes gyakorlati alkalmazásoknak megfelelően az állandó terhelést nyomó igénybevétel hozza létre. Az anyag állandó p_0 nyomóterhelés hatása kialakuló vastagságát x_0 jelöli ez esetben is, a rezgés jellegű külső nyíró igénybevétel szinuszos, amplitúdója, körfrekvenciája, valamint az anyag belsejében keletkező nyírófeszültség amplitúdója rendre: p_1 , ω , τ_1 . A keletkező szögdeformáció amplitúdója, a nyíróhatás irányába eső kitérésdeformáció amplitúdója, a gerjesztéshez képesti fázis pedig γ_1 , y_1 és ϕ .



3.2. ábra. Rugalmas deformáció nyomó igénybevétel hatására

a) nyugalmi helyzet; b) összenyomódás állandó terhelés (p_0 nyomás) hatására; c) deformáció az állandó p_0 nyomásra szuperponálódó p_1 amplitúdójú, ω körfrekvenciájú nyomásrezgés hatására



3.3. ábra. Rugalmas deformáció nyíró igénybevétel hatására

a) nyugalmi helyzet; b) összenyomódás állandó terhelés (p_0 nyomás) hatására; c) nyíródeformáció az állandó p_0 nyomásra szuperponálódó, de arra merőleges p_1 amplitúdójú, ω körfrekvenciájú nyomásrezgés hatására; a deformáció alapvetően γ szögváltozás, amelynek következménye az y irányú rezgés kitérés

$$p(t) = p_1 \cdot \cos(\omega \cdot t); \quad (3.4)$$

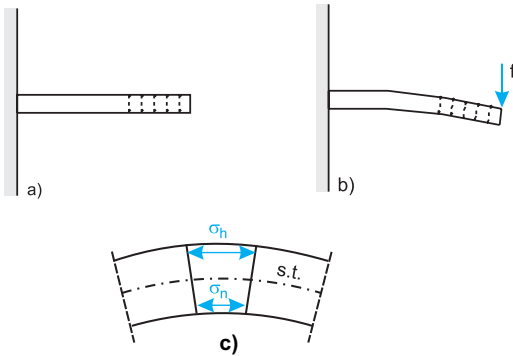
$$\gamma(t) = \gamma_1 \cdot \cos(\omega \cdot t + \phi); \quad (3.5)$$

$$p_1 = \tau_1; \quad (3.6)$$

$$y(t) = y_1 \cdot \cos(\omega \cdot t + \phi); \quad (3.7)$$

$$y_1 \approx \gamma_1 \cdot x_0. \quad (3.8)$$

A hangsugárzással lévő kapcsolat miatt nagyon fontos a hajlítódeformáció ismerete. A 3.4. ábrán konzolosan befogott rúd látható nyugalmi helyzetben (a) ábra) és a végére ható erő hatására a hajlított állapotban (b) ábra). A keresztmetszeti részletet tekintve (c) ábra) az ábrán a semleges tengely (az az ív, amely mentén a keresztmetszetben nem ébred feszültség) felett az anyagban a jelölt irányban σ_h húzófeszültség, a semleges szál alatt pedig σ_n nyomófeszültség ébred. A c) ábrán látható az elemi cella deformációja is. A hajlítás húzó és nyomó igénybevételből és az ezekhez tartozó deformációból tehető össze.



3.4. ábra. A hajlítódeformáció szemléltetése

- a) konzolosan befogott rúd nyugalmi helyzetben;
b) a rúd végére ható F erő hatására kialakuló hajlítási deformáció;
c) keresztmetszetrészlet, a semleges szál; σ_h húzófeszültség;
 σ_n nyomófeszültség

3.3. A dinamikai rugalmassági modulus. Valós és komplex leírás [IV.7], [IV.8], [IV.9]

A komplex dinamikai rugalmassági modulus fogalma a húzó-nyomó és a nyíró igénybevétel deformációpárra lehetséges, a további összefüggések közvetlenül a nyomó igénybevételre vonatkoznak. Az eredmények áttétele például a nyíró igénybevételre minden további nélkül lehetségesek.

A külső hatást és az ezzel egyenlő, az anyagban ébredő nyomófeszültséget a (3.1) összefüggés fe-

jezi ki. A relatív méretváltozás, azaz a rezgésintézésnek az állandó terhelés deformációjára normalizált értéke $\varepsilon(t)$, amelyet a (3.9) összefüggés mutat:

$$\varepsilon(t) = \frac{x_1}{x_0} \cdot \cos(\omega \cdot t + \phi) = \varepsilon_1 \cdot \cos(\omega \cdot t + \phi). \quad (3.9)$$

A 3.1. és 3.9. összefüggések közös megoldása, azaz a feszültség–relatív méretváltozás függvény ferde tengelyű ellipszis lesz a munkapont, tehát az állandó terhelés hatására kialakuló feszültség–relatív méretváltozás pont körül.

A megoldáshoz a következő lépésekkel jutunk:

$$\frac{\sigma(t)}{\sigma_1} = B; \quad (3.10)$$

$$\frac{\varepsilon(t)}{\varepsilon_1} = A; \quad (3.11)$$

$$A^2 - 2 \cdot A \cdot B \cdot \cos(\phi) + B^2 = \sin^2(\phi); \quad (3.12)$$

$$A = A' \cdot \cos(\alpha) + B' \cdot \sin(\alpha); \quad (3.13)$$

$$B = -A' \cdot \sin(\alpha) + B' \cdot \cos(\alpha); \quad (3.14)$$

$$A'^2 \cdot (1 + \cos(\phi)) + B'^2 \cdot (1 - \cos(\phi)) = \sin^2(\phi) \quad (3.15)$$

A (3.13) és (3.14) egyenletek koordinátatranszformációt jelentenek, α a transzformált tengely és az eredeti koordináta-tengely által bezárt szöget jelöli. A (3.15) egyenlet egy ellipszis egyenlete a ferde koordináta-rendszerben, amelynek transzformált tengelye $\alpha = \pi/4$ szöget zár be a megfelelő eredeti tengellyel. A nagytengely és a kistengely hossza a' és b' :

$$a' = \frac{\sin(\phi)}{\sqrt{1 + \cos(\phi)}}; \quad (3.16)$$

$$b' = \frac{\sin(\phi)}{\sqrt{1 - \cos(\phi)}}. \quad (3.17)$$

A transzformált rendszerben az ellipszis területe S' , az eredeti rendszerben pedig S , és ha a fázisszög értéke kicsi, a szinuszfüggvény a lineáris taggal közelíthető:

$$S' = \pi \cdot a' \cdot b' = \pi \cdot \sin(\phi) \approx \pi \cdot \phi; \quad (3.18)$$

$$S = \sigma_1 \cdot \varepsilon_1 \cdot \pi \cdot \sin(\phi) \approx \sigma_1 \cdot \varepsilon_1 \cdot \pi \cdot \phi. \quad (3.19)$$

A feszültség–relatív méretváltozás kapcsolat grafikus formája a 3.5. ábrán látható.

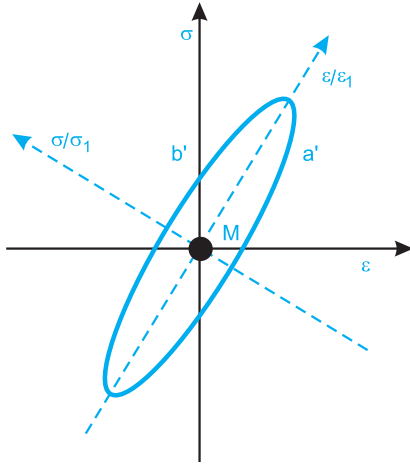
A relatív méretváltozás és a feszültség közötti fáziskülönbség oka belső anyagszerkezeti mechanizmusokban keresendő.

A további számításban a kiinduló-összefüggés a relatív méretváltozás harmonikus rezgését írja le, a (3.20) valós alakban, és (3.21) komplex alakban. A fázis ϕ felírásban a relatív méretváltozás komplex amplitúdójában, ε_1 jelenik meg:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_1 \cdot \cos(\omega \cdot t); \quad (3.20)$$

$$\underline{\varepsilon}(t) = \underline{\varepsilon}_1 \cdot e^{i\omega t}. \quad (3.21)$$

A Hook-törvényben is szereplő rugalmassági moduluszt az általánosság kedvéért D_R jelöli, mértékegysége N/m².



3.5. ábra. Az anyagban ébredő dinamikus feszültség és a relatív méretváltozás közötti kapcsolat

a' , b' a ferde helyzetű ellipszis nagy- és kistengelye; σ/σ_1 , $\varepsilon/\varepsilon_1$ a feszültségamplitúdóra, ill. a relatív méretváltozás amplitúdóra normalizált koordinátatengelyek; M munkapont

A fáziskülönbséget a belső súrlódással magyarázva a súrlódás mechanizmusára feltételt kell tenni. A legegyszerűbb leírási mód a viszkózus súrlódás, bár ez az épületakusztika jelenségeinek körében (pl. rugalmas lemezek viselkedése) nehezen képzelhető el. A viszkózus súrlódás esetén a súrlódó erő/nyomás a rezgéssebességgel arányos, az arányossági tényező jele ν . A feszültséget valós időfüggvényként a következő egyenlet fejezi ki:

$$\begin{aligned}\sigma(t) &= D_R \cdot \left(\varepsilon(t) + \nu \cdot \frac{\partial \varepsilon(t)}{\partial t} \right) = \\ &= D_R \cdot \varepsilon_1 \cdot \sqrt{1 + (\omega \cdot \nu)^2} \cdot \cos(\omega \cdot t + \arctg(\omega \cdot \nu))\end{aligned}\quad (3.22)$$

Bevezetve a η veszteségi tényezőt, a (3.23) összefüggés szerint a (3.22) egyenlet (3.24) alakú lesz. A komplex felírás, (3.25) már közvetlenül a veszteségi tényezőt tartalmazza:

$$\eta = \omega \cdot \nu; \quad (3.23)$$

$$\sigma(t) = D_R \cdot \varepsilon_1 \cdot \sqrt{1 + \eta^2} \cdot \cos(\omega \cdot t + \arctg(\eta)); \quad (3.24)$$

$$\underline{\sigma}(t) = \underline{\sigma}_1 \cdot e^{i\omega t} = \underline{\varepsilon}_1 \cdot e^{i\omega t} \cdot D_R \cdot (1 + i \cdot \eta). \quad (3.25)$$

A komplex alakban a relatív méretváltozásból áttérve rezgéssebességre bevezethető a komplex dinamikai rugalmassági modulus, $\underline{D}$, N/m² (3.27), a fajlagos dinamikai merevség, $\underline{s}$, N/m³ (3.28), és a súrlódási ellenállás, $\underline{r}$, N · s/m⁴ (3.29) fogalma:

$$\underline{\sigma}_1 = \underline{\nu}_1 \cdot \left\{ \frac{1}{i \cdot \omega} \cdot \frac{D_R}{x_0} + \frac{D_R}{x_0} \cdot \vartheta \right\} \quad (3.26)$$

$$\underline{D} = D_R \cdot (1 + i \cdot \omega \cdot \nu) = D_R \cdot (1 + i \cdot \eta); \quad (3.27)$$

$$\underline{s} = \frac{D_R}{x_0}; \quad (3.28)$$

$$\underline{r} = \frac{D_R \cdot \vartheta}{x_0}. \quad (3.29)$$

Az összefüggések azt jelentik, hogy ha a belső anyagszerkezeti mechanizmusokat viszkózus súrlódással modellezzük,

akkor az anyagot az adott igénybevétel szempontjából veszteségmentes rugóval és vele azonos rezgési sebességgel mozgó súrlódási ellenállással lehet közelíteni. Ez esetben a komplex dinamikai rugalmassági modulus fázisszöge frekvenciafüggő, a súrlódási ellenállás frekvenciafüggetlen.

Rugalmas lemezek rezgés jellegű deformációi vagy e lemezekben terjedő különböző hullámok esetében a viszkózus modell alkalmazása értelmezési és gyakorlati problémákat is felvet, ezért helyett a relaxációs modell alkalmazása került előtérbe. A relaxációs modell alapja annak felismerése, hogy az anyagban ébredő feszültség részben a relatív méretváltozás azonos időpontbeli értékétől, részben pedig a relatív méretváltozás korábbi értékeitől függ. Ez a $\varphi(\Delta t)$ jelű, az utóhatásra jellemző paraméterrel fejezhető ki a (3.30) egyenlet szerint, ahol Δt az utóhatás kifejezéséhez az adott mérési időponthoz képest megjelenő időeltérés:

$$\sigma(t) = D_1 \cdot \varepsilon(t) - \int_0^\infty \varepsilon(t - \Delta t) \cdot \varphi(\Delta t) d(\Delta t). \quad (3.30)$$

Az utóhatás tényezőben a Hook-törvényhez hasonló D_2 arányossági tényezővel lehet az anyagban ébredő feszültséggel kapcsolatot teremteni, de figyelembe kell venni a relaxációs időt is, jele τ . Azt utóhatásra jellemző függvény tipikus exponenciálisan csökkenő időfüggést ad:

$$\varphi(\Delta t) = \frac{D_2}{\tau} \cdot e^{-\frac{\Delta t}{\tau}}. \quad (3.31)$$

A valós tartományban elért megoldást a (3.32) összefüggés mutatja, ahol a későbbiekben további értelmezéssel gazdagodó η jelű veszteségi tényezőt a (3.33), a relatív méretváltozás és a feszültség közötti D_R arányossági tényező kifejtését pedig a (3.34) adja meg. A valós időfüggvény komplex alakba is átirtható [l. (3.35)] és a relatív méretváltozás a rezgéssebességgel helyettesíthető, ezt mutatja a (3.36) összefüggés, ami elvezet a komplex dinamikai rugalmassági modulus, $\underline{D}$ (3.37), a fajlagos dinamikai merevség, $\underline{s}$ (3.38) és az ellenállás, $\underline{r}$ (3.39) meghatározásához is:

$$\sigma(t) = \varepsilon_1 \cdot D_R \cdot \sqrt{1 + \eta^2} \cdot \cos(\omega \cdot t + \arctg(\eta)); \quad (3.32)$$

$$\eta = \frac{\omega \cdot \tau \cdot D_2}{D_1 \cdot ((\omega \cdot \tau)^2 + 1) - D_2}; \quad (3.33)$$

$$D_R = D_1 - \frac{D_2}{(\omega \cdot \tau)^2 + 1}; \quad (3.34)$$

$$\underline{\sigma}(t) = \underline{\sigma}_1 \cdot e^{i\omega t} = \underline{\varepsilon}_1 \cdot e^{i\omega t} \cdot D_R \cdot (1 + i \cdot \eta); \quad (3.35)$$

$$\underline{\sigma}_1 = \underline{\nu}_1 \cdot \left\{ \frac{1}{i \cdot \omega} \cdot \frac{D_R}{x_0} + \frac{D_R \cdot \eta}{x_0 \cdot \omega} \right\} \quad (3.36)$$

$$\underline{D} = D_R \cdot (1 + i \cdot \eta); \quad (3.37)$$

$$\underline{s} = \frac{D_R}{x_0}; \quad (3.38)$$

$$\underline{r} = \frac{D_R \cdot \eta}{x_0 \cdot \omega}. \quad (3.39)$$

A viszkózus és a relaxációs modell összehasonlítása már ebben az egyszerűsített közelítésben is mutat néhány különbséget és néhány azonosságot. A különbség a feszültség és a

relatív méretváltozás közötti fázis frekvenciamenetében, ill. ezzel összhangban az ellenállás jellegű tagok frekvenciamenetében van. A fáziskülönbség azonban mindkét esetben közvetlenül a veszteséget kifejező tényezőtől függ. Tehát a relaxációs modell is energiaveszteségre vezet. Az azonosság a komplex dinamikai rugalmassági modulus értelmezésében és abban van, hogy az ellenállás jellegű és a rugó jellegű elem rezgésebbessége azonos.

Összehasonlításként szolgálhat egy harmadik, inkább csak elvi jellegű közelítés, amelyben a veszteségi tényező állandó. A komplex dinamikai rugalmassági modulus megfelel például a (3.37), a fajlagos dinamikai merevség a (3.38), az ellenállás pedig a (3.39) összefüggésnek.

Az egy rezgési ciklus alatti fajlagos, azaz egységnyi felületre vonatkozó, E'_v energiaveszteség a (3.40) összefüggés miatt a σ - ε görbe által bezárt területtel, tehát az ellipszis területével egyenlő. Kis értékű veszteségi tényező esetén ezt a (3.40) összefüggés második és harmadik része adja meg. A fajlagos reverzibilis mechanikai energiát, E'_r -t a (3.41) összefüggés fejezi ki:

$$E'_v = \oint \sigma d\varepsilon = \sigma_1 \cdot \varepsilon_1 \cdot \pi \cdot \sin(\arctg(\eta)) \approx D_R \cdot \varepsilon_1^2 \cdot \pi \cdot \eta; \quad (3.40)$$

$$E'_r = \frac{1}{2} \cdot \sigma_1 \cdot \varepsilon_1 = \frac{D_R \cdot \varepsilon_1^2}{2}. \quad (3.41)$$

Az egy rezgési ciklus alatti energiaveszteség és a reverzibilis energia hányadosa közvetlenül a relaxációs modell veszteségi tényezőjét adja a következő összefüggés szerint:

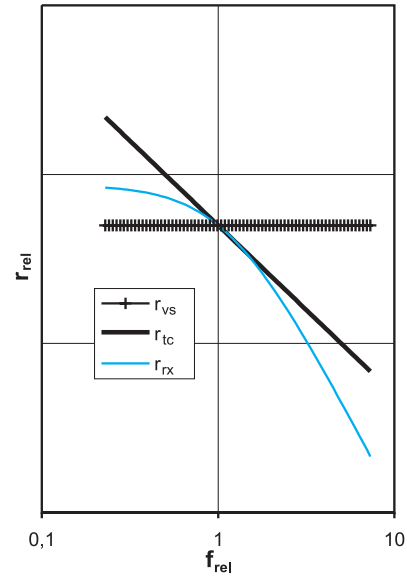
$$\eta = \frac{E'_v}{2 \cdot \pi \cdot E'_r}. \quad (3.42a)$$

A veszteségi tényező az időegység alatti fajlagos energiák tehát fajlagos teljesítmények, W'_v és W'_r arányával is kifejezhető:

$$\eta = \frac{W'_v}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot W'_r}. \quad (3.42b)$$

A két modell összehasonlítására alkalmas a 3.6. ábra, kiemelve az állandó veszteségi tényező példájával. Az ábrán a viszkózus sűrűlódás ellenállása (r_{vs}), az állandó veszteségi tényezőhöz tartozó ellenállás (r_{tc}) és a relaxációs modellből számítható ellenállás (r_{rx}) látható a relatív frekvencia függvényében, logaritmikus frekvencia- és ellenállásleptékben. A kiindulóadatok kiválasztásával az $f_{rel} = 1$ értéken a három ellenállás megegyezik az összehasonlíthatóság érdekében. Látható, hogy a viszkózus modellben a sűrűlódási ellenállás értéke a frekvencia függvényében állandó, az állandó veszteségi tényezőhöz elsőfokú hiperbola tartozik, a relaxációs modell összetett frekvenciamenetet eredményez.

A relatív méretváltozás és az anyagban ébredő feszültség közötti kapcsolat meghatározására többféle modell ismert (viszkózus sűrűlódás, relaxációs kapcsolat stb.), ezek közös következménye az, hogy a rezgést létrehozó hatás és a relatív méretváltozás között fáziseltérés lesz. A lineáris méretváltozás tartományában, amelybe az épületszerkezetek akusztikai jellemzőinek elemzése is beletartozik, a relatív méretváltozás, $\varepsilon(t)$ és a feszültség (nyomó igénybevétel esetén σ , nyíró igénybevétel esetén pedig



3.6. ábra. A veszteséget kifejező ellenállás frekvenciafüggése rugalmas anyagokban, különböző anyagmodellek esetén

r_{vs} ellenállás frekvenciamenete viszkózus belső sűrűlódás modellben; r_{tc} ellenállás frekvenciamenete állandó veszteségi tényező feltételezésével; r_{rx} ellenállás frekvenciamenete a relaxációs modellben

τ a jele) egyenesen arányos egymással. Az arányosság felírható az időtartományban [l. a (3.43) összefüggést]. A D_R arányossági tényező, nyomó igénybevétel esetén az E Young-modulus, nyíró igénybevétel esetén a G nyírási modulus lesz. A fázist az általános felírásban a η veszteségi tényezőtől lehet meghatározni:

$$\sigma(t) = D_R \cdot \sqrt{1 + \eta^2} \cdot \varepsilon_1 \cdot \cos(\omega \cdot t + \arctg(\eta)). \quad (3.43)$$

A rugalmas anyagok deformációja és az anyagban ébredő feszültség közötti kapcsolatban fontos a belső veszteség modellezése. A veszteség az oka annak, hogy az anyag mozgásban tartásához állandó külső munkavégzés szükséges. A belső veszteség eredményezi azt, hogy a feszültség-relatív méretváltozás görbe ferde tengelyű ellipszis és nem ferde egyenes alakú.

Az áttekintett modellekben a veszteség forrása vagy a viszkózus sűrűlódás volt, vagy relaxációs mechanizmus lejátszódása. Elektromechanikai analógiában mindkét modell vesztesége ellenállással szemléltethető, de a viszkózus modellben az ellenállás frekvenciafüggetlen, a relaxációs modellből $1/x$ jellegű frekvenciafüggés következik. E modellek eltérő eredményt adnak. Az állandó veszteség átszámítása veszteségi ellenállássá hasonló tendenciájú eredményre vezet, mint a relaxációs modell-

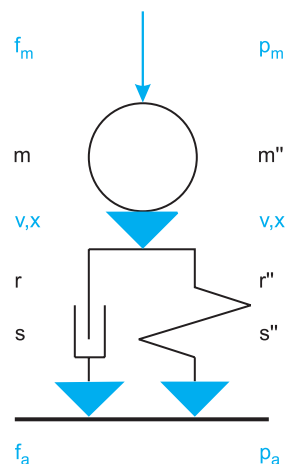
ből számított veszteségi ellenállás. A [3.1] irodalom áttekintésében további modellezési lehetőségek is vannak, azonban a szerkezetválasztást a relaxációs modellből következő veszteségi tényező és ellenállás figyelembevétele már jól segíti.

A dinamikai rugalmassági modulusok sok tényezőtől függenek, egyik legfontosabb az állandó terhelés nagysága. Ezt többek között a rezgésszigetelő gépalapok vagy a rugalmas peremkapcsolatok méretezésében, az alkalmazható anyagok kiválasztásában feltétlenül figyelembe kell venni.

3.4. Az egy szabadsági fokú rezgőrendszer viselkedése [IV.7], [IV.8], [IV.9]

A legegyszerűbb rezgőrendszer, amely számos rezgéstani fogalom, jelenség magyarázatára alkalmas, ugyanakkor egyes épületszerkezetek hangszigetelési jellemzőinek kisfrekvenciás közelítését is modellelzi, az ún. egy szabadsági fokú rendszer. Tömeg jellegű, rugó jellegű és a veszteségeket kifejező, súrlódás jellegű elemből áll, amelyet merev, nagy tömegű aljzathoz rögzítettek. A hullámhosszhoz képest kisméretű szerkezeti összetevők esetén a rendszer koncentrált paraméterű elemekből épül fel, lemez jellegű, tehát egy térirányban vékony, de a másik két térirányban a hullámhosszal legalább összemérhető szerkezeti összetevők modellezésekor fajlagos, tehát egységnyi felületre vonatkozó elemek szerepelnek. A hullámhosszhoz képest kis méret kisfrekvenciás tartományt jelent. A 3.1. táblázat az egyes elemek megnevezését és mértékegységét foglalja össze.

A rendszer vázlata a 3.7. ábrán látható. Kiindulásként, az ábra jelölése szerint a tömeg jellegű elemre ható erő (koncentrált paraméterek esetén) vagy nyomás (elosztott paraméterekből felépülő rendszer) okozza a rendszer rezgését, a rugalmas elem pedig viszkózus csillapításúnak tekinthető, te-



3.7. ábra. Egy szabadsági fokú rezgőrendszer vázlata

Koncentrált paraméterű közelítés: f_m az m tömegre ható erő; m tömeg; v, x a tömeg rezgésebbessége és kitérése; r a rugalmas elem belső súrlódását tükröző ellenállás; s a rugalmas elem dinamikai merevsége; f_a a rugalmas elem által a merev aljzatnak átadott erő. Elosztott paraméterű közelítés: p_m az m'' fajlagos tömegre ható erő; m'' fajlagos tömeg; v'', x'' a fajlagos tömegként modellezett elem rezgésebbessége és kitérése; r a rugalmas elem belső súrlódását tükröző fajlagos ellenállás; s'' a rugalmas elem fajlagos dinamikai merevsége; p_a a rugalmas elem által a merev aljzatnak átadott nyomás

hát a súrlódási erő – vagy nyomás – a rezgésebbességgel arányos, független a frekvenciától. A tömeg jellegű elem rezgésebbessége v , kitérése x . A rendszer felépítése miatt a rugalmas elem, tehát a rugó és a súrlódás a tömeggel azonos sebességgel – kitéréssel – mozog. A rendszer viselkedésének leírása és a következtetések megállapítása részben a valószínű szerkezetek modellezésének lehetőségét teremti meg, részben pedig lehetővé és megalapozottá teszi az egyes szerkezeti elemek kiválasztását.

A rendszer mozgásegyenlete inhomogén differenciálegyenlet, a koncentrált paraméterű változatra a (3.43), az elosztott paraméterű változatra a (3.44). A mozgásegyenlet a jelen esetben a rendszerre ható és az egyes elemek között ébredő erők egyensúlyát fejezi ki, szemléletesen kifejezve a külső, tömeg-

3.1. táblázat. Rezgőrendszer elemei koncentrált paraméterű rendszerben

Rezgőrendszer	Rendszerelem	Megnevezés	Jel	Mértékegység
Koncentrált paraméterű, kisméretű	Tömeg jellegű elem	tömeg	m	kg
	Rugó jellegű elem	rugómerevség	s	N/m
	Súrlódást kifejező elem	súrlódási ellenállás	r	N · s/m
Két térirányban kiterjedt, egy térirányban kisméretű	Tömeg jellegű elem	fajlagos tömeg	m''	kg/m ²
	Rugó jellegű elem	fajlagos rugómerevség	s''	N/m ³
	Súrlódást kifejező elem	súrlódási ellenállás	r''	N · s/m ³

re ható F_m erő, vagy p_m nyomás a tömeg mozgására, a rugó összenyomására és a súrlódás legyőzésére fordítódik:

$$F_m(t) = m \cdot \frac{dv}{dt} + r \cdot v + s \cdot \int v dt; \quad (3.43)$$

$$p_m(t) = m'' \cdot \frac{dv}{dt} + r'' \cdot v + s'' \cdot \int v dt. \quad (3.44)$$

Ha a gerjesztést harmonikus rezgés hozza létre, tehát mind az erő/nyomás, mind a rezgéssebesség szinuszosan változik az idő függvényében, a gerjesztés exponenciális alakban is kifejezhető. Ez a kifejezőmód a különböző elemek koncentrált vagy fajlagos, tehát egységnyi felületre vonatkozó mechanikai impedanciájának bevezetését adja meg. Az impedancia általában olyan változók hányadosa, amelyek szorzata teljesítményt vagy intenzitást ad. A jelen esetben az erő és sebesség hányadosa lesz a mechanikai impedancia, a nyomás (egységnyi felületre ható erő) és a sebesség hányadosa a fajlagos impedancia. A valós, mérhető időfüggvény a komplex időfüggvény valós része. A komplex mennyiségek alkalmazásának az az előnye, hogy a nagyság mellett a fázis információt is kifejezik, aminek többek között az egyes vizsgálandó összetevők egymáshoz viszonyított időbeli helyzetében, a szállított teljesítményben, a visszaverődés fázis változásában van jelentősége. A komplex mennyiségeket nem különbözteti meg jelölés, a rezgés amplitúdóját az 1 index jelöli:

$$p_m(t) = p_1 \cdot e^{i\omega t}; \quad (3.45)$$

$$F_m(t) = F_1 \cdot e^{i\omega t}. \quad (3.46)$$

A 3.2. táblázat az impedanciaelemeket foglalja össze.

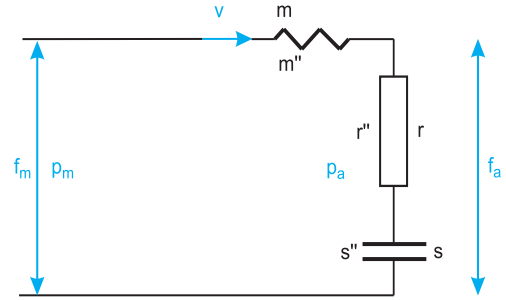
3.2. táblázat. A rezgőrendszer elemei

A rezgőrendszer elemei	Koncentrált paraméterű rendszer	Elosztott paraméterű rendszer
Tömegelem impedanciája	$i \cdot \omega \cdot m$	$i \cdot \omega \cdot m''$
Rugóelem impedanciája	$\frac{s}{i \cdot \omega}$	$\frac{s''}{i \cdot \omega}$
Viszkózus súrlódás impedanciája	r	r''

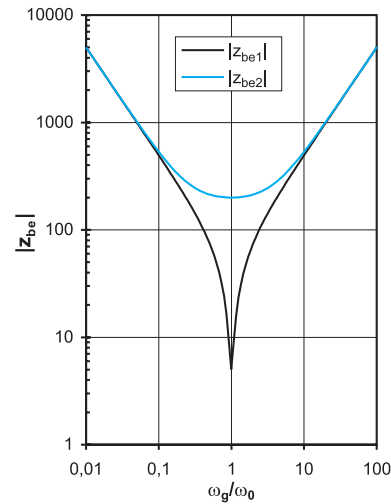
A mozgásegyenlet homogén alakjának megoldása a rendszer karakterisztikus függvényét adja meg, amely a rendszer bemeneti impedanciája vagy specifikus bemeneti impedanciája lesz és amelynek elektromechanikai analógiája a 3.8. ábrán látható. A (3.47) egyenlet kiterjedt, ezért egységnyi, fajlagos jellemzőkkel megadott rendszert mutatja:

$$K(f) = Z_{be}''(f) = i \cdot \omega \cdot m'' + r'' + \frac{s''}{i \cdot \omega}. \quad (3.47)$$

A bemeneti impedancia frekvenciafüggvénye a 3.9. ábrán figyelhető meg. A vízszintes tengelyen relatív körfrekvenciaskála látható, logaritmikus léptékben. Az egység az a körfrekvencia, ahol a tömegelem és a rugóelem impedanciájának abszolút értéke egyenlő, előjelük ellentétes, tehát a bemeneti impedancia értéke valós. Egyúttal ez lesz az impedancia legkisebb értéke, amit a súrlódás határoz meg. E frekvenciát rezonanciafrekvenciának hívják. A függőleges tengelyen az impe-



3.8. ábra. Elektromechanikai analógia



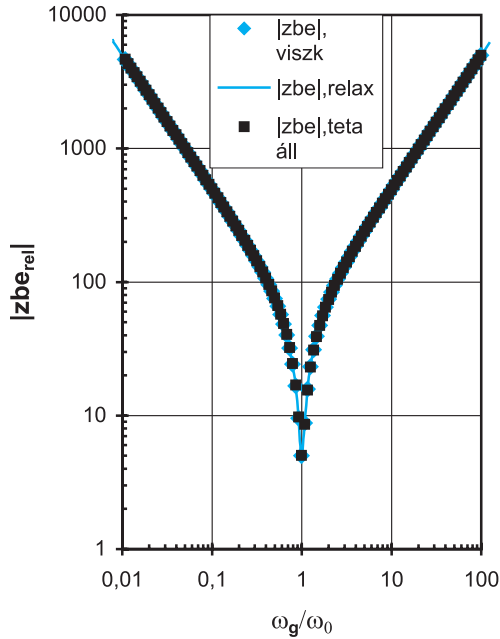
3.9. ábra. Bemeneti impedancia viszkózus súrlódás modellben, két ellenállás esetén

Az 1. változat ellenállása sokkal kisebb, mint a 2. változaté. ω_g a gerjesztés körfrekvenciája, ω_0 a rendszer rezonancia-körfrekvenciája

dancia abszolút értéke látható, szintén logaritmikus léptékben. A bemeneti impedancia a kisfrekvenciás tartományban rugó jellegű, azaz a görbe csökkenő, meredeksége $-0,1$ -szeres a 10 -szeres frekvenciaarány esetén, a nagyfrekvenciás tartományban tömeg jellegű, tehát növekvő, 10 -szeres a meredekség a 10 -szeres frekvenciaviszonyhoz. A váltás a rugó jellegű és tömeg jellegű szakasz között a rezonanciafrekvencián, azaz a rendszer sajátfrekvenciáján történik. Az ábrán két eltérő nagyságú, állandó súrlódású példa szerepel, az ellenállások aránya $r_1/r_2 = 40$.

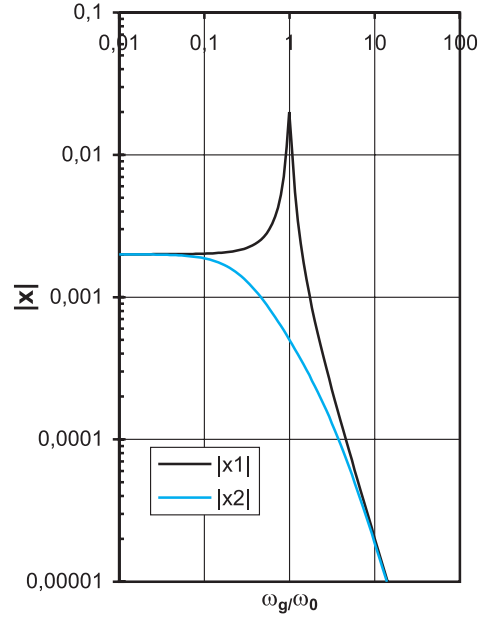
A 3.10. ábrán a viszkózus modellből, az állandó veszteségű modellből és a relaxációs modellből számítható bemeneti impedanciák összehasonlítása látható. A paraméterek megválasztása úgy történt, hogy a rezonanciafrekvencia mindhárom esetben $\omega_g/\omega_0 = 1$ relatív körfrekvenciára essen és a frekvencia környezetében az ellenállás értéke közelítőleg azonos legyen. Látható, hogy tendenciájában a három közelítés gyakorlatilag azonos jellegű eredményt ad.

Meghatározott frekvenciájú szinuszos jellegű harmonikusgerjesztéshez tartozó válaszfüggvény szintén a bemeneti impedancia segítségével fejezhető ki. Például, ha a gerjesztés nyomás jellegű, akkor a válasz a rendszer keletkező rezgéssebessége, vagy rezgéskitérése a frekvencia függvényében. A gerjesztés körfrekvenciája ω_g . A rezgéskitérés komplex amplitúdója $x_1(\omega)$ a viszkózus csillapítás modellben:



3.10. ábra. A bemeneti impedancia abszolút értékének összehasonlítása a három modellben

Viszk: viszkózus súrlódás modell; teta áll: állandó veszteségi tényezős modell; relax: relaxációs modell; ω_g a gerjesztés körfrekvenciája, ω_0 a rendszer rezonancia-körfrekvenciája



3.11. ábra. A rezgés kitérés a frekvencia függvényében a viszkózus csillapítású modellben

Az 1. változat vesztesége sokkal kisebb, mint a 2. változaté. $|x|$ a tömeg rezgés kitérésének abszolút értéke; ω_g a gerjesztés körfrekvenciája; ω_0 a rendszer rezonancia-körfrekvenciája

$$\underline{x}_1(\omega_g) = \frac{p_1}{m''} \cdot \frac{1}{-\omega_g^2 + i \cdot 2 \cdot \omega_g \cdot \delta + \omega_0^2}, \quad (3.48)$$

ahol a veszteség nélküli rendszer körfrekvenciája ω_0 a (3.49) összefüggés szerint. A veszteség jellemzésére a viszkózus súrlódási ellenállás helyett a δ tényező is alkalmas:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{s''}{m''}}; \quad (3.49)$$

$$\delta = \frac{r''}{2 \cdot m''}. \quad (3.50)$$

A kitérés valós időfüggvénye a következő lesz:

$$x(t) = \frac{p_1}{m''} \cdot \frac{1}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega_g^2)^2 + 4 \cdot \delta^2 \cdot \omega_g^2}} \cdot \sin(\omega_g \cdot t + \phi); \quad (3.51)$$

$$\phi = \arctg\left(\frac{2 \cdot \delta \cdot \omega_g}{\omega_0^2 - \omega_g^2}\right) \quad (3.52)$$

Látható, hogy az amplitúdó a gerjesztési frekvencia és a sajátfrekvencia kölcsönös helyzetétől, valamint a rendszer veszteségétől függ. A kitérés és a gerjesztés között fáziseltérés alakul ki. A kitérés abszolút értékének frekvenciafüggését a 3.11. ábra szemlélteti két eltérő súrlódású példán. A vízszintes tengelyen a saját-körfrekvenciára normalizált relatív körfrekvencia, a függőleges tengelyen a rezgés kitérés amplitúdójának abszolút értéke látható, mindkét tengely logaritmusos léptékű. A kisfrekvenciás és a nagyfrekvenciás tendencia jellegű viselkedés azonos, a lényeges eltérés a rezonancia-körfrekvencia környezetében található. Ha a belső súrlódás kicsi, a rezonancia környezetében a kitérés értéke nagy lesz.

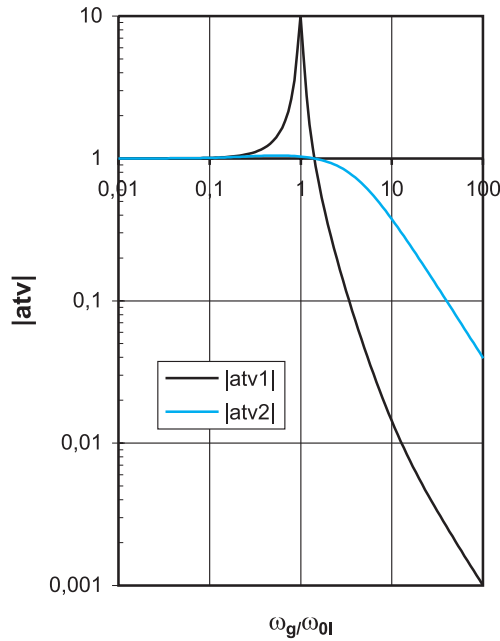
A rendszer „viselkedésének” egy további fontos jellemzője az átviteli függvény, amely a 3.7. ábra jelölését felhasznál-

va az f_d/f_m vagy a p_d/p_m hányadossal fejezhető ki. Az átviteli függvény abszolút értékének frekvenciafüggését a 3.12. ábra ábrázolja a viszkózus modellben számolva, szintén két, eltérő veszteségű példán. Az átviteli függvény e példákban azt fejezi ki, hogy a rendszer mekkora erőt vagy nyomást ad át az alapnak. Minél kisebb a számértéke, annál jobb a rendszer szigetelése. A grafikon vízszintes tengelyén a saját-körfrekvenciára, ω_0 -ra normalizált körfrekvencia, ω_{gr}/ω_0 , a függőleges tengelyen az átviteli függvény abszolút értéke szerepel, mindkét tengely esetében logaritmusos léptékben. Az ábra alkalmas arra, hogy az akusztikai szigetelést a frekvencia függvényében szemléltesse: a rendszer a rezonanciafrekvencia alatt nem szigetel, hiszen az átviteli függvény értéke 1. A rezonanciafrekvencia környezetében a belső súrlódás szerepe nagyon fontos lesz: kismértékű súrlódás esetén 1-nél nagyobb lesz az átviteli függvény értéke. Ez azt jelenti, hogy az alapra ható erő – nyomás – nagyobb lesz, mint a külső erő – nyomás –, tehát a rendszer erősít, nem csillapít.

A 3.13. ábrán szintén az átviteli függvény abszolút értéke szerepel, a három modellben számolva. Megfigyelhető, hogy a rezonanciafrekvencia alatt és annak környezetében a három modell közel azonos eredményt ad, a rezonanciafrekvencia felett a tendenciákban kisebb eltérések alakulnak ki.

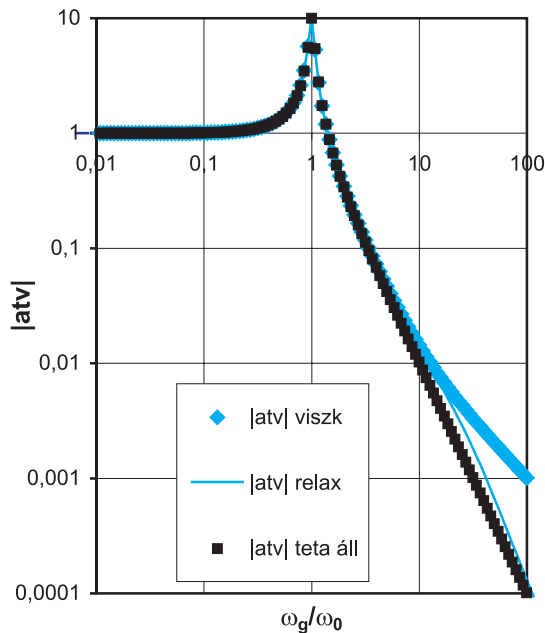
A rendszer átmeneti állapotának (tranzien bekapcsoláskor vagy kikapcsoláskor) elemzése további sajátosságokra derít fényt.

A tranzien viselkedés megismerésének legegyszerűbb esete a rendszerre $\delta(t)$ Dirac-deltaimpulzusra adott válasz meghatározása. A mozgásegyenlet az (3.53) összefüggés, a gerjesztés, azaz az impulzusos nyomás hatás-időfüggvénye a (3.54) szerint fejezhető ki:



3.12. ábra. Az átviteli függvény értéke a frekvencia függvényében a viszkózus csillapítású modellben

Az 1. változat vesztesége sokkal kisebb, mint a 2. változaté. $|atv|$ a tömegre és az alapra ható erők vagy nyomások hányadosának abszolút értéke; ω_g a gerjesztés körfrekvenciája; ω_0 a rendszer rezonancia-körfrekvenciája



3.13. ábra. Az átviteli függvény értéke a frekvencia függvényében, összehasonlítva a három modellben

Viszk: viszkózus sűrűlódás modell;
teta áll: állandó veszteségi tényezős modell; relax: relaxációs modell; ω_g a gerjesztés körfrekvenciája; ω_0 a rendszer rezonancia-körfrekvenciája. $|atv|$ átviteli függvény abszolút értéke

$$p_{nyomás}(t) = m'' \cdot \frac{\partial^2 x(t)}{\partial t^2} + r'' \cdot \frac{\partial x(t)}{\partial t} + s'' \cdot x \quad (3.53)$$

$$p_{nyomás}(t) = \delta_{nyomás}(t) \quad (3.54)$$

Figyelembe véve azt is, hogy a kiindulóállapotban a rendszer nyugalomban van, tehát mind a kitérés, mind a rezgéssébség értéke 0, az elosztott paraméterű rendszer impedanciájának Laplace-transzformáltja a (3.55), a gerjesztőnyomásé (3.56), a válaszfüggvényé, a kitérésé pedig a (3.57) egyenlet lesz. A kitérés időfüggvénye (3.58) lesz az inverz Laplace-transzformáció után. A Laplace-transzformáció változóját p jelöli, a veszteségre jellemző δ tényező meghatározását az (3.59) összefüggés adja meg. A veszteséges rendszer ω_v saját-körfrekvenciáját, azaz a lecsengő szinuszos rezgés körfrekvenciáját a (3.60) képlet fejezi ki. Ha a veszteség kicsi, akkor ω_v kis hibával helyettesíthető ω_0 értékével.

$$z''(p) = \frac{m''}{p} \cdot (p^2 + 2 \cdot \delta \cdot p + \omega_0^2); \quad (3.55)$$

$$p_{nyomás}(p) = p_{n1}; \quad (3.56)$$

$$x_1(p) = \frac{p_{n1}}{m''} \cdot \frac{1}{p^2 + 2 \cdot \delta \cdot p + \omega_0^2}; \quad (3.57)$$

$$x_1(t) = \frac{p_{n1}}{m'' \cdot \omega_v} \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin(\omega_v \cdot t); \quad (3.58)$$

$$\delta = \frac{r}{2 \cdot m''}; \quad (3.59)$$

$$\omega_v = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}. \quad (3.60)$$

A keletkező időfüggvény csillapodó amplitúdójú harmonikus rezgés. A csillapodás sebessége, azaz az exponenciális csökkenés mértéke a rendszer veszteségétől függ: minél nagyobb a veszteség, annál gyorsabb a lecsengés sebessége. Azonban, ha a rendszer sűrűlódása egy kritikus értéket meghalad, akkor a tranziens folyamatban nem alakul ki harmonikus rezgés, az állandósult állapotot mind a tömeg, mind a rugó exponenciális folyamat során éri el. A sűrűlódásnak azt a kritikus értékét, amely a szinuszos rezgés határát okozza kritikus sűrűlódásnak nevezzük. A lecsengő szinuszfüggvény körfrekvenciája a csillapítás függvényében eltér a veszteségmentes rendszer saját-körfrekvenciájától.

A következő tranziens jelenség a bekapcsolás, amely úgy modellezhető, hogy a $t = 0$ időponttól a rendszerre f_g frekvenciájú, szinuszosan változó nyomás hat. A válaszidőfüggvény a x rezgés kitérés időfüggvénye, amely többek között a Laplace-transzformáció segítségével határozható meg.

A kitérés kifejező mozgás egyenletét ismét az (3.53) összefüggés mutatja. A bekapcsolt szinuszos nyomás transzformáltja a (3.61), a kitérés időfüggvénye a (3.62):

$$p_{nyomás}(p) = p_{n1} \cdot \frac{1}{p^2 + \omega_g^2}; \quad (3.61)$$

$$x_1(p) = \frac{p_{n1}}{m''} \cdot \frac{1}{p^2 + \omega_g^2} \cdot \frac{1}{p^2 + 2 \cdot \delta \cdot p + \omega_0^2}. \quad (3.62)$$

Az inverz Laplace-transzformáció eredményeként a rendszer rezgés kitérés időfüggvénye, $xb(t)$ két összetevőből áll: a rezgés keltésnek megfelelő frekvenciájú, de az erőtől eltérő fázisú, állandó amplitúdójú szinuszos részből, ez lesz az állan-

dósult állapot, $xb_{all}(t)$, valamint egy exponenciálisan csökkenő amplitúdójú, a veszteséges rendszer sajátfrekvenciájával megegyező frekvenciájú szinuszos részből, ez a transziens időfüggvény, $xb_{tr}(t)$. A válaszfüggvény amplitúdója b_{all} , értéke megegyezik az állandósult állapotra kapott eredménnyel. Az exponenciálisan változó összetevő az áttekinthetőség miatt külön is szerepel, jele $b_{lecs}(t)$:

$$b_{all} = \frac{p_{n1}}{m''} \cdot \frac{\omega_g}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega_g^2)^2 + 4 \cdot \delta^2 \cdot \omega_g^2}}; \quad (3.63)$$

$$xb_{all}(t) = b_{all} \cdot \sin(\omega_g \cdot t + \varphi_{all}); \quad (3.64)$$

$$\varphi_{all} = \arctg \left\{ \frac{2 \cdot \delta \cdot \omega_g}{\omega_0^2 - \omega_g^2} \right\} \quad (3.65)$$

$$xb_{tr}(t) = b_{all} \cdot \frac{\omega_g \cdot e^{-\delta \cdot t}}{\omega_v} \cdot \sin(\omega_v \cdot t + \varphi_{tr}); \quad (3.66)$$

$$\omega_v = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}; \quad (3.67)$$

$$xb(t) = xb_{all}(t) + xb_{tr}(t); \quad (3.68)$$

$$b_{lecs}(t) = b_{all} \cdot \frac{\omega_g}{\omega_v} \cdot e^{-\delta \cdot t}. \quad (3.69)$$

A 3.14. ábrán az eredő időfüggvény és az egyes összetevők szerepelnek. Az idő relatív egységekben szerepel, jele mindkét ábrán t_{rel} . Látható többek között, hogy az állandósult állapotrezgésének frekvenciája a gerjesztés frekvenciájával egyezik meg, a transziens frekvenciáját viszont a veszteséges rendszer sajátfrekvenciája adja meg. Az állandósult állapot

amplitúdója megegyezik a korábbi vizsgálatoknál kapott eredménnyel: minél közelebb van a gerjesztés frekvenciája a rendszer sajátfrekvenciájához, annál nagyobb lesz a keletkező kényszerrezgés amplitúdója. A lecsengés sebessége annál nagyobb, azaz a transziens állapot lezajlásának ideje annál kisebb, minél nagyobb a veszteségi tényező értéke.

A rendszerben a gerjesztés kikapcsolásakor lezajló változások a súrlódás szerepének további megvilágítását teszik lehetővé. A modellben a tömegelemre hosszú ideje ható szinuszos erőt a $t_{rel} = 0$ időpontban kikapcsolják. A mozgásegyenlet az (3.53) összefüggésnek felel meg, de $p(t_{rel} = 0) = 0$. A kezdeti feltételeket is figyelembe kell venni a Laplace-transzformáció meghatározásához.

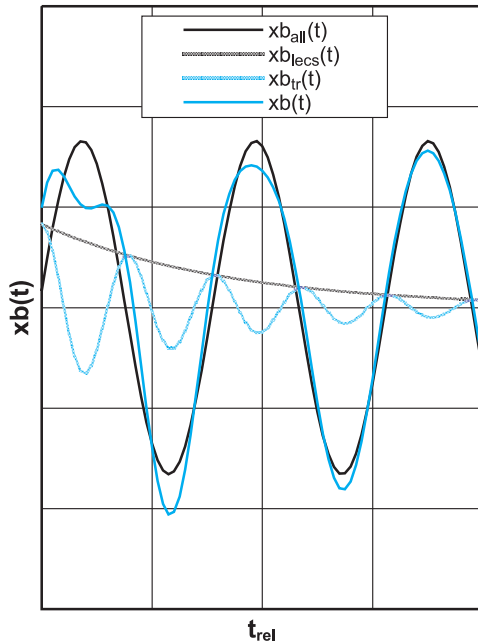
A válaszfüggvény ismét a tömeg rezgéskitérése, ezt $xk(t)$ jelöli. Két összetevőből áll, mindkettő exponenciálisan csillapodó szinuszos rezgés, amplitúdójuk is eltérő. Frekvenciájuk a veszteséges rendszer sajátfrekvenciája a (3.67) összefüggés szerint. A két lecsengés amplitúdója a rezgés $t = 0$ időpontban tapasztalható kezdeti értékeitől (X_{10} kitérés és V_{10} sebesség) szintén függ:

$$xk_1(t) = X_{10} \cdot e^{-\delta \cdot t}; \quad (3.70)$$

$$xk_2(t) = \frac{\delta \cdot X_{10} + V_{10}}{\omega_v} \cdot e^{-\delta \cdot t}; \quad (3.71)$$

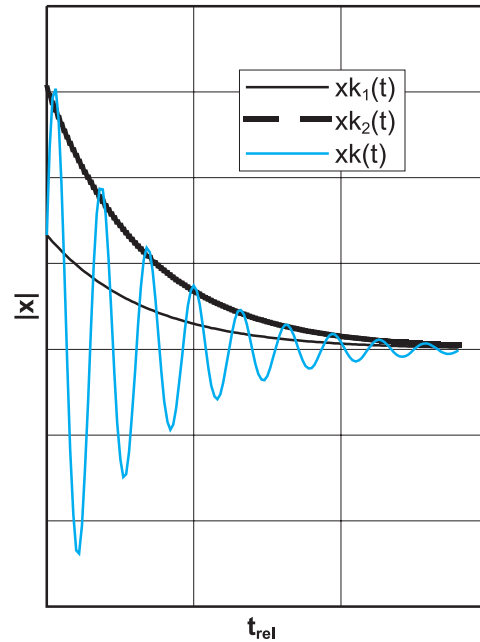
$$xk(t) = xk_1(t) \cdot \cos(\omega_v \cdot t) + xk_2(t) \cdot \sin(\omega_v \cdot t). \quad (3.72)$$

A keletkezett eredő időfüggvény a 3.15. ábrán látható. Az ábra az $xk_2(t)$ lecsengési szakasz időfüggvényét is mutatja, amely a csökkenő amplitúdójú rezgés burkolója. A kezdeti értékek miatt $xk_2(t)$ értéke nagyobb a másik exponenciális tagnál, az határozza meg döntően az eredőt. Megfigyelhető, hogy



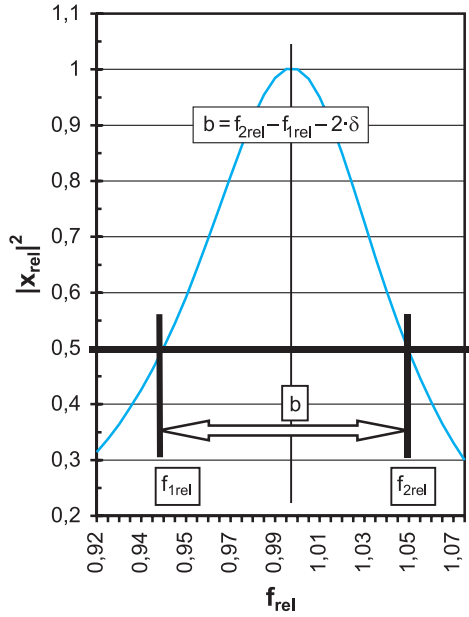
3.14. ábra. Egy szabadsági fokú rendszer bekapcsolási transziense

Az egyes időfüggvények jelentése: $xb_{all}(t)$ az állandósult állapot;
 $xb_{lecs}(t)$ a lecsengési folyamat exponenciális burkolója;
 $xb_{tr}(t)$ a bekapcsolási folyamat transziens összetevője;
 $xb(t)$ az eredő rezgés jelenség



3.15. ábra. Egy szabadsági fokú rendszer kikapcsolási transziense

$x(t)$ a tömeg rezgéskitérése a relatív idő függvényében;
 $xk_1(t)$, $xk_2(t)$ a kikapcsolási transziens exponenciálisan csillapodó összetevői;
 $xk(t)$ a kikapcsolási transziens eredője, amely a periodikus tagokat is tartalmazza



3.16. ábra. A rendszer rezgés kitérés effektív értékének négyzete a frekvencia függvényében a rezonanciafrekvencia környezetében állandósult állapotban; a fél teljesítmény sávszélesség értelmezése
 $|x_{rel}|^2$ a rezgés kitérés-amplitúdónak a normalizált értéke arra az amplitúdóra, amely a rezonanciafrekvencián kialakul;
 f_{rel} a rezonanciafrekvenciára normalizált frekvenciaskála;
 f_{1rel}, f_{2rel} az $|x_{rel}|^2 = 0,5$ -höz tartozó relatív frekvenciák

a harmonikuskomponens frekvenciája a veszteséges rendszer sajátfrekvenciája, az exponenciális burkoló csökkenési sebességét a rendszer vesztesége határozza meg.

Ha a rendszer súrlódása meghalad egy kritikus értéket, akkor a tranzien szakszban nem alakul ki harmonikus rezgés, az állandósult állapotot mind a tömeg, mind a rugó exponenciális folyamat során éri el.

A rendszerben tárolt energia, azaz a mozgásra fordított munka arányos a kitérés négyzetével. A 3.16. ábrán a rezgés kitérés relatív amplitúdónégyzete, $|x_{rel}|^2$ látható a rezonanciafrekvencia környezetében, a rezonanciafrekvenciára normalizált relatív frekvencia függvényében. A relatív amplitúdó a rezgés kitérés rezonanciafrekvencián tapasztalható amplitúdójának értékére normalizált amplitúdó. A rezonanciafrekvencián, ahol $f_{rel} = 1$, $|x_{rel}|^2 = 1$ lesz a normalizálás miatt.

A rendszer belső csillapításától függ annak a két nevezetes frekvenciának az értéke, ahol $|x_{rel}|^2 = 0,5$. Ha a rezgés nagyságát logaritmikus egységben fejezik ki, akkor a 0,5 a -3 dB-nek felel meg a rezonanciafrekvencián felvett értékhez képest. A rezonancia alatti frekvenciát f_{1rel} , a rezonancia feletti frekvenciát f_{2rel} -el jelölve a belső veszteségre minőségileg jellemző az ún. fél teljesítmény-sávszélesség, b , a két frekvencia közötti távolság, amelyet az (3.48)–(3.50) egyenletek megoldásával lehet meghatározni:

$$b = f_{2rel} - f_{1rel} = 2 \cdot \delta. \quad (3.73)$$

Minél kisebb a veszteség, tehát minél kisebb r , r'' vagy δ értéke, annál kisebb lesz a teljesítmény-sávszélesség is.

A rendszer elemeinek energiáit elemezve a csillapítás mértékére további jellemzők határozhatók meg. A kiterjedt mére-

tű rendszer elemeit tekintve a tömeg elem fajlagos, egységnyi felületre vonatkozó E''_{kin} mozgási energiáját a (3.74), a rugalmas elem fajlagos helyzeti energiáját, E''_{pot} -ot a (3.75) kifejezés adja meg az állandósult állapotban, ha a gerjesztés frekvenciája megegyezik a veszteségmentes rendszer sajátfrekvenciájával. A rendszer E''_{tot} összes fajlagos energiája a fajlagos mozgási és helyzeti energia összege lesz a (3.76) összefüggés szerint:

$$E''_{kin} = \frac{m''}{2} \cdot \left(\frac{\partial x}{\partial t} \right)^2 = \frac{m''}{2} \cdot \omega_0^2 \cdot b_{all}^2 \cos^2(\omega_0 \cdot t + \phi); \quad (3.74)$$

$$E''_{pot} = \frac{s''}{2} \cdot x_1^2 = \frac{s''}{2} \cdot b_{all}^2 \cdot \sin^2(\omega_0 \cdot t + \phi); \quad (3.75)$$

$$\begin{aligned} E''_{tot} &= E''_{kin} + E''_{pot} = \frac{E''_{kin,max}}{2} = \frac{E''_{pot,max}}{2} = \\ &= \frac{s''}{2} \cdot b_{all}^2 = \frac{\omega_0^2 \cdot m''}{2} \cdot b_{all}^2. \end{aligned} \quad (3.76-78)$$

A súrlódó elem dx elemi kitéréséhez tartozó munka (disszipáció):

$$D''(dx) = r'' \cdot \frac{\partial x}{\partial t} \cdot dx = r'' \left(\frac{\partial x}{\partial t} \right)^2 \cdot dt. \quad (3.79)$$

Egy rezgési ciklus alatt a súrlódó elem által disszipált fajlagos energia a súrlódási munkával lesz egyenlő:

$$D'' = r'' \cdot b_{all}^2 \cdot \omega \cdot \int_0^{2\pi} \cos^2(\omega \cdot t + \phi) d(\omega t) = r'' \cdot b_{all}^2 \cdot \omega_0 \cdot \pi. \quad (3.80)$$

Rezonanciafrekvencián a Ψ csillapítási tényező egyenlő lesz az egy rezgési periódus alatti fajlagos disszipációja és a rendszer összes (mozgási és helyzeti) fajlagos energiájával. Az η veszteségi tényező pedig az egy radián alatti fajlagos disszipációnak és a rendszer összes fajlagos energiájának aránya:

$$\Psi = \frac{D''}{E''_{tot}} = \frac{4 \cdot \pi \cdot \delta}{\omega_0}; \quad (3.81)$$

$$\eta = \frac{D''}{2 \cdot \pi \cdot E''_{tot}} = \frac{2 \cdot \delta}{\omega_0}. \quad (3.82)$$

A lecsengési folyamat burkológörbéje effektívérték-mérő eszközzel közvetlenül is követhető. A lecsengési folyamat függvényét normalizálva a kezdeti értékre elvileg bármely arány jellemző lehet a rendszer csillapítására. Ez az arány a kialakult gyakorlat szerint 10^{-6} , ami logaritmikus egységben 60 dB szintcsökkenésnek felel meg:

$$\left(\frac{k_{lecs1}(t)}{X10} \right)^2 = e^{-2 \cdot \delta \cdot T_{60}} = 10^{-6}. \quad (3.83)$$

A 60 dB szintcsökkenéshez tartozó időt lecsengési vagy utözengési időnek (T_{rev}) nevezik, értéke a rendszer δ tényezőjével kifejezve:

$$T_{rev} = \frac{6,908}{\delta}. \quad (3.84)$$

Az eddig vizsgált modellben a súrlódás viszkózus jellegű volt. A rugalmas deformációra azonban a valóságot jobban közelítő, a szemlélet szerint jobban magyarázható modell is van, ez a relaxációs modell. További összehasonlítás adódik akkor, ha az η veszteségi tényező értéke lesz állandó.

A dinamikus viselkedésben lényeges eltérések nem keletkeznek, hiszen ekkor a sajátfrekvencia környezetének veszteségei vagy relaxációs mechanizmusa határozza meg a tranziens folyamatok sebességét. Az állandósult állapot frekvenciafüggvényei – például bemeneti impedancia vagy átviteli függvény – minőségileg egymáshoz közeli jellegzetességet mutatnak, azonban a részletekben eltérések figyelhetők meg. Ezt az átviteli függvények és a bemeneti impedancia frekvenciafüggvényeinek összehasonlításán lehet szemléltetni (l. a 3.10. és 3.13. ábrát). Ha a veszteségi mechanizmusokat jellemző súrlódás értéke kicsi, akkor a három modell sem a rezonanciafrekvencia alatt, sem pedig felette a vizsgált tartományban nem mutat lényeges eltérést. Ha azonban a súrlódás nagyobb értékű, akkor a rezonanciafrekvencia felett értékelhető mértékű eltérések keletkeznek.

A vizsgált rendszer mind állandósult – hosszú ideje változatlan gerjesztés hatására kialakuló – állapotban, mind pedig tranziens állapotban – gerjesztés bekapcsolása vagy kikapcsolása – mutatott viselkedése a rendszer paramétereivel szoros kapcsolatban áll. A jelenségeket mindkét esetben a frekvencia függvényében kell elemezni. A rendszer frekvenciafüggő viselkedésének kiindulópontja a sajátfrekvenciák – rezonanciafrekvenciák – meghatározása. A sajátfrekvenciák azok a frekvenciák, amelyeken a veszteség nélküli rendszer rezgőmozgást végezne, miután egyszer valamilyen külső gerjesztés azt rezgésbe hozta.

Az f_0 sajátfrekvencia értéke az elosztott paraméterű rendszerre:

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{s''}{m''}} \quad (3.85)$$

A modellel szemléletes magyarázat adható az akusztikai szigetelés, jelen esetben a rezgésszigetelés értelmezésére (l. a 3.7. és 3.11. ábrát). A rendszer szigetelésére pl. az f_a/f_m , ill. a p_a/p_m arány a jellemző, amelyben az a index a rendszer többi eleméhez képest nagy tömegű, merev alapra ható erőre vagy nyomásra utal. A szigetelés akkor jó, ha az alapra ható erő/nyomás kisebb, mint a gerjesztő erő/nyomás, tehát az előbbi két hányados kis számértékű. Az erő- és nyomásarányokat átviteli függvénynek nevezik, jele atv .

A számított eredmények a bemeneti impedancia abszolút értéke, $|z_{be}|$ (l. a 3.9. ábrát), a tömegelem rezgés kitérésének abszolút értéke (l. a 3.11. ábrát), valamint az erő- vagy nyomásátviteli függvény abszolút értéke (l. a 3.12. ábrát), amely jellemzők az állandósult állapotot tükrözik a viszkózus súrlódás modell felhasználásával. Az 1. index a kis súrlódású, a 2. index a nagy súrlódású elemet jelöli. A vízszintes tengelyen a gerjesztési és a rezonancia-kör-

frekvencia hányadosa, a függőleges tengelyen a vizsgált mennyiség abszolút értéke látható. Mindkét tengely logaritmikus léptékű. A grafikonokat elemezve a következők állapíthatók meg:

- az adott rendszer bemeneti impedanciája a rezonanciafrekvencia alatt rugó jellegű, felette tömeg jellegű; környezetében pedig meghatározó a súrlódás, minél kisebb a súrlódás értéke, annál élesebb impedanciacsökkenés figyelhető meg a rezonanciafrekvencián;
- az amplitúdó a gerjesztés nagysága mellett legértelmesebben a gerjesztés frekvenciájának és a rendszer sajátfrekvenciájának kölcsönös helyzetétől függ: minél közelebb van a kettő egymáshoz, annál nagyobb a rezgés amplitúdója;
- a rezgés amplitúdóját a veszteség befolyásolja, a rezonanciafrekvencia környezetében minél nagyobb a rendszer belső vesztesége, annál kisebb az amplitúdó;
- az adott rendszer a rezonanciafrekvencia alatt nem szigetel, hiszen az átviteli függvény értéke 1, tehát a külső erő és az alapra ható erő azonos nagyságú;
- a rezonanciafrekvencia felett legalább kétszeres relatív frekvenciától a rendszer növekvő mértékben szigetel, hiszen az átviteli függvény csökken;
- a rezonanciafrekvencia környezetében a súrlódás szerepe meghatározó;
- a rezonanciafrekvencia környezetében az alapra ható erő vagy nyomás nagyobb is lehet, mint a külső erő vagy nyomás;
- a rezonanciafrekvencia környezetében azon frekvenciák közötti különbséget, amelyeken a normalizált rezgés kitérés négyzete 0,5 értéket vesz fel, fél teljesítmény-sávszélességnek nevezik, mert a kitérés négyzete arányos a rendszer energiájával, ill. az egy rezgési ciklushoz tartozó teljesítménnyel; minél kisebb a belső súrlódás, tehát minél kisebb a rendszer vesztesége, annál keskenyebb lesz a fél teljesítmény-sávszélesség is.

A vizsgált bekapcsolási és kikapcsolási tranziens jelenség, amelyek a 3.14. és 3.15. ábrán figyelhetők meg konkrét számértékekkel végzett számítás alapján, a következő általános sajátosságokat mutatja:

- a bekapcsolás után kialakuló állandósult állapotban, jele $xb_{all}(t)$, a gerjesztés határozza meg a kitérés időfüggvényét; az $xb_r(t)$ bekapcsolási tranziens exponenciálisan csillapodó amplitúdójú szinuszos rezgés; az $xb(t)$ eredő rezgés e két komponens összege;

- az állandósult állapot amplitúdóját a gerjesztési és a sajátfrekvencia különbsége is befolyásolja, minél közelebb esik a gerjesztés frekvenciája a rendszer sajátfrekvenciájához, annál nagyobb lesz a kitérés amplitúdója;
- az állandósult állapot amplitúdóját a rendszer sűrűdése is befolyásolja, minél nagyobb a sűrűdés, annál kisebb lesz az amplitúdó;
- a tranziens állapot rezgési körfrekvenciája mind a bekapcsolás, mind a kikapcsolás során a rendszer veszteséges ω_v saját-körfrekvenciája lesz [l. a (3.67) összefüggést];
- az $x_k(t)$ kikapcsolási tranziens két exponenciálisan csökkenő amplitúdójú szinuszos rezgés összege; a 3.15. ábrán a két exponenciálisan csökkenő burkológörbe, $xk_1(t)$ és $xk_2(t)$, valamint az eredő időfüggvény látható;
- a lecsengés meredeksége, azaz a csillapodó amplitúdójú szinuszos rezgés burkológörbéje a veszteséget kifejező δ tényező határozza meg; minél nagyobb a sűrűdés, annál gyorsabb lesz a lecsengési folyamat; ez mind a bekapcsolási tranziens jelenségen, mind a kikapcsolás során megfigyelhető;
- az exponenciális amplitúdócsökkenés energiaátalakulás következménye: a sűrűdő elemen a rendszer mozgási energiája hővé alakul.

A példaként vizsgált egyszerű rendszer belső vesztesége mind a tranziens, mind az állandósult állapot szempontjából fontos, lényegesen befolyásolja az elérhető szigetelés mértékét is. A belső sűrűdés jellemzésére többféle mennyiség alkalmazható, pl. a b fél teljesítmény-sáv szélesség [l. a (3.73) összefüggést], η a veszteségi tényező [l. a (3.82) összefüggést], vagy a δ tényező, amelyet a (3.59) összefüggés határoz meg, és amelyek a mérhető tulajdonságokkal lazább, szorosabb kapcsolatban vannak. E mennyiségek közül némelyiket más akusztikai feladatokban is alkalmazzák.

Az épületakusztikai gyakorlatban az állandósult állapothoz képesti 60 dB szintcsökkenéshez tartozó időt, az utózengési időt használják általánosan. A 60 dB szintcsökkenés a jel négyzetének 10^{-6} arányú csökkenését jelenti a kezdeti érték négyzetéhez képest:

$$T_{rev} = \frac{6,908}{\delta} = \frac{2,2}{\omega_0 \cdot \eta} = \frac{13,816}{b}. \quad (3.86)$$

A rugóként működő réteg viselkedését többféle modell közelíti: például a viszkózus sűrűdés, a relaxációs modell vagy az állandó veszteségi tényezőt tartalmazó modell. Az átviteli függvény abszo-

lút értékének frekvenciamenetében a három közelítés a rezonanciafrekvencia alatt és környezetében nem ad eltérő eredményt, a rezonanciafrekvencia felett azonban a minőségileg azonos, de részleteiben és számszerűen eltérő eredményre vezet.

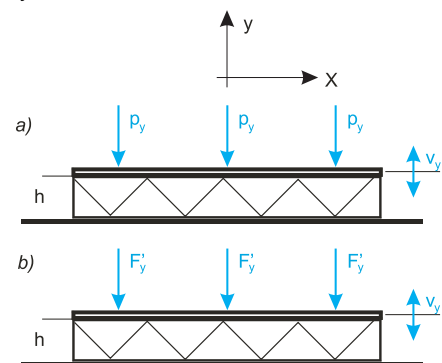
3.5. Rugalmas elválasztólemezek dinamikai merevségei és impedanciái

Szerkezeti kapcsolatokban lemez vagy rúd jellegű elemek között a hangszigetelés fokozására gyakran előnyösen alkalmazhatók rugalmas lemezek vagy sávok. Viselkedésük szemléletesen nyomonkövethető a deformációkhoz illeszkedő impedanciák segítségével, amelyek meghatározásához ismerni kell a lemezek, sávok dinamikai merevségét. Ezért néhány gyakrabban előforduló szigetelési megoldáshoz áttekintjük az egyes dinamikairevesség- és impedanciaértékeket.

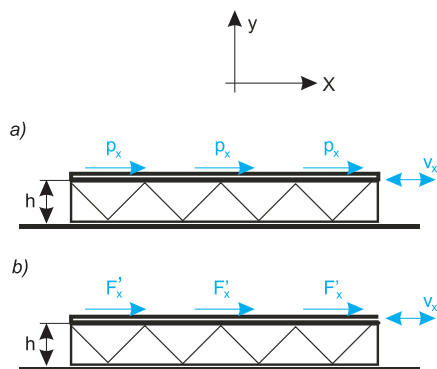
Nagy kiterjedésű rugalmas lemezre terhelésként, teherelosztó rétegen keresztül nyomó igénybevétel hat, a szintén nyomóirányú rezgésterhelés ehhez adódik hozzá. Az elrendezés vázlata a 3.17a ábrán látható. A relaxációs modellt alkalmazva a rendszer specifikus z''_{nyo} bemeneti impedanciája a teherelosztó rétegre ható p_y nyomás és a keletkező, y irányú v_y rezgéssebesség hányadosa lesz. A 3.17b ábrán ugyanez a lemez sávként elhelyezve szerepel, szélessége d , másik irányú kiterjedése a többi méretnél és a hullámhossznál sokkal nagyobb. Ekkor a specifikus z'_{nyo} bemeneti impedancia a teherelosztó rétegre egységnyi hosszra ható F'_y erő és a rezgéssebesség hányadosa:

$$z''_{nyo} = \frac{p_y}{v_y} = \frac{E}{i \cdot \omega \cdot h} + \frac{E \cdot \eta_E}{h \cdot \omega}; \quad (3.87-88)$$

$$z'_{nyo} = \frac{F'_y}{v_y} = \frac{E \cdot d}{i \cdot \omega \cdot h} + \frac{E \cdot d \cdot \eta_E}{h \cdot \omega}. \quad (3.89-90)$$



3.17. ábra. Vázlat nyomott rugó specifikus impedanciáinak meghatározásához



3.18. ábra. Vázlat nyírt rugó specifikus impedanciáinak meghatározásához

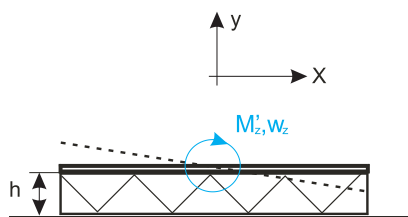
Nagy kiterjedésű, rugalmas lemezre terhelésként teherelosztó rétegen keresztül állandó nyomó igénybevétel hat, a nyíróirányú rezgésterhelés erre mérőleges. Az elrendezés vázlata a 3.18a ábrán látható. A relaxációs modellt alkalmazva a rendszer specifikus z''_{ny} bemeneti impedanciája a teherelosztó rétegre ható p_x nyomás és a keletkező, x irányú v_x rezgéssebesség hányadosa lesz. A 3.18b ábrán ugyanez a lemez sávként elhelyezve szerepel, szélessége d , ekkor a specifikus z'_{nyi} bemeneti impedancia a teherelosztó rétegre egységnyi hosszra ható F'_x erő és a rezgéssebesség hányadosa:

$$z''_{nyi} = \frac{p_x}{v_x} = \frac{G}{i \cdot \omega \cdot h} + \frac{G \cdot \eta_G}{h \cdot \omega}; \quad (3.91)$$

$$z'_{nyi} = \frac{F'_x}{v_x} = \frac{G \cdot d}{i \cdot \omega \cdot h} + \frac{G \cdot d \cdot \eta_G}{h \cdot \omega}. \quad (3.92)$$

A rugalmas sávok a csatlakozó épületszerkezeteket kölcsönös mozgása következtében nyomatéki rugóként is működnek, tehát a rájuk ható nyomatékrezgés hatására szögelfordulás deformációt szenvednek. Ilyen esetben a nyomatéki impedancia jellemző a rugalmas sáv viselkedésére, amely az egységnyi hosszúságúságra ható M' fajlagos nyomaték és a keletkező w szögsebesség hányadosa (3.19. ábra):

$$z'_M = \frac{M'}{w} = \frac{E \cdot d^3}{i \cdot \omega \cdot 12 \cdot h} + \frac{E \cdot d^3 \cdot \eta_E}{\omega \cdot 12 \cdot h}. \quad (3.93)$$



3.19. ábra. Vázlat nyomatéki rugó specifikus impedanciáinak meghatározásához

3.6. Hullámformák kialakulása

A testhang, vagyis a szerkezetekben keletkező, a hallható hangok frekvenciatartományába eső rezgés frekvenciája mindig megegyezik a létrehozó gerjesztés frekvenciájával. Ha a közeg egy vagy több irányban kiterjedt, akkor ezen irányokban a rezgési állapot térben és időben tovaterjed, és kialakul a hullámterjedés jelensége. A koncentrált paraméterű közelítés, amelyre a 3.4. alfejezet mutatott példát, lényegében határeset, ahol a közeg méretei sokkal kisebbek, mint a lehetséges hullámhosszak. A külső hatások többféle deformációt eredményeznek a rugalmas, rezgésre képes közegben, tehát a hullámterjedés ezeknek a deformációknak a terjedése. A különböző rezgés-, deformáció-fajtákhoz különböző hullámhosszak tartoznak, amelyek a közeg jellemzőitől és a hullám fajtájától függenek.

A legfontosabb hullámformákat és a betűjeleiket a 3.3. táblázat foglalja össze.

3.3. táblázat. Hullámformák rugalmas közegben

A hullám fajtája	Jele
Longitudinális	L
Hajlító	B
Nyíró	S
Torziós	T

Az egyes hullámterjedésekhez tartozó deformációk, ill. a rugalmas közegben ébredő feszültségek között a veszteségek, ill. a relaxációs mechanizmus miatt fáziseltérés van, amit az egyszerűség kedvéért a komplex mennyiségek alkalmazásával célszerű leírni. A komplex mennyiségek mind a nagyságokat, mind a fázisokat kifejezik. A komplex mennyiségeket nem jelzi külön index.

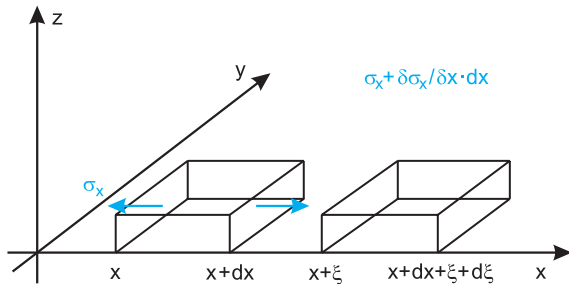
A szakirodalom általánosan alkalmazza a mechanikai impedancia fogalmát, és ehhez nagyon sok szemléletes magyarázat, a tervezést általánosan segítő megfontolás kapcsolódik. Ezért a jelenségek leírása ezekhez illeszkedik. Emellett azonban – különösen az igényes hangszigetelési megoldások kidolgozása során – nagyon fontos a térbeli elképzelés is, vagyis hogy az egyes hullámfajtákhoz milyen deformációk tartoznak.

3.7. Longitudinális hullám [IV.2], [IV.8]

A szilárd és a rugalmas közegek elemi részei a külső hatás – rezgésgerjesztés – következtében létrejövő térfogatváltozással szemben ellenállást fejte-

nek ki, azaz az elemi cellákban a külső hatással szemben feszültség keletkezik.

A longitudinális hullám olyan szilárd és rugalmas közegben terjedő hullám, amelyben az elemi cellák rezgésének iránya alapvetően párhuzamos az elemi cellák között ébredő feszültség irányával. Az elemi cellákra nyomó-húzó igénybevétel hat, ezért az elemi cellákban nyomó-húzó feszültség ébred. Alapesetben a húzó-nyomó feszültség iránya megegyezik a rezgésállapot terjedésének, tehát a hullám terjedésének irányával. A longitudinális hullámterjedés legegyszerűbb formáját a 3.20. ábra szemlélteti. Az elemi cella méretei a három koordinátáirányban dx , dy , dz , az x helyen ébredő feszültség x irányban σ_x . Az elemi cella rezgés kitérése az x irányban ξ .



3.20. ábra. Szerkezeti modell longitudinális hullámterjedés leírásához

A longitudinális hullámegyenlet felírása a léghangterjedés hullámegyenletéhez hasonlóan részben a jelenség dinamikai felírásán, részben a rugalmas deformáció felírásán alapul. A jelenség dinamikai leírása Newton II. törvényének alkalmazását jelenti a (3.94) egyenlet szerint, amelynek rendezett alakja (3.95), figyelembe véve azt is, hogy a rezgéssebesség sokkal kisebb, mint a hullám terjedési sebessége. Az rugalmas közeg homogén így sűrűsége, ρ állandó. A hullámterjedést az áttekinthetőség érdekében egydimenziós, x irányú terjedésként fejezik ki a következő egyenletek.

$$\left(\sigma_x + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} dx \right) \cdot dy \cdot dz - \sigma_x \cdot dy \cdot dz = \rho \cdot dx \cdot dy \cdot dz \cdot \frac{dv_x}{dt}; \quad (3.94)$$

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} = \rho \cdot \frac{dv_x}{dt} = \rho \cdot \frac{\partial v_x}{\partial t}. \quad (3.95)$$

A σ_x x irányú feszültség a Hook-törvénynek megfelelően egyenesen arányos az x irányú relatív méretváltozással, ε_x -szel, az arányossági tényező D , amelyet longitudinális modulusnak is neveznek. Anyagjellemző, de értéke attól is függ, hogy az y és z irányban milyen mozgásokat enged meg a kiválasztott modell. Általánosságban komplex, kifejezve a relatív méretváltozás és a feszültség közötti fáziseltérést is. Értelemszerűen a feszültség és a relatív méretváltozás is komplex lehet:

$$\sigma_x = D \cdot \varepsilon_x. \quad (3.96)$$

A relatív méretváltozás értelmezését és kapcsolatát a rezgés kitéréssel a következő egyenlet fejezi ki:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial \xi}{\partial x}. \quad (3.97)$$

A (3.94)–(3.97) egyenletek megoldása a (3.98) hullámegyenletre vezet. c_{L0} a hullám terjedési sebessége, amely a közeg jellemzőitől függ, a (3.99) összefüggésnek megfelelően. A (3.98) egyenlet az x irányú rezgéssebességre és a szintén x irányú feszültségre adja meg a hullámegyenletet, amely mindkét változóra azonos alakú:

$$\frac{\partial^2 (v_x, \sigma_x)}{\partial x^2} = \frac{1}{c_{L0}} \cdot \frac{\partial^2 (v_x, \sigma_x)}{\partial t^2}; \quad (3.98)$$

$$c_{L0} = \sqrt{\frac{D}{\rho}}. \quad (3.99)$$

A hullámegyenlet megoldása a terjedésre jellemző függvény, amely mind a rezgéssebességre, mind a feszültség rezgésre a (3.100) szerint írható fel komplex formában, ha a gerjesztés szinuszos, körfrekvenciája ω . A képletben F_1 a feszültség, vagy a rezgéssebesség amplitúdója, k_L a hullámszám a (3.101) képletnek megfelelően. A veszteségek miatt mind a hullámszám, mind a terjedési sebesség komplex:

$$F(t) = F_1 \cdot e^{i(\omega t \pm k_L \cdot x)}; \quad (3.100)$$

$$k_L = \frac{\omega}{c_{L0}}. \quad (3.101)$$

A (3.100) összefüggéssel felírt hullámterjedés valós része lesz a mérhető jel a hely és az idő függvényében. Tekintettel arra, hogy D komplex, a terjedés helyfüggése egy a hullámhossz szerint periodikus tagot és egy exponenciálisan csillapodó tagot tartalmaz, a mérhető jel a kettő szorzata lesz. Az exponenciálisan csillapodó tag az amplitúdó csökkenését fejezi ki a hely, tehát jelen esetben x függvényében. A helyfüggést kifejező rész előtt a $+$ előjel a $-x$, a $-$ előjel a $+x$ irányú hullámterjedést jelenti.

Általában egy elemi cella x irányú méretváltozásához az y és z irányban ellentétes értelmű, és sokkal kisebb relatív méretváltozás tartozik. Hasonlóképpen az elemi cellában nemcsak x irányú, hanem y és z irányú feszültség ébred. Így a Hook-törvény általános alakját a három koordinátáirányban a (3.102)–(3.104) összefüggések mutatják be, szintén homogén belső szerkezetű anyagra, tehát olyan anyagra, amelyben a sűrűség, ρ és az E dinamikai rugalmassági modulus, állandó és irányfüggetlen. μ a Poisson-szám a y és z irányú relatív méretváltozást fejezi ki az x irányú méretváltozás függvényében:

$$E \cdot \varepsilon_x = \sigma_x - \mu \cdot (\sigma_y + \sigma_z); \quad (3.102)$$

$$E \cdot \varepsilon_y = \sigma_y - \mu \cdot (\sigma_x + \sigma_z); \quad (3.103)$$

$$E \cdot \varepsilon_z = \sigma_z - \mu \cdot (\sigma_x + \sigma_y). \quad (3.104)$$

Az x irányú rúdiban terjedő longitudinális hullám esetén az y és z irányú feszültség 0, az y és z irányú relatív méretváltozások között a következő összefüggés fejezi ki a kapcsolatot:

$$\varepsilon_y = \varepsilon_z = -\mu \cdot \varepsilon_x. \quad (3.105)$$

A fentiek figyelembevételével a (3.99)-ben és (3.101)-ban szereplő D és c_{L0} értéke a következő lesz:

$$D = E; \quad (3.106)$$

$$c_{LI} = \sqrt{\frac{E}{\rho}}. \quad (3.107)$$

A rúdban ébredő x irányú nyomóerő értelemszerűen az x irányú feszültség és a rúd keresztmetszetének szorzata:

$$F_x = -\sigma_x \cdot S. \quad (3.108)$$

A nyomóerő és az x irányú rezgésebbesség hányadosa állandó, csak a közegtől függ. Ez a karakterisztikus hullámimpedancia, egyúttal a végtelen hosszú rúd bemeneti impedanciája amely egy lehetséges felírási formában az egységnyi hosszúságú rúd m' tömegétől és a terjedési sebességtől függ:

$$z_{L0} = \frac{F_x}{v_x} = m' \cdot c_{LI} = S \cdot \sqrt{\rho \cdot E}. \quad (3.109)$$

A fajlagos karakterisztikus hullámimpedancia egységnyi felületű rúd karakterisztikus hullámimpedanciája, a felületre ható nyomás és a rezgésebbesség hányadosa:

$$z'_{L0} = \sqrt{\rho \cdot E} = \rho \cdot c_{LI}. \quad (3.110)$$

Mint minden hullámterjedés, a longitudinális hullám terjedése is teljesítményt szállít. Az egységnyi felületen áthaladó teljesítményt, azaz az intenzitást, jele $I_L(t, x)$, mértékegysége Watt/m^2 a (3.111) képlet mutatja. A teljesítményterjedés is hullámterjedés jellegű, nagysága helyfüggő, periodikus, de a periódustávolság fele a sebesség- és feszültség-hullámnak. A valós szállított teljesítmény a (3.111) összefüggés valós része lesz. Az időátlag a rezgésebbesség effektív értéke segítségével fejezhető ki:

$$I_L(t, x) = v_x \cdot \frac{F_x^*}{S} = -v_x \cdot \sigma_x^* = z'_{L0} \cdot \left| \frac{v_0 \cdot e^{i(\omega t - k_L \cdot x)}}{2} \right|^2; \quad (3.111)$$

$$I_L(x) = z'_{L0} \cdot v_{Leff}^2(x). \quad (3.112)$$

Az x - y síkban elhelyezkedő, a hullámhosszhoz képest vékony lemezben az y irányú relatív méretváltozás és a z irányú feszültség 0, ezért a (3.102)–(3.107) egyenletek módosulnak. A D arányossági tényező és a terjedési sebesség értékét a következő egyenletek fejezik ki:

$$D = \frac{E}{1 - \mu^2}; \quad (3.113)$$

$$c_{LI} = \sqrt{\frac{E}{\rho \cdot (1 - \mu^2)}}. \quad (3.114)$$

A hullámegyenlet általános alakja a következők szerint alakul, ha a terjedési iránya általános:

$$\text{grad div} v_L = \frac{1}{c_{LI}^2} \cdot \frac{\partial^2 v_L}{\partial t^2}. \quad (3.115)$$

Az x és y irányban kiterjedt közeg miatt a rúdban ébredő F'_x fajlagos erőt lehet meghatározni, amely egységnyi lemez-szélességre ható erő. x irányú hullámterjedés esetén ez az y irányban jelenti az egységnyi szélességet. A (3.108) összefüggés értelemszerűen módosul, h a lemezvastagság.

$$F'_x = -\sigma_x \cdot h. \quad (3.116)$$

A fajlagos nyomóerő és a rezgésebbesség hányadosa ez esetben is állandó, a végtelen kiterjedésű közeg fajlagos bemeneti

impedanciája, azaz a fajlagos karakterisztikus hullámimpedancia. Értéke a lemez fajlagos tömegétől és a longitudinális hullám terjedési sebességétől függ, amint azt (3.117) összefüggés bemutatja:

$$z'_{L0} = \frac{F'_x}{v_x} = m'' \cdot c_{LI}. \quad (3.117)$$

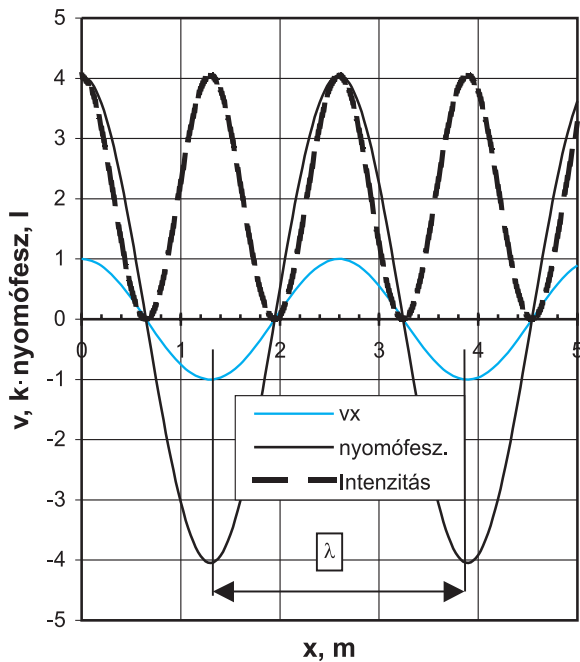
A hullám által szállított teljesítmény jellemzésére lemezek esetében az egységnyi szélességű sávon áthaladó teljesítmény, a fajlagos teljesítmény, $W'_L(x, t)$, határozható meg, amelyet a (3.118) összefüggés definiál:

$$W'(x, t)_L = v_x \cdot F'_x. \quad (3.118)$$

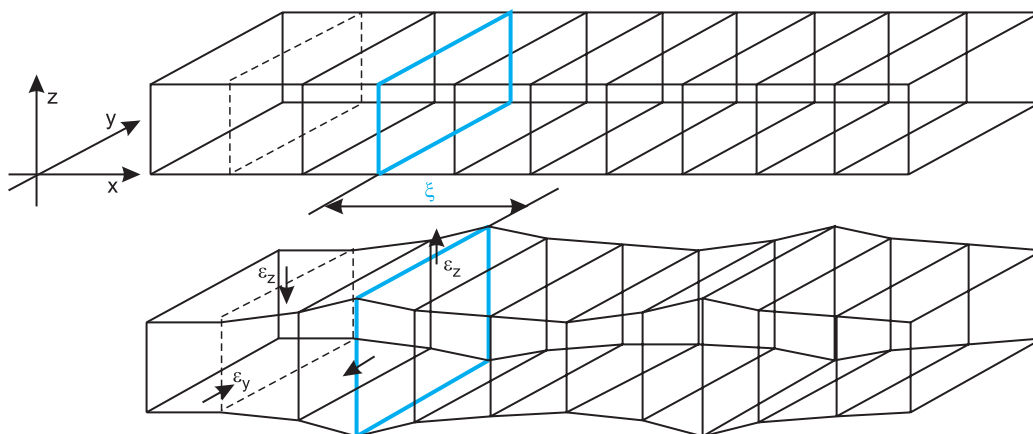
A fajlagos teljesítmény minőségileg azonos tulajdonságokkal rendelkezik, mint a rudakra meghatározott intenzitás. Időbeli átlagértéke, $W'(x)$ ismét a rezgésebbesség effektív értékével fejezhető ki:

$$W'(x) = z'_{L0} \cdot v_{Leff}^2. \quad (3.119)$$

A longitudinális hullámterjedés terjedési sebessége a közeg anyagjellemzőitől (ρ sűrűség és E dinamikai rugalmassági modulus), valamint a μ Poisson-számtól függ. Ez utóbbi a terjedés irányára merőleges irány relatív méretváltozásának és a terjedés irányú méretváltozásnak az aránya. A hullám terjedési sebességét rúd jellegű közegre a (3.107), lemez jellegű közegre a (3.114) összefüggés fejezi ki. A longitudinális hullám hullámegyenlete másodrendű differenciálegyenlet, a hullámterjedést két változóval, a terjedés irányával párhuzamos rezgésebbességgel és a nyomófeszültséggel lehet leírni. A közöttük levő fáziseltérés az anyag veszteségei



3.21. ábra. Rezgésebbesség, nyomófeszültség és intenzitás longitudinális hullámterjedés során



3.22. ábra. Hossz- és keresztirányú méretváltozás rudakban, longitudinális hullámterjedés esetén
A felső ábra nyugalmi helyzet; alsó ábra hullámterjedés +x irányban; ξ rezgéskitérés; ε_y , ε_z relatív méretváltozások iránya

miatt alakul ki. A hullám teljesítményt szállít, amely a hullámhossz felének megfelelően periodikus a hely függvényében.

Mindezeket a 3.21. ábra szemlélteti.

Hullámterjedés esetén a rudakban mindkét terjedési irányra merőleges irányban, lemezekben a vastagsági irányban méretváltozás történik. Ennek mértékét a Poisson-szám fejezi ki. A jelenséget rudak esetére a 3.22. ábra mutatja. Megfigyelhető, hogy az elemi cellák besűrűsödése által jelzett x irányú rezgéskitérés minimumhelyén a cellák relatív méretváltozása az y és z tengely irányában kifelé, növekvő irányba mutat. Ahol az elemi cellák ritkábbak, tehát ahol az x irányú rezgéskitérés a legnagyobb, ott az y és z irányú relatív méretváltozás csökkenő jellegű.

3.8. Nyíróhullám [IV.2], [IV.8]

A szilárd és rugalmas közegek elemi részei nemcsak a térfogatváltozásnak, hanem a formaváltozásnak is ellenállnak. Ennek a „képességnek” az a magyarázata, hogy az elemi cellák nemcsak a határfelületekre merőleges, tehát húzó-nyomó igénybevétel

tellet, hanem a határfelületekkel párhuzamos, tehát nyíró igénybevételt is fel tudják venni.

A nyíróhullám olyan deformáció terjedése a szilárd és rugalmas közegben, ahol az elemi részek rezgéskitérése merőleges a terjedési irányra. Az elemi cellák a terjedési irányra merőlegesen ható feszültség hatására a lemez síkjában nyíródeformációt szenvednek (3.23. ábra).

A 3.23. ábra egy elemi cella deformációját és a cellára ható feszültségeket mutatja be. Az ábra h vastagságú lemez felülről nézve, a lemez ρ sűrűsége és fajlagos m'' tömege állandó. A terjedési irány a $+x$ tengely, a kiinduló nyírófeszültség az erre merőleges τ_{xy} . Az elemi cella mérete dx, dy . A terjedési irányában az elemi cella másik oldalán az $x + dx$ helyen a nyírófeszültség eltérő lesz a következő összefüggés szerint (lineáris közelítés):

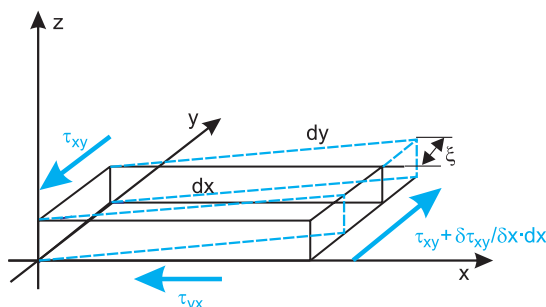
$$\tau_{xy}(x + dx) = \tau_{xy}(x) + \frac{\partial \tau_{xy}(x)}{\partial x} \cdot dx. \quad (3.120)$$

A nyíródeformáció tehát a lemez síkjában megy végbe. A nyugalmi állapotban egymásra merőleges élek mentén ható feszültségeknek egyenlőknek kell lennie a nyomatékok egyenlősége miatt. Ha ez a feltétel nem teljesülne, akkor az elemi cella el is fordulna. Az elemi cella szögdeformációja γ , a szögdeformáció miatt keletkező, a terjedési irányra merőleges kitérés pedig ξ . A kis jelű, lineáris közelítés miatt a Hook-törvény a szögelfordulás és a nyírófeszültség között teremt a (3.121) összefüggés által bemutatott kapcsolatot. A G arányossági tényező a nyírási modulus, mértékegysége N/m^2 . A kitérés és a szögelfordulás közötti összefüggést a (3.122) egyenlet mutatja be. Az y irányú kitérés helyett a sebesség is kifejezhető, l. a (3.123) egyenletet:

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = G \cdot \gamma; \quad (3.121)$$

$$\gamma = \frac{\partial \xi}{\partial x}; \quad (3.122)$$

$$v_y = \frac{\partial \xi}{\partial t}. \quad (3.123)$$



3.23. ábra. Deformáció nyíró igénybevétel esetén

A Hook-törvényből kiindulva a hullámegyenlet felírásához szükséges egyensúlyi egyenlet alakja a következő:

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial t} = G \cdot \frac{\partial v_y}{\partial x}. \quad (3.124)$$

Newton II. törvényén alapul a hullámegyenlethez szükséges második egyenlet:

$$\left(\tau_y + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} \cdot dx \right) \cdot h \cdot dy - \tau_{xy} \cdot h \cdot dy = \rho \cdot h \cdot dx \cdot dy \cdot \frac{\partial v_y}{\partial t}. \quad (3.125)$$

Egyenletrendezés, a másodrendűen kicsiny elemek elhagyása után a Newton II. törvényén alapuló egyenlet a következő lesz:

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} = \rho \cdot \frac{\partial v_y}{\partial t} = \frac{m''}{h} \cdot \frac{\partial v_y}{\partial t}. \quad (3.126)$$

A (3.124) és (3.126) egyenletekből keletkezik a hullámegyenlet, a (3.127) szerint azonos alakban az y irányú sebességre, vagy az xy irányú nyírófeszültségre:

$$\frac{\partial^2 (\tau_{xy}, v_y)}{\partial x^2} = \frac{1}{c_s^2} \cdot \frac{\partial^2 (\tau_{xy}, v_y)}{\partial t^2}. \quad (3.127)$$

A hullámegyenlet általános megoldása a $\pm$ irányba terjedő nyíróhullám, terjedési sebessége c_s , a hullámterjedés mind a nyírófeszültségre, mind az y irányú rezgésebbességre felírható, a k_s hullámszám, a veszteségek miatt komplex. A helyfüggés előjele $+x$ irányú terjedés esetén negatív:

$$v_y(x, t) = v_0 \cdot e^{i(\omega t \pm k_s \cdot x)}; \quad (3.128)$$

$$c_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}. \quad (3.129)$$

A fajlagos, tehát egységnyi széles sávra ható nyíróerő y irányú, tehát szintén merőleges a terjedési irányra, nagysága:

$$Q'_y = - \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \tau_{xy} dz = -\tau_{xy} \cdot h. \quad (3.130)$$

A fajlagos nyíróerő és a rezgésebbesség hányadosa ez esetben is állandó, a végtelen kiterjedésű közeg fajlagos bemeneti impedanciája, azaz a fajlagos karakterisztikus hullámimpedancia. Értéke a lemez fajlagos tömegétől és a longitudinális hullám terjedési sebességétől függ:

$$z'_{s0} = \frac{Q'_y}{v_y} = m'' \cdot c_s. \quad (3.131)$$

A hullám által szállított teljesítmény jellemzésére végtelen kiterjedésű lemezek esetében az egységnyi szélességű sávon áthaladó teljesítmény, a fajlagos $W'(x, t)$ teljesítmény határozható meg, amelyet a következő összefüggés definiál. Tulajdonságai, tehát hely- és időfüggése azonos a longitudinális hullám által szállított fajlagos teljesítmény megismert tulajdonságaival:

$$W'(x, t)_s = v_y \cdot Q_y^*. \quad (3.132)$$

Az időre átlagolt fajlagos $W'(x)$ teljesítmény szintén helyfüggő, a rezgésebbesség effektív értékével fejezhető ki:

$$W'(x) = z'_{s0} \cdot v_{yeff}^2. \quad (3.133)$$

A nyírófeszültség és az y irányú rezgésebbesség közötti fázis minőségileg megegyezik a longitudinális hullám nyomó-

feszültség és rezgésebbesség kapcsolatával. Így a hullám által szállított teljesítmény hasonló helyfüggést mutat.

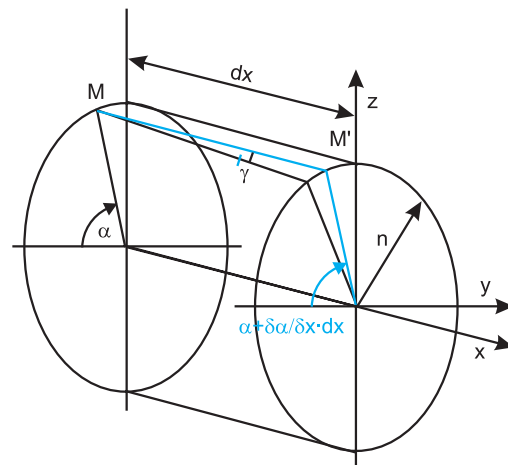
A nyíróhullám kialakulásának vizsgálatokor bevezették a nyírási modulus fogalmát. Ez azonban a korábban megismert nyomó igénybevétellel szemben mutatkozó rugalmassági modulusal függ össze. Homogén, izotróp anyagokra az összefüggést a következő képlet mutatja be:

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \mu)}. \quad (3.134)$$

Az épületakusztika jelenségeinek körében a nyíróhullám lemezek síkjában kialakuló hullámforma. Terjedési sebessége a közeg anyagjellemzőitől (ρ sűrűség és G nyírási modulus) függ. A nyíróhullám hullámegyenlete másodrendű differenciálegyenlet, a hullámterjedést két változóval, a terjedés irányára merőleges rezgésebbességgel és a nyírófeszültséggel lehet leírni. A közöttük levő fáziseltérés az anyag veszteségei miatt alakul ki. A hullám teljesítményt szállít, amely a hullámhossz felének megfelelően periodikus a hely függvényében.

3.9. Torziós hullám [IV.8]

Ha vékony, tetszőleges keresztmetszetű rudat a rúd tengelyének irányával megegyező irányú nyomaték hoz rezgésbe, a rúdban torziós hullám keletkezik. A torziós hullám a szögdeformáció, ill. a torziós nyomaték időbeli és térbeli tovaterjedése. Kör keresztmetszetű rúd egy elemi dx szakaszára a deformáció a 3.24. ábrán látható. Az x, y, z koordinátatengelyek, a terjedés iránya és egyúttal a gerjesztő nyomaték iránya x .



3.24. ábra. Torziós deformáció

x, y, z koordinátatengelyek, x a hullám terjedési iránya;
 α egy tetszőleges x helyen az M ponthoz vezető egyenes szöge;
 M' az M pontnak megfelelő pont dx távolságra a kiindulólhelyzettől,
 γ torziós deformáció

A kiindulásokban az M pont y irányú koordinátája ψ , és z irányú ζ koordinátája kis szög és lineáris közelítés alapján:

$$\psi = -\alpha \cdot z; \quad (3.135)$$

$$\zeta = \alpha \cdot y. \quad (3.136)$$

Az x és az $x + dx$ hely síkjai közötti szögelfordulás γ :

$$\gamma = r \cdot \frac{\partial \alpha}{\partial x}. \quad (3.137)$$

A nyíró igénybevételre vonatkozó Hook-törvény alkalmazható e szögelfordulásra:

$$\tau = G \cdot \gamma = G \cdot r \cdot \frac{\partial \alpha}{\partial x}. \quad (3.138)$$

Az x tengely irányú M_x torziós nyomaték a nyírófeszültségből számítható. A nyírófeszültség a sugártól függ:

$$M_x = 2 \cdot \pi \cdot \int_0^{r_k} \tau \cdot r^2 dr = 2 \cdot \pi \cdot \frac{\partial \alpha}{\partial x} \cdot \int_0^{r_k} G \cdot r^3 dr = \frac{\pi}{2} \cdot G \cdot r_k^4 \cdot \frac{\partial \alpha}{\partial x}. \quad (3.139)$$

Bevezetve a T torziós merevség fogalmát és az a szögelfordulást, az ω_x szögsebességgel helyettesítve a hullámegyenlet felírásához szükséges egyik egyenlet a következő alakban fejezhető ki:

$$\frac{\partial M_x}{\partial t} = \bar{T} \cdot \frac{\partial \omega_x}{\partial x}. \quad (3.140)$$

A másik összefüggés ismét Newton II. törvényéből származik, egységnyi rúd hosszra ható x irányú nyomaték és a keletkező szöggyorsulás közötti kapcsolatot fejezi ki. Az arányossági tényező egységnyi hosszú rúd Θ tehetetlenségi nyomatéka tömör, kör keresztmetszetű rúdra:

$$\Theta' = \frac{\pi}{2} \cdot \rho \cdot r_k^4; \quad (3.141)$$

$$\frac{\partial M_x}{\partial x} = \Theta' \cdot \frac{\partial \omega_x}{\partial t}. \quad (3.142)$$

A torziós hullám hullámegyenlete a (3.140) és (3.142) összefüggésekből alakítható ki, formálisan azonos alakú az x irányú nyomatékokra és a szintén x irányú szögsebességre. A torziós hullám terjedési sebességét a (3.144) összefüggés fejezi ki:

$$\frac{\partial^2 (M_x, \omega_x)}{\partial x^2} = \frac{1}{c_T^2} \cdot \frac{\partial^2 (M_x, \omega_x)}{\partial t^2}; \quad (3.143)$$

$$c_T = \sqrt{\frac{T}{\Theta'}}. \quad (3.144)$$

Tömör, kör keresztmetszetű rúd esetén a terjedési sebesség a nyírási nyomaték és a testsűrűség hányadosának négyzetgyökévé egyszerűsödik. a és b élhosszú, téglalap keresztmetszetű rúd fajlagos tehetetlenségi nyomatékát a (3.145) képlet adja meg. A fajlagos tehetetlenségi nyomaték szimmetrikus a és b értékeire. A torziós merevség szintén számítható, szintén szimmetrikus az élhosszakra, a 3.4. táblázatban néhány összetartozó érték szerepel példaként. A torziós hullám c_T terjedési sebességének és a nyíróhullám-terjedési sebességnek c_S aránya szintén adott a táblázatban.

$$\Theta' = \frac{\rho \cdot (a \cdot b^3 + b \cdot a^3)}{12}. \quad (3.145)$$

3.4. táblázat. A T torziós merevség és a c_T hullámterjedési sebesség tájékoztató értékei

$\frac{a}{b}$	1	1,5	2
$\frac{T}{G \cdot S^2 \cdot \frac{b}{a}}$	0,141	0,196	0,229
$\frac{c_T}{c_S}$	0,92	0,85	0,74

A torziós hullám terjedésének egyenlete formailag megegyezik a nyíró- és longitudinális hullám terjedésének egyenletével, csak a hullámszámot kell értelemszerűen behelyettesíteni.

A torziós hullám terjedési sebessége a rúdnak mint hullámvezető közegnek az anyagjellemzőitől (ρ sűrűség és G nyírási modulus) és a keresztmetszet alakjától, méreteitől függ. A rúd tengelye megegyezik a terjedési irányával. A torziós hullám hullámegyenlete másodrendű, a hullámterjedést két változóval, a terjedés irányába mutató szögsebességgel és a torziós nyomatékkal lehet leírni.

3.10. Hajlítóhullám rudakban, lemezekben [IV.2], [IV.8]

A hajlítóhullám mind a hangszigetelés gyakorlata, mind a szerkezetekben kialakuló rezgések elmélete szempontjából különleges fontosságú, és elméleti szempontból eltér a korábbi hullámfajtáktól. A jelenség részletes ismertetése előtt a főbb eltérés abban rejlik, hogy a hullámterjedést négy változó a terjedés irányára merőleges rezgésebbesség, a terjedés irányára és a kitérésre merőleges szögelfordulás és az ezekhez irányokban illeszkedő nyomaték és erő írja le. Ennek lényeges következményei vannak. Az épületszerkezetek hangszigetelése, tehát a gyakorlat oldaláról nézve kiemelkedő fontosságnak az az oka, hogy a hangsugárzás jelensége a hajlítóhullám következménye.

A lemezekben terjedő hajlítóhullám tárgyalása előtt a rudakban terjedő hajlítóhullámról lesz szó. A rudak nemcsak az egyszerűség miatt szerepelnek, hanem azért is, mert a pillérek részben olyan rúdként modellezhetők a pillér-fal, pillér-födém szerkezeti csomópont tárgyalása során, amelyben hajlítóhullám terjed.

A hajlítóhullám terjedést leíró négy változó, a rezgés kitérés (vagy sebesség), a szögsebesség, a hajlítónyomaték és a nyíróerő ciklikusan kapcsolódik egymáshoz. A kapcsolatok felírásához lényegében a Hook-törvényt, Newton II. törvényét

a hajlításra vonatkozó alapösszefüggést, valamint a kitérés és szögelfordulás közötti kapcsolatokat kell megadni. Az elemi cella az x - y - z koordináta-rendszerben helyezkedik el, a terjedés iránya $+x$, a kitérésé pedig y . Az elemi cella kitérését η , y irányú sebességét v_y , a szögelfordulást β , a szögsebességet w_z jelöli. A nyomaték M_z , a rúd hajlítási merevség pedig B . Az elemi cella koordináta-rendszerbeli helyzetét a 3.25. ábra mutatja.

$$\beta = \frac{\partial \eta}{\partial x}; \quad (3.146)$$

$$w_y = \frac{\partial v_z}{\partial x}; \quad (3.147)$$

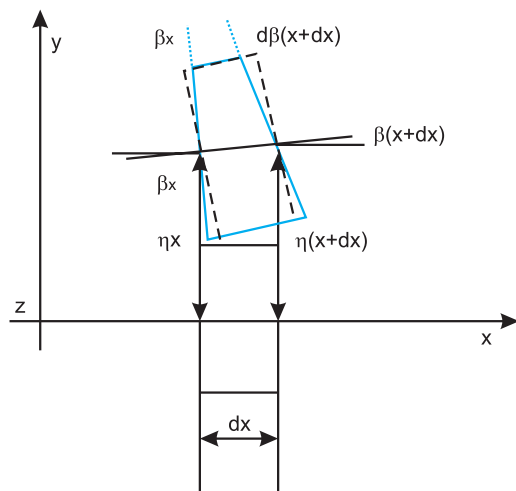
$$\frac{\partial w_y}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2}; \quad (3.148)$$

$$\frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} = -\frac{M_z}{B}. \quad (3.149)$$

A keresztmetszet deformációját, a húzó-nyomófeszültséget és a nyomatékot a 3.26. ábra szemlélteti. Az elemi cella deformációja miatti x irányú ϵ_x relatív méretváltozás egyenesen arányos a semleges szálról mérhető y távolsággal a (3.150) szerint. Szimmetrikus keresztmetszetű rudakban a semleges szál a keresztmetszet geometriai közepén helyezkedik el. Az anyag keresztmetszetében ébredő húzó-, ill. nyomófeszültség, σ_x a dinamikai rugalmassági modulussal arányos, amint azt a (3.151) összefüggés mutatja. A z irányú M_z hajlítónyomaték a feszültség és a hozzá tartozó erőkar szorzatának összegzése, azaz integrálja a teljes keresztmetszetre a (3.152) egyenletnek megfelelően. A keresztmetszeti terület tehetetlenségi nyomatéka I , mértékegysége m^4 , amit a (3.153) képletnek megfelelően kell meghatározni. A B hajlítási merevség a dinamikai rugalmassági modulus és a tehetetlenségi nyomaték szorzata:

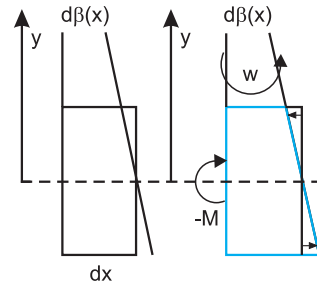
$$\epsilon_x = -y \cdot \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2}; \quad (3.150)$$

$$\sigma_x = -E \cdot y \cdot \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2}; \quad (3.151)$$



3.25. ábra. Elemi cella hajlítási deformációja

$\beta(x)$ szögelfordulás az x helyen; $\eta(x)$ kitérés az x helyen;
 $\beta(x+dx)$ szögelfordulás az $x+dx$ helyen; $\eta(x+dx)$ kitérés az $x+dx$ helyen; x a hullám terjedési iránya; y a rezgés kitérés iránya



3.26. ábra. Elemi cella relatív méretváltozása, feszültség, nyomaték

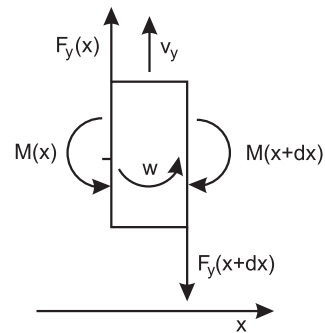
$$M_z = \int_S \sigma_x \cdot y \cdot dS = -E \cdot I \cdot \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2}; \quad (3.152)$$

$$I = \int_S y^2 dS; \quad (3.153)$$

$$B = E \cdot I. \quad (3.154)$$

A (3.152) egyenletet idő szerint differenciálva és bevezetve a w_z szögsebességet adódik:

$$\frac{\partial M_z}{\partial t} = -B \cdot \frac{\partial w_z}{\partial x}. \quad (3.155)$$



3.27. ábra. Az elemi cella egyensúlya

Az elemi cellára felírható egyensúlyi összefüggés a nyomaték és a nyíróerő közötti kapcsolat meghatározására ad lehetőséget (3.27. ábra). A (3.156) összefüggés a (3.157)-re egyszerűsíthető:

$$M_z + \left(M_z + \frac{\partial M_z}{\partial x} dx \right) - F_y dx = 0; \quad (3.156)$$

$$F_y = -\frac{\partial M_z}{\partial x}. \quad (3.157)$$

Az elemi cella mozgása leírható Newton II. törvénye alapján, amint azt a következő egyenlet mutatja. Ez a (3.159) egyenlet egyszerűsíthető, m' a rúd egységnyi hosszának tömegét jelenti:

$$F_y - \left(F_y + \frac{\partial F_y}{\partial x} dx \right) = m' \cdot dx \cdot \frac{\partial v_z}{\partial t}; \quad (3.158)$$

$$-\frac{\partial F_y}{\partial x} = m' \cdot \frac{\partial v_z}{\partial t}. \quad (3.159)$$

A (3.151), (3.155), (3.157) és (3.159) egyenletek közös megoldása hullámegyenletre vezet, amely a hajlítóhullám ter-

jedését leíró v_y rezgésebbességre, ω_z szögsebességre, M_z nyomatékra és F_y nyíróerőre azonos alakú:

$$-B \cdot \frac{\partial^4}{\partial x^4} (v_y, w_z, M_z, F_y) = m' \cdot \frac{\partial^2}{\partial t^2} (v_z, w_y, M_y, F_z). \quad (3.160)$$

Szinuszosan változó gerjesztést alkalmazva a c_B terjedési sebességre (fázissebesség) és a k_B hullámszáma a következő összefüggések adódnak:

$$c_B = \sqrt{\omega' \cdot \frac{B}{m'}}; \quad (3.161)$$

$$k_B = \frac{\omega}{c_B}. \quad (3.162)$$

A hullámegyenlet negyedfokú, összhangban azzal, hogy a hullámterjedést négy változó írja le. Ezért a terjedés általános alakja például a rezgésebbességgel kifejezve a $+$ – irányban két terjedési összetevőt tartalmaz. A négy tag eltérő amplitúdójú, az amplitúdókat a (3.163) képletben A , B , C és D jelöli:

$$v_z(x) = e^{i\omega t} (A \cdot e^{+i k_B \cdot x} + B \cdot e^{-i k_B \cdot x} + C \cdot e^{+k_B \cdot x} + D \cdot e^{-k_B \cdot x}). \quad (3.163)$$

Például a $+i k_B \cdot x$ kitevő $-x$ irányú, a hely függvényében periodikus terjedési összetevőt jelent. A $-k_B \cdot x$ kitevő $+x$ irányú terjedést fejez ki, melynek amplitúdója exponenciálisan csillapodik.

A hullámterjedési sebességet fázissebességként értelmezik. Ez azt jelenti, hogy a rezgésállapot, tehát a fázis terjed a c_B sebességgel. A (3.161) összefüggés azt mutatta, hogy a fázissebesség frekvenciafüggő: ezt a jelenséget diszperzióknak nevezik. A frekvenciafüggő terjedési sebességnek többek között az a következménye, hogy ha a gerjesztés időfüggvénye periodikus, de nem szinuszos, akkor a keletkező jelalak a terjedés során torzul.

A hajlítóhullám által szállított teljesítmény meghatározásához mind a négy, a mozgást leíró változót ismerni kell. A kölcsönös összefüggések az η rezgés kitérésből kiindulva a következők:

$$\text{– rezgésebbesség: } v_y(x, t) = \frac{\partial \eta_y(x, t)}{\partial t}; \quad (3.164)$$

$$\text{– szögsebesség: } w_z(x, t) = \frac{\partial v_y(x, t)}{\partial x}; \quad (3.165)$$

$$\text{– nyomaték: } M_z(x, t) = -B \cdot \frac{\partial^2 \eta_y(x, t)}{\partial x^2}; \quad (3.166)$$

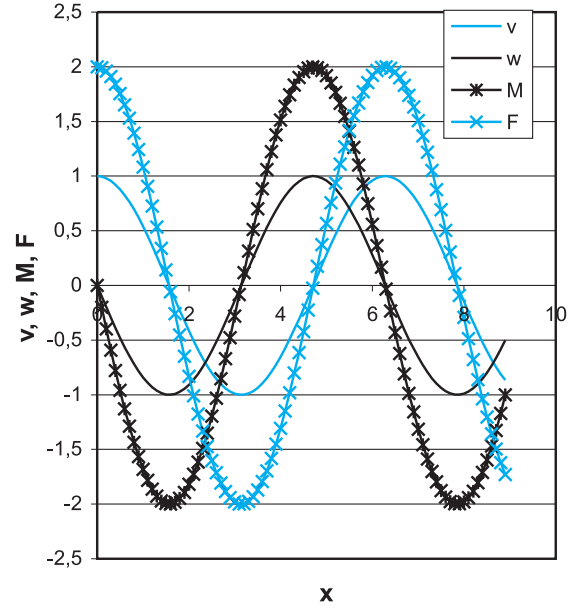
$$\text{– nyíróerő: } F_y(x, t) = -\frac{\partial M_z(x, t)}{\partial x}. \quad (3.167)$$

A karakterisztikus hullámimpedancia két értéket ad, az egyik a z_{B0} a nyíróerő és a rezgésebbesség, a másik a w_{B0} a nyomaték és a szögsebesség hányadosa. A z_{B0} -t erőimpedanciának, a w_{B0} -t nyomatéki impedanciának is nevezik:

$$z_{B0} = \frac{F_y}{v_y} = m' \cdot c_B; \quad (3.168)$$

$$w_{B0} = \frac{M_z}{w_z} = \frac{B}{c_B}. \quad (3.169)$$

A változók közül a veszteségmentes, valós megoldásokat meghatározva látható, hogy a v – f pár és a w – M pár azonos

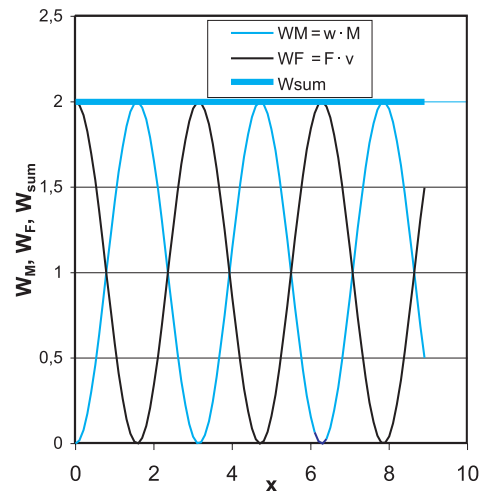


3.28. ábra. Sebesség, szögsebesség, nyomaték, nyíróerő hajlítóhullám-terjedés esetén. A jel nagyságok nem méretarányosak

fázisban van, a v – w és f – M pár között 90° fáziseltérés alakul ki (3.28. ábra). A fázisviszonyok miatt a szállított teljesítmény két részből tevődik össze a (3.170) összefüggés szerint. A két rész eredője a hely függvényében állandó teljesítményt ad. A veszteségmentes terjedéshez tartozó teljesítményviszonyokat a 3.29. ábra szemlélteti. A helyfüggésben a sebesség, szögsebesség, nyomaték és teljesítmény a λ_B szerint, a két teljesítmény-összetevő pedig $\lambda_B/2$ szerint periodikus. A hajlítóhullám által szállított összes teljesítmény azonban nem függ a helytől:

$$W_B = W_F + W_M = v \cdot F^* + w \cdot M^* = z_{B0} \cdot v^2 + w_{B0} \cdot w^2 = 2 \cdot m' \cdot c_B \cdot v^2. \quad (3.170)$$

A lemezekben terjedő hajlítóhullám az elemi cellák kétirányú hajlítódéformációjának térbeli és időbeli terjedése követ-



3.29. ábra. Rudakban terjedő hajlítóhullám teljesítményviszonyai

keztében jön létre. A lemez az xy síkban helyezkedik el, vastagsága h , testsűrűsége ρ , rugalmassági modulusa E , veszteségi tényezője η , a Poisson-szám μ . A z irányú rezgés kitérés ξ , a rezgésebesség v_z lesz. Az elrendezés vázlatát a 3.30. ábra mutatja. A részletek mellőzésével szinuszos rezgést feltételezve a homogén hullámegyenlet a (3.171), a hajlítóhullám terjedési sebessége, c_B , a (3.172), a hullámszám, k_B a (3.173), a fajlagos hajlítási merevség, B' a (3.174), a rezgésebesség, v_z a (3.175), a szögsebesség y irányú komponense, w_y a (3.176), a fajlagos nyomaték y irányú komponense, M'_y a (3.177), a fajlagos nyíróerő, F'_z a (3.178), a fajlagos karakterisztikus hullámimpedancia-erő a (3.179), és a nyomatéki része pedig a (3.180) összefüggés.

$$\frac{\partial^4 v_z(x, y)}{\partial x^4} + \frac{\partial^4 v_z(x, y)}{\partial y^4} + 2 \cdot \frac{\partial^4 v_z(x, y)}{\partial x^2 \partial y^2} - k_B^4 \cdot v_z(x, y) = 0; \quad (3.171)$$

$$c_B = \sqrt{\omega} \cdot \sqrt[4]{\frac{B'}{m''}}; \quad (3.172)$$

$$k_B = \sqrt{\omega} \cdot \sqrt[4]{\frac{m''}{B'}}; \quad (3.173)$$

$$B' = \frac{E \cdot h^3}{12 \cdot (1 - \mu^2)}; \quad (3.174)$$

$$v_z(x, y) = \frac{\partial \xi(x, y)}{\partial t}; \quad (3.175)$$

$$w_y(x, y) = \frac{\partial v_z(x, y)}{\partial y}; \quad (3.176)$$

$$M'_y = - \frac{E \cdot h^3}{i \cdot \omega \cdot 12 \cdot (1 - \mu^2)} \cdot \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \mu \cdot \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} \right); \quad (3.177)$$

$$F'_z = \frac{E \cdot h^3}{i \cdot \omega \cdot 12 \cdot (1 - \mu^2)} \cdot \left(\frac{\partial^3 v_z}{\partial x^3} + (2 - \mu) \cdot \frac{\partial^3 v_z}{\partial x \partial y^2} \right); \quad (3.178)$$

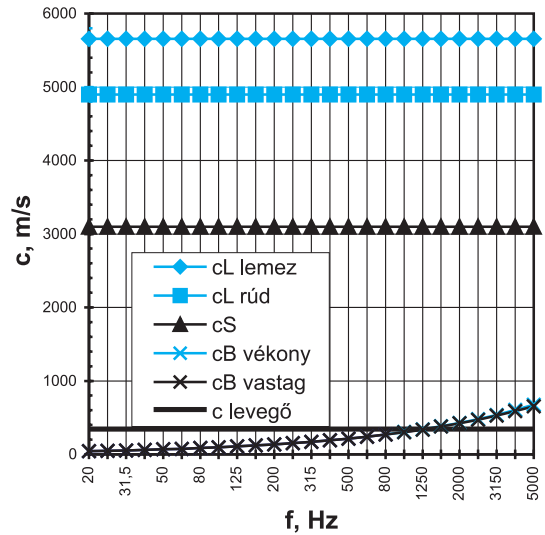
$$z'_{B0} = \frac{F'_z}{v_z} = m'' \cdot c_B; \quad (3.179)$$

$$w'_{B0} = \frac{M'_y}{w_y} = \frac{B'}{c_B}. \quad (3.180)$$

A végtelen kiterjedésű lemezbe F'_z fajlagos erővel bevitt fajlagos, tehát egységnyi széles sávon a terjedési irányában áthaladó W'_B akusztikai teljesítményt a következő képlet mutatja, v_B a hajlító rezgésebesség effektív értéke, értelemszerűen z irányú:

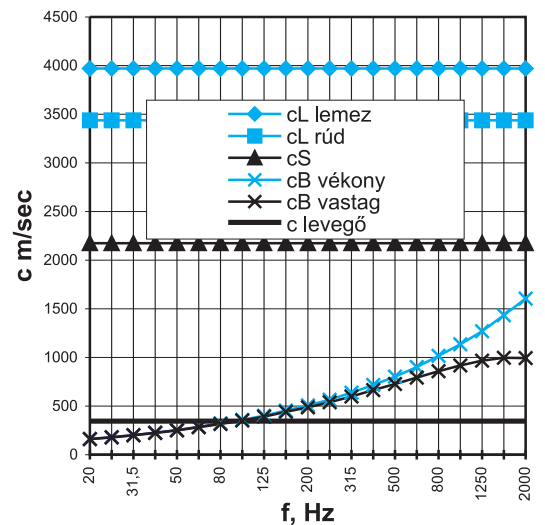
$$W'_B = 2 \cdot m'' \cdot c_B \cdot v_B^2. \quad (3.181)$$

Ha a lemez vastagsága összemérhetővé válik a hajlítóhullám hullámhosszával, akkor az eddig megismert ún. vékonylemez-közelítésben alkalmazott megfontolásokat ki kell egészíteni. Az elemi cellák mozgásának és egyensúlyának felírása során figyelembe kell venni a cellák forgási tehetetlenségét, valamint a cellákra ható z irányú nyíróerő okozta nyíródeformációt is, tehát a 3.26. és 3.27. ábrákon bemutatott egyensúlyi feltételek módosulnak. Ennek többek között az a következménye, hogy a (3.172) összefüggéssel a hajlítóhullámra megadott terjedési sebesség módosul, l. a (3.182) képletet. A nagyságrendi viszonyok érzékeltetése érdekében a 3.30a, b ábra 10 mm



3.30a ábra. Hullámterjedési sebességek rugalmas lemezben

10 mm vastag üvegtábla adatai: $E = 6 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$; $\mu = 0,25$; $\rho = 2500 \text{ kg/m}^3$; c_L lemez: longitudinális hullám terjedési sebessége lemezben; c_L rúd: longitudinális hullám terjedési sebessége rúdban; c_S : nyíróhullám terjedési sebessége lemezben; c_B vékony: hajlítóhullám terjedési sebessége lemezben, vékony lemez közelítés szerint; c_B vastag: hajlítóhullám terjedési sebessége lemezben, vastag lemez közelítés szerint



3.30b ábra. Hullámterjedési sebességek rugalmas lemezben

20 cm vastag monolit vasbeton lemez adatai:
 $E = 2,6 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$; $\mu = 0,25$; $\rho = 2200 \text{ kg/m}^3$; Jelmagyarázat:
mint a 3.30a ábránál

üvegtábla, ill. 20 cm monolit vasbeton lemez különböző terjedési sebesség adatait ábrázolja. Az ábrákból levont minőségi jellegű következtetések egyszerűen áttekinthető a hullámhosszakra is, hiszen, ha két sebesség viszonyában az egyik nagyobb, akkor ott a hullámhossz is nagyobb lesz azonos frekvenciánál nézve:

$$c_{KB} \approx c_B \cdot \left[1 - \frac{1}{2} \cdot c_B^2 \cdot \left(\frac{1}{c_S^2} + \frac{1}{c_{LII}^2} \right) \right]. \quad (3.182)$$

A rudakra a tengelyre merőleges irányban ható erő vagy nyomaték hatására lemezekre a lemez síkjára merőleges irányú erő vagy a síkkal párhuzamos nyomaték hatására hajlítórezgés alakul ki, amely a rúdtengely irányában, ill. a lemez síkjában tovaterjed. A hullám terjedési sebessége a közeg anyagjellemzőitől és a frekvenciától egyaránt függ. A hajlítóhullám teljesítményt szállít, amelynek nagysága a helytől független, lemezek esetében ezt a (3.181) összefüggés adja meg.

A 3.30a, b ábrákból, amelyek vékony és vastag közegben kialakuló terjedési sebességeket mutatnak, látható többi között, hogy a legnagyobb terjedési sebesség a lemezekben, majd a rudakban kialakuló longitudinális hullámhoz tartozik, ezek is, a nyíróhullám terjedési sebessége a frekvencia függvényében állandó. A hajlítóhullám terjedési sebessége a frekvencia függvényében nő. Ha a lemezben terjedő hajlítóhullám hullámhossza kisebb, mint a lemez vastagságának hatszorosa, akkor már célszerű a vastaglemez-közelítést alkalmazni. A megismerés útja azonban a vékonylemez-közelítéstől a vastaglemez-közelítés felé haladt.

3.11. Bemeneti impedanciák [IV.2], [IV.8]

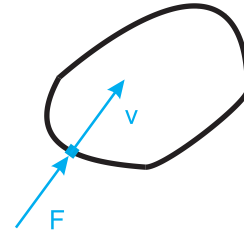
3.11.1. Általános értelmezés

Egy hullámvezető közegbe – rúd vagy lemez – bevitt akusztikai teljesítményt a gerjesztőerő, vagy -nyomaték nagyságának és a megfelelő bemeneti impedancia nagyságának ismeretében lehet meghatározni. A bemeneti impedancia közvetlenül is mérhető, ami számos hasznos adatot szolgáltat egy szerkezet működéséről, sőt egyes esetekben anyagjellemzőiről is. Kísérleti megvalósíthatósága miatt elsősorban a pontszerű erőhatásra mutató bemeneti impedancia, ill. a hajlítóhullám terjedése során a pontszerű nyomatéki impedancia meghatározása az érdekes.

A pontszerű erőhatásra kialakuló bemeneti impedanciát általános esetben a 3.31. ábra mutatja. A rendszerre meghatározott irányban pontszerűen támadó, rezgés jellegű erő hat, jele az ábrán F . Ennek az erőnek a hatására az erővel azonos irányban, azonos rezgési frekvenciával a gerjesztési pontban v rezgéssebesség alakul ki. A bemeneti impedancia az erő és a hozzá tartozó rezgéssebesség hányadosa:

$$z_{be} = \frac{F}{v}. \quad (3.183)$$

Mindig olyan mennyiségekből lehet impedanciát képezni, amelyek szorzata teljesítményt ad, te-



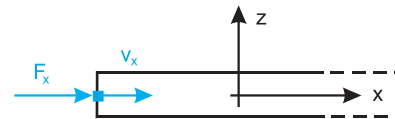
3.31. ábra. mechanikai rendszer pontszerű bemeneti impedanciája

hát a rezgése erő a vizsgált mechanikai rendszerbe a (3.184) összefüggés szerinti komplex W_{be} teljesítményt vitte be:

$$W_{be} = F \cdot v^*. \quad (3.184)$$

3.11.2. Egy irányban végtelen hosszú rúd bemeneti impedanciája longitudinális hullám terjedése esetén

A hullámvezető közeg egy irányban végtelen kiterjedésű homogén rúd. Tengelye az x tengely irányába mutat, kezdőpontja az $x = 0$ koordinátájú hely, kiterjedése az $x \rightarrow \infty$. Az elrendezés vázlatát a 3.32. ábrán látható. A bemeneti impedanciát a (3.183) összefüggés határozza meg.



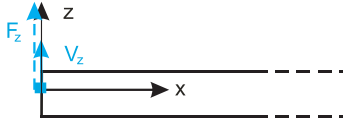
3.32. ábra. Egy irányban végtelen rúd bemeneti impedanciája longitudinális hullámterjedés esetén

Az erő helyfüggését a (3.100) összefüggés adja, ebből az $x = 0$ hely eredményére van szükség. Az anyagban ébredő nyomófeszültség és a rezgéssebesség közötti összefüggést a (3.95) képlet fejezi ki. Ezekből a z''_{L0} hullámimpedancia (3.109) képlete adódik, amely egyúttal a fél végtelen rúd z_{Lbe} bemeneti impedanciája lesz, ha a rúdban longitudinális hullám terjed. Az erő és rezgéssebesség jelölésében a 0 index arra utal, hogy az $x = 0$ helyen kell a két mennyiséget értelmezni:

$$z_{Lbe} = \frac{F_{x0}}{v_{x0}} = z''_{L0}. \quad (3.185)$$

3.11.3. Egy vagy két irányban végtelen hosszú rúd bemeneti impedanciája hajlítóhullám terjedése esetén

A hullámvezető közeg egy irányban végtelen kiterjedésű homogén rúd. Tengelye az x tengely irányába mutat, kezdőpontja az $x = 0$ koordinátájú hely,



3.33. ábra. Egy irányban végtelen rúd bemeneti impedanciája hajlítóhullám terjedése esetén

kiterjedése az $x \rightarrow \infty$. Az elrendezés vázlata a 3.33. ábrán látható. A bemeneti impedanciát a (3.183) összefüggés adta meg.

A hajlítóhullámú terjedést leíró rezgéssebességet, szögsebességet, nyomatókók és nyíróerőt a (3.164)–(3.167) képletek adják meg. A rezgéssebesség helyfüggését a (3.163) összefüggés fejezi ki. Miután a rúd fél végtelen, $x = 0$ helyen kezdődik, ezért csak a $+x$ irányú terjedési összetevőkkel kell foglalkozni. Az erő gerjesztés mellett a bemeneti pontban a nyomatók 0 lesz. Ezeknek az összefüggéseknek az együttes megoldása $x = 0$ helyre vezet el a bemeneti impedancia értékéhez.

A fél végtelen hosszú rúd bemeneti impedanciája, z_{Bbe} hajlítóhullám-terjedés során a rúd anyagjellemzőitől függ a (3.186) kifejezésnek megfelelően. Az erő és rezgéssebesség jelölésében a 0 index arra utal, hogy az $x = 0$ helyen kell a két mennyiséget értelmezni:

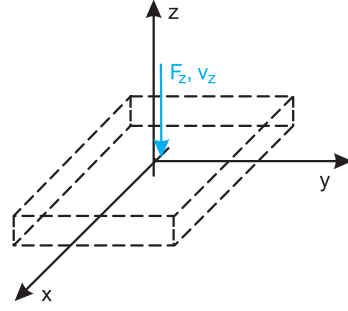
$$z_{Bbe} = \frac{F_{z0}}{v_{z0}} = m' \cdot c_B \cdot \frac{1+i}{2}; \quad (3.186)$$

Ha a rúd két irányban végtelen, és a gerjesztés az $x = 0$ helyen van, akkor azonos egyenletek megoldásával az eredmény kismértékben eltér az előző (3.187) képlettől. Az eltérésnek az az alapvető oka, hogy mind a $+$, mind a $-$ végtelen irányú terjedéssel számolni kell.

$$z_{Bbe} = \frac{F_{z0}}{v_{z0}} = 2 \cdot m' \cdot c_B \cdot (1+i). \quad (3.187)$$

3.11.4. Végtelen kiterjedésű vékony lemez bemeneti impedanciája hajlítóhullám terjedése esetén

A hullám vezető közeg minden irányban végtelen kiterjedésű vékony lemez. A gerjesztési pont az $x = y = 0$ pontban van. Az elrendezés vázlata a 3.34. ábrán látható. A bemeneti impedancia meghatározását a (3.183) összefüggés adja meg, melynek számszerű meghatározásához ismerni kell a gerjesztési pontban ható z irányú erő és a keletkező, szintén z irányú rezgéssebesség arányát.



3.34. ábra. Végtelen kiterjedésű lemez bemeneti impedanciája hajlítóhullámú terjedéskor

A megoldás kiindulása a vékony lemezben kialakuló hajlítóhullámú terjedés hullámegyenletének homogén alakja a (3.171) szerint. Külső gerjesztés hatására az egyenlet a (3.188) alakra módosul, a külső gerjesztést általános esetben az x - y koordinátáktól függő nyomás hozza létre:

$$\frac{\partial^4 v_z(x, y)}{\partial x^4} + \frac{\partial^4 v_z(x, y)}{\partial y^4} + 2 \cdot \frac{\partial^4 v_z(x, y)}{\partial x^2 \partial y^2} - k_B^4 \cdot v_z(x, y) = \frac{i \cdot \omega}{B'} \cdot p(x, y). \quad (3.188)$$

A rezgéssebesség megoldásának a következő sajátosságai vannak:

- tengelyesen szimmetrikus;
- az origóban a szögelfordulás 0;
- az origóban a belső, z irányú erők eredője egyenlő lesz a külső gerjesztőerővel.

A megoldáshoz a (3.188) egyenlet homogén operátoros alakjából kell kiindulni:

$$(\Delta \Delta - k_B^4) v_z = (\Delta + k_B^2)(\Delta - k_B^2) v_z = 0. \quad (3.189)$$

A középső rész mindkét tagjának külön-külön 0-t kell adni. A $+$ összegzésű tag megoldása a következő:

$$v_{z1}(r) = C_1 \cdot H_0^{(2)}(k \cdot r) \quad (3.190)$$

A $-$ összegzésű tag megoldása:

$$v_{z2}(r) = C_2 \cdot H_0^{(2)}(-i \cdot k \cdot r). \quad (3.191)$$

$H_0^{(2)}$ a másodrendű Hankel-függvényt jelenti, amelynek az argumentumtól függő több közelítő alakja van kis és nagy értékekre egyaránt. A rezgéssebesség teljes megoldása e két rész összege lesz. C_1 és C_2 értékét a peremfeltételekből kell meghatározni. Továbbá alkalmazni kell a Hankel-függvény különböző aszimptotikus közelítő alakjait is. A műveleteket elvégezve a bemeneti impedancia értékére a (3.192) összefüggés adódik.

A végtelen kiterjedésű hajlítórezgést végző lemez bemeneti impedanciája a következő, az erő és a rezgéssebesség 0 indexe arra utal, hogy az origóban értelmezik őket:

$$z_{Bbe} = \frac{F_{z0}}{v_{z0}} = 8 \cdot \sqrt{B' \cdot m''}. \quad (3.192)$$

Az eredmény a szemlélettel összhangban van: annál nagyobb egy végtelen kiterjedésű lemez bemeneti impedanciája, minél nagyobb a fajlagos tömege, ill. minél merevebb.

3.12. Hajlítóhullámú rezgési tér véges kiterjedésű közegben

3.12.1. Az áttekintés céljai

A véges kiterjedésű közegek határain – a léghangterjedés során megismert okok miatt – a terjedő hullám visszaverődik. Állóhullámok alakulhatnak ki. Ezek sajátosságai a hullámok fajtájától és a közeg jellemzőitől függenek. Számos hullám- és közeghatárforma közvetlen gyakorlati fontossággal rendelkezik, például az anyagjellemzők meghatározása terén. Ezek teljes körű áttekintése meghaladja a könyv kereteit, a hangsugárzás jelensége miatt csak a hajlítóhullámokat tárgyaljuk.

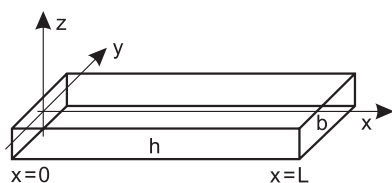
Az áttekintés célja a véges kiterjedésű közegekben – rúd, lemez – kialakuló rezgési tér jellemzői felírásának bemutatása, és e feladat részeként

- a peremfeltételek leírásai módjai;
- a gerjesztés és válasz összefüggéseinek bemutatása.

3.12.2. Véges hosszúságú rúd hajlítórezgései

A vizsgált modell L hosszúságú, állandó keresztmetszetű homogén rúd. Vastagsága h , szélessége b , testsűrűsége ρ , dinamikai rugalmassági modulusa E , veszteségi tényezője η . Mozgásegyenletét – a homogén egyenlet – a (3.160), a terjedési sebességet a (3.161), a rezgéssebesség általános megoldását a (3.163), a hajlítóhullám terjedését leíró mennyiségek (szögsebesség, nyomaték, nyíróerő) közötti kapcsolatokat a (3.164)–(3.167) összefüggések írták le. A rúd két végén a peremfeltételek – a rúd két végének rögzítései – határozzák meg azt, hogy a rezgési kép milyen lesz. Az elrendezés a 3.35. ábrán látható.

A valóságos fizikai tartalommal rendelkező peremfeltételeket a 3.5. táblázat foglalja össze.



3.35. ábra. Hajlítórezgést végző rúd elrendezése

3.5. táblázat. Hajlítórezgést végző rúd befogási peremfeltételei

Megnevezés	Ábra	v_z	w_y	M_y	F_z
Alátámasztás		0		0	
Befogás		0	0		
Szabad vég				0	0

A peremfeltételek azt jelentik, hogy a rúd végein a rögzítések milyen elmozdulást, szögelfordulást engednek meg, ill. milyen erő- és nyomatéki hatásoknak tudnak felvenni:

- az „alátámasztás” peremfeltétel azt jelenti, hogy a peremnél nem lehetséges elmozdulás, szögelfordulás azonban igen; ennek megfelelően az alátámasztás nyíróerőt felvesz, nyomatékot azonban nem;
- a „befogás” peremfeltétel azt jelenti, hogy a peremnél sem elmozdulás, sem szögelfordulás nem lehetséges, emiatt a befogás mind nyomatékot, mind nyíróerőt felvesz;
- a szabad vég peremfeltétel azt jelenti, hogy mind elmozdulás, mind szögelfordulás lehetséges, emiatt a perem sem erőt, sem nyomatékot nem vesz fel.

Az idealizált peremfeltételeken teljesítmény nem távozik a rendszerből, a valóságos peremeken keresztül azonban igen. Van még egy lehetséges peremfeltétel-kombináció, amelyet a szakirodalom vezetett peremfeltételnek nevez. Ennek azonban nincs gyakorlati jelentése.

A véges hosszú rudaknak két pereme van, ezért ez minden esetben négy feltételt jelent, ami összhangban van a mozgást leíró négy mennyiséggel.

Az általános megoldáshoz a rezgéssebesség helyfüggését a (3.163) egyenlettel egyenértékű (3.193) alakban célszerű felírni. Meg kell határozni a hajlítórezgést leíró négy mennyiség, a rezgéssebesség, a szögsebesség, a nyomaték és nyíróerő értékét az $x = 0$ és $x = L$ helyen a (3.193)–(3.196) egyenletek segítségével. Ezekből a (3.196) egyenletben található A_n , B_n , C_n és D_n együtthatók közül három értéke kiadódik a negyedik függvényében. A negyedik a gerjesztés nagyságától függ:

$$v_x(x) = A \cdot \operatorname{ch}(x) + B \cdot \operatorname{sh}(x) + C \cdot \cos(x) + D \cdot \sin(x). \quad (3.193)$$

A megoldás folyamatában kialakul az, hogy a hullámszám csak $k_1, k_2, \dots, k_n$ diszkrét értékeket vehet fel, e diszkrét értékekhez $f_1, f_2, \dots, f_n$ sajátfrekvenciák tartoznak. Ezek lesznek a sorzámmal azonosított rezgésmódusok. Az $A \dots D$ együtthatók szintén diszkrét értékeket kapnak, és létrejön a $v_n(x)$ karakter-

risztikus függvény, amely az egyes módusokhoz tartozó rezgésbesség helyfüggését fejezi ki.

A mindkét végén alátámasztott rúd jellemzői a következők:

- a hullámszám és frekvencia sajátértékeit megadó egyenlet a (3.194) szerint épül fel:

$$\sin(k_n \cdot L) = 0; \quad (3.194)$$

- $k_n \cdot L$ értékei a következők lehetnek (vesztésgmentes rúdra):

$$(k_n \cdot L) = n \cdot \pi; \quad (3.195)$$

- a vesztésgmentes rúd sajátfrekvenciáit a következő összefüggés fejezi ki, az első négy érték a következő táblázatban szerepel:

$$f_n = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left(\frac{n \cdot \pi}{L} \right)^2 \cdot \sqrt{\frac{B}{m'}}; \quad (3.196)$$

- a karakterisztikus függvényt, $\psi_n(x)$ -et a (3.197) összefüggés mutatja:

$$\psi_n(x) = \sin(k_n \cdot x); \quad (3.197)$$

- az $A_n \dots D_n$ együtthatók értéke a következő:

$$A_n = B_n = C_n = 0; \quad (3.198)$$

D_n a gerjesztéstől függ.

3.6. táblázat. 1 m hosszú, 3 mm vastag, 1 cm széles, mindkét végén alátámasztott üvegrúd sajátfrekvenciái

n	f_n , Hz
1	6,7
2	26,6
3	59,9
4	106,6

Mindezeket a 3.36.–3.37. ábrák szemléltetik:

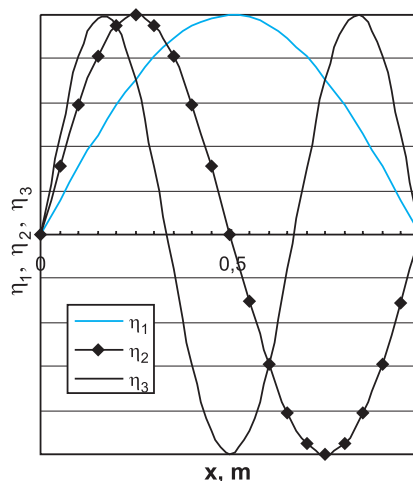
- a 3.36. ábra az $L = 1$ m hosszúságú, 3 mm vastag, 1 cm széles üvegrúd első három módusának kitérés-helyfüggését, $\eta(x)$ mutatja be: látható, hogy a két alátámasztott végén a kitérés 0, a rúd hossza mentén pedig a módusszámtól függő további zérushelyek alakulnak ki;
- a 3.37. ábrán a 2. módushoz tartozó $\eta_2(x)$ kitérés, $\gamma_2(x)$ szögelfordulás, $M_2(x)$ nyomaték és $\Phi_2(x)$ nyíróerő helyfüggése látható; a kitérés és a nyíróerő z irányú, a szögelfordulás és a nyomaték y irányú; megfigyelhető mind a négy változóra a peremfeltételek megvalósulása.

Az egyik végén ($x = 0$ helyen) befogott, másik végén, $x = L$ helyen szabad rúd (konzolosan befogott rúd) jellemzői a következők:

- a hullámszám és frekvencia sajátértékeit megadó egyenlet így alakul:

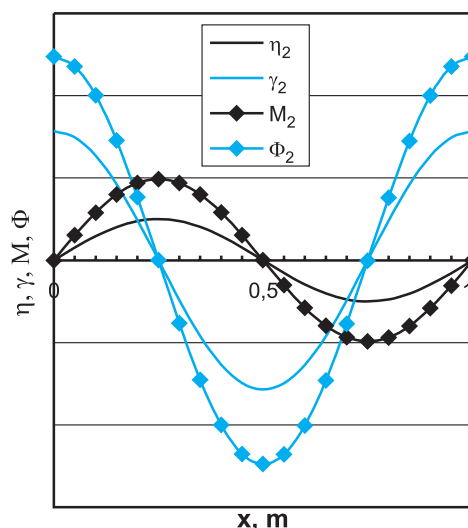
$$\operatorname{ch}(k_n \cdot L) \cdot \cos(k_n \cdot L) = 1; \quad (3.199)$$

- $k_n \cdot L$ lehetséges értékei, valamint $A_n \dots C_n$ $D_n = 1$ -hez illeszkedő értékeit a 3.7. táblázat adja meg vesztésgmentes rúdra:



3.36. ábra. Mindkét végén alátámasztott rúd első három módusához tartozó kitérésének helyfüggése

A rúd üvegből készült, 1 m hosszú, 3 mm vastag, 1 cm széles ($\rho = 2500 \text{ kg/m}^3$; $E = 6 \cdot 10^{10} \text{ Pa}$); az x tengely a rúd tengelyének felel meg; a rezgés kitérés z irányú, jele η_1 , η_2 , η_3 a módusszámtól függően



3.37. ábra. Mindkét végén alátámasztott rúd második módusához tartozó kitérés-, szögelfordulás-, nyomaték- és nyíróerő-helyfüggése

A rúd anyaga, méretei megegyeznek a 3.36. ábra adataival; az x tengely a rúd tengelyének felel meg; a rezgés kitérés z irányú, jele η_2 ; a szögelfordulás γ_2 , y irányú; a nyomaték szintén y irányú, jele M_2 ; a nyíróerő z irányú, jele Φ_2 ; az egyes mennyiségek nem azonos léptékben szerepelnek

3.7. táblázat. Konzolosan befogott rúd ($k_n \cdot L$) sajátértékei és a karakterisztikus függvény együtthatói

n	$k_n \cdot L$	A_n	B_n	C_n
1	1,875	1,36	–1	–1,36
2	4,694	0,98	–1	–0,98
3	7,855	1,00	–1	–1,00
4	10,996	0,99997	–1	–1
$>= 5$	$\frac{\pi}{2} \cdot (2 \cdot n - 1)$	1	–1	–1

A sajátfüggvények a (3.199) összefüggésből számíthatók, $(k_n \cdot L)$ megengedett értékei a 3.7. táblázatban szerepelnek. A karakterisztikus függvény a 3.7. táblázatban található $A_n \dots B_n$ értékek behelyettesítésével állítható elő:

$$\psi_n(x) = A_n \cdot \text{ch}(k_n \cdot x) + B_n \cdot \text{sh}(k_n \cdot x) + C_n \cdot \cos(k_n \cdot x) + D_n \cdot \sin(k_n \cdot x) \quad (3.200)$$

Mindezeket a 3.38.–3.39. ábrák mutatják:

- a 3.38. ábra az $L = 1$ m hosszúságú, 3 mm vastag, 1 cm széles üvegrúd első három módusának kitérés helyfüggése, $\eta(x)$ szerepel: látható, hogy a befogott végnél a kitérés 0, a rúd hossza mentén pedig a módus számtól függő további zérus helyek alakulnak ki;
- a 3.39. ábrán a 2. módushoz tartozó kitérés, $\eta_2(x)$ szögelfordulás, $\gamma_2(x)$, nyomaték, $M_2(x)$ és nyíróerő $\Phi_2(x)$ helyfüggése látható; a kitérés és a nyíróerő z irányú, a szögelfordulás és a nyomaték y irányú; megfigyelhető mind a négy változóra a peremfeltételek megvalósulása, például a befogott végnél ($x = 0$) a kitérés és a szögelfordulás 0, hiszen a befogás ezt kényszeríti ki, a szabad végnél azonban a nyomaték és a nyíróerő lesz 0, mert nincs közeg, amely e két hatást fel tudná venni.

A konzolosan befogott rúd ideálisan alkalmas kisméretű próbatestek anyagjellemzőinek meghatározására: az egymás után következő sajátértékeknek megfelelő sajátfrekvenciák aránya a sajátértékek négyzetével arányos, így ebből a rugalmassági modulus meghatározható.

Ha a feladat egy adott gerjesztéshez tartozó válasz, tehát a rezgéssebesség meghatározása, akkor az inhomogén hullámegyenlethez kell kiindulni – lemezre l. a (3.188) összefüggést. $F'(x)$ a rúd tengelyére merőleges, egységnyi hosszra ható külső nyíróerőt jelenti:

$$\frac{\partial^4 v_z(x)}{\partial x^4} - k_B^4 \cdot v_z(x) = \frac{i \cdot \omega}{B} \cdot F'(x). \quad (3.201)$$

Az x_g helyen ható pontszerű erő $\delta(x_g)$ függvénnyel fejezhető ki.

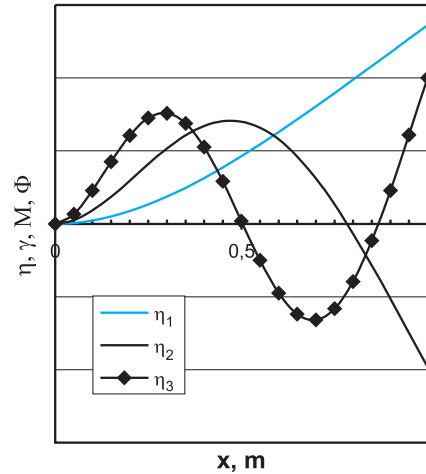
A további lépések a megoldást a mindkét végén alátámasztott rúdra mutatják meg, de nincs semmi elvi és gyakorlati akadály a többi peremfeltételhez tartozó megoldás kidolgozásának. A véges kiterjedés miatt a rezgéssebesség a hely szerint a karakterisztikus függvény segítségével Fourier-sorba fejthető a (3.202) egyenlet szerint, az egyes v_n együtthatók nagysága a gerjesztés sajátosságaitól és a rúd anyagjellemzőitől függ. A gerjesztőerő nagyságát F_g jelöli, v_n értékeit a (3.203a) képlet adja:

$$v(x) = \sum_n v_n \cdot \psi_n(x); \quad (3.202)$$

$$v_n = \frac{2}{L} \cdot \frac{i \cdot \omega}{B} \cdot \frac{F_g}{k_n^4 - k_B^4} \cdot \psi_n(x_g) \quad (3.203a)$$

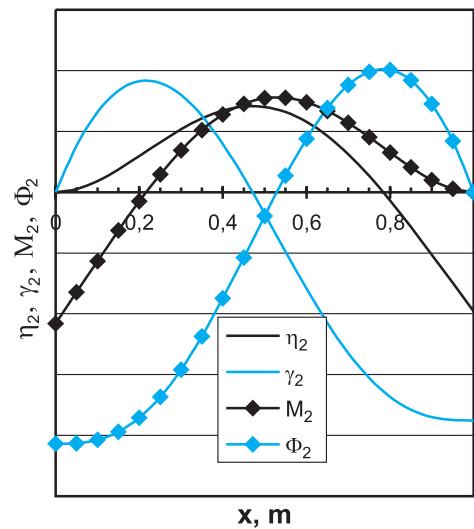
A veszteségek kifejezésére a teremakusztika hullámtani megközelítésénél már alkalmazott megoldás alkalmazható, l. a 2.6.2. pontot, a (2.165)–(2.167) összefüggések környezetét. A hullámszám megengedett értékeit a sajátfrekvenciákkal helyettesítve és állandó veszteséget feltételezve v_n értéke a következő:

$$v_n = \frac{2 \cdot i \cdot \omega}{m_{\text{rúd}}} \cdot \frac{F_g}{\omega_n^2 \cdot (1 + i \cdot \delta) - \omega^2} \cdot \psi_n(x_g). \quad (3.203b)$$



3.38. ábra. Konzolosan befogott rúd első három módushoz tartozó kitérésének helyfüggése

A rúd 1 m hosszú, 3 mm vastag, 1 cm széles, az x tengely a rúd tengelyének felel meg; a rezgés kitérés z irányú, jele η_1, η_2, η_3 a módus számtól függően ($\rho = 2500 \text{ kg/m}^3$; $E = 6 \cdot 10^{10} \text{ Pa}$)



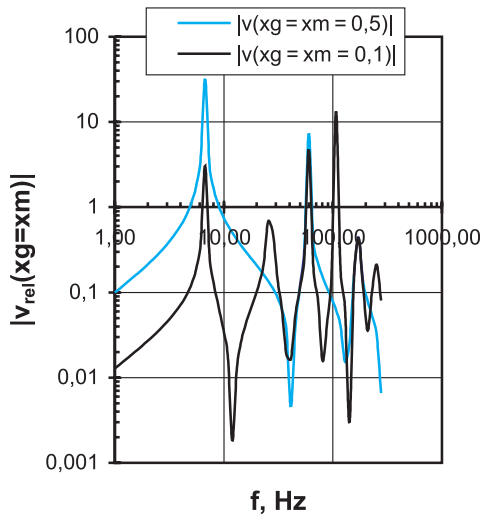
3.39. ábra. Konzolosan befogott rúd második módushoz tartozó kitérés-, szögelfordulás-, nyomaték- és nyíróerő-helyfüggése

A rúd 1 m hosszú, anyaga és egyéb jellemzői azonosak a 3.38. ábra példájával; az x tengely a rúd tengelyének felel meg; a rezgés kitérés z irányú, jele η_2 ; a szögelfordulás γ_2, y irányú; a nyomaték szintén y irányú, jele M_2 ; a nyíróerő z irányú, jele Φ_2 ; az egyes mennyiségek nem azonos léptékben szerepelnek

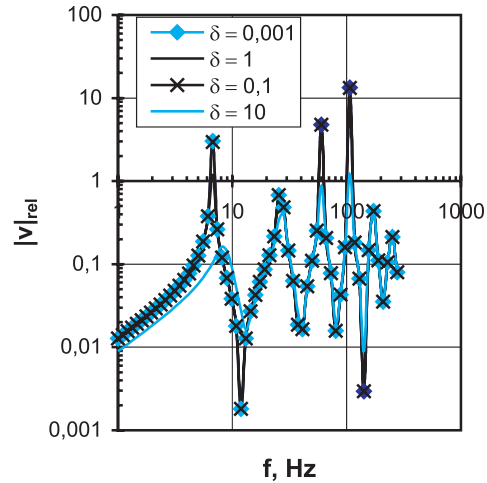
Az eredményeket a 3.40.–3.42. ábra szemlélteti.

A pontszerű erőhöz tartozó bemeneti impedancia értelmezése azonos a végtelen kiterjedésű rúd bemeneti impedanciájával [l. a (3.183) meghatározást].

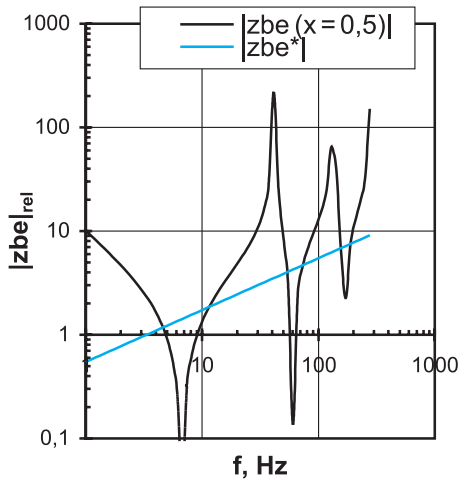
- A 3.40. ábrán a korábban már vizsgált 1 m hosszú, 3 mm vastag, veszteségmentes üvegrúd példája szerepel. A külső, rúdtengelyre merőleges erő $x_g = 0,5$ és $x_g = 0,1$ pontban hat a rúdra. Látható, hogy a maximumok egybeesnek a sa-



3.40. ábra. Mindkét végén alátámasztott rúd rezgés-sebességének frekvenciafüggése az x_g gerjesztési pontban
A rúd üvegből készült, 1 m hosszú, 3 mm vastag, 1 cm széles ($\rho = 2500 \text{ kg/m}^3$; $E = 6 \cdot 10^{10} \text{ Pa}$)



3.42. ábra. Mindkét végén alátámasztott rúd rezgéssebessége abszolút értékének frekvenciafüggése különböző veszteségtényező-értékeknél
A rúd adatai megegyeznek a 3.41. ábra adataival



3.41. ábra. Mindkét végén alátámasztott rúd bemeneti impedanciájának abszolút értéke a frekvencia függvényében az $x_g = 0,5$ pontban

A rúd üvegből készült, 1 m hosszú, 3 mm vastag, 1 cm széles ($\rho = 2500 \text{ kg/m}^3$; $E = 6 \cdot 10^{10} \text{ Pa}$); $|zbe(x=0,5)|$ a véges hosszú rúd bemeneti impedanciájának abszolút értéke az $x = 0,5$ pontban; a végtelen hosszú rúd bemeneti impedanciájának abszolút értéke

játfrekvenciákkal, de az $x_g = 0,5$ helyű gerjesztésnél nem jelenik meg minden sajátfrekvencia. Ennek oka a modális sebesség helyfüggésében rejlik, l. a 3.36. ábrán például a 2. sajátérték 0 helyét.

- A 3.41. ábrán a veszteségmentes rúd közepén mérhető bemeneti impedancia számított abszolút értéke szerepel, jele $|zbe(xg=0,5)|$. Összehasonlításul a végtelen rúd bemeneti impedanciája abszolút értékének frekvenciafüggését is bemutatja az ábra, jele $|zbe*|$. Megfigyelhető, hogy a végtelen rúd bemeneti impedanciája tendencia jelleggel követi a véges hosszú rúd bemeneti impedanciáját, az eltérések a minimumok és maximumok megjelenésében vannak. Az impedanciaminimumok a sajátfrekvenciákon alakulnak ki.

- A 3.42. ábrán a rezgéssebesség abszolút értékének frekvenciafüggése látható, ha $x_g = 0,1$ és $x_g = 0,5$, de a veszteségi tényező különböző értéket vesz fel, viszont egy-egy változathoz állandó. Látható, hogy minél kisebb a veszteségi tényező, annál élesebben jelennek meg a sebességmaximumok a sajátfrekvenciákon. Minőségileg azonos eredmény született már az egy szabadságfokú rezgőrendszerek vizsgálata során.

A módusszám és a sűrűség a 2.6.2. pont logikáját követve határozható meg: a módusokat egydimenziós f térben elhelyezve egy elemszakasz hossza:

$$\text{szakasz} = \frac{c_B}{2 \cdot L}. \quad (3.204)$$

A módusok N_f számát a (3.205), egy f frekvencia δ_f környezetében a módusok számát, $N(f, \delta_f)$ -et a (3.206) képlet adja meg:

$$N_f = \frac{f \cdot 2 \cdot L}{c_B} = \frac{L}{\pi} \cdot k_B = \frac{L}{\pi} \cdot \sqrt{\omega} \cdot \sqrt{\frac{m'}{B}}, \quad (3.205)$$

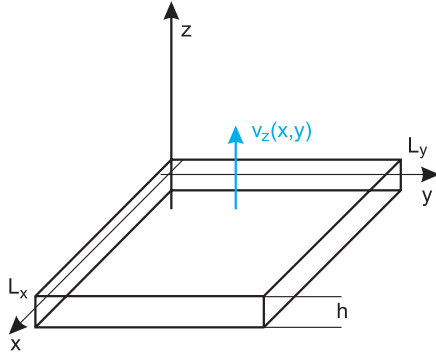
$$N(f, \Delta f) = \frac{\partial N}{\partial f} \cdot \Delta f. \quad (3.206)$$

A véges hosszú rúd hajlító rezgése az egyes rezgési módusokból épül fel. A módusokhoz a peremfeltételek által meghatározott sajátfrekvenciák tartoznak. A rezgési képet a rezgés-keltés helye is befolyásolja. A véges hosszú rúd bemeneti impedanciájának értéke a végtelen hosszú rúd bemeneti impedanciája körül változik a sajátfrekvenciák és a csillapítás alapján.

3.12.3. Véges kiterjedésű lemez hajlítórezgései és teljesítményviszonyai

A vizsgált modell L_x , L_y hosszúságú, állandó vastagságú homogén lemez. Vastagsága h , testsűrűsége ρ , dinamikai rugalmassági modulusa E , veszteségi tényezője η . Mozgásegyenletét (homogén egyen-

let) a (3.171), a terjedési sebességet a (3.172), a hajlítóhullám-terjedést leíró mennyiségek (szögsebesség, nyomaték, nyíróerő) közötti kapcsolatokat a (3.175)–(3.178) összefüggések írják le. Az elrendezés a 3.43. ábrán látható.



3.43. ábra. Hajlítórezgést végző lemez elrendezése

A kialakuló rezgésképet ismét a peremfeltételek befolyásolják. Általánosan alkalmazott, többi között egyszerűsége miatt is a mind a négy éle mentén alátámasztott lemez.

Az x és az y változó szerint a karakterisztikus függvény szeparálható, alakját a (3.207) képlet adja meg. A hullámszámok megengedett értékeit a két irányra külön-külön a (3.195) képlet fejezi ki. A rezgéssebesség helyfüggése, $v_z(x,y)$ a helykoordináták szerinti sorbajefféssel fejezhető ki a (3.208) szerint:

$$\psi_{n_x, n_y}(x, y) = \sin(k_{n_x} \cdot x) \cdot \sin(k_{n_y} \cdot y); \quad (3.207)$$

$$v_z(x, y) = \sum v_n \cdot \psi_{n_x, n_y}(x, y). \quad (3.208)$$

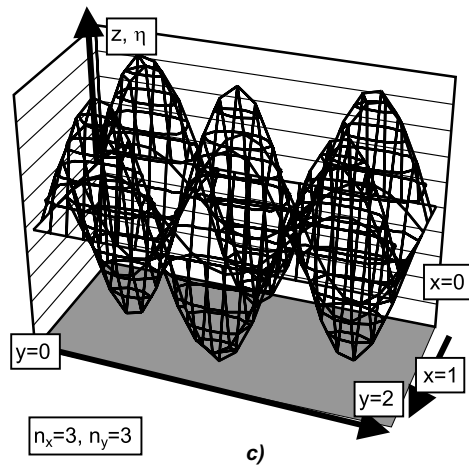
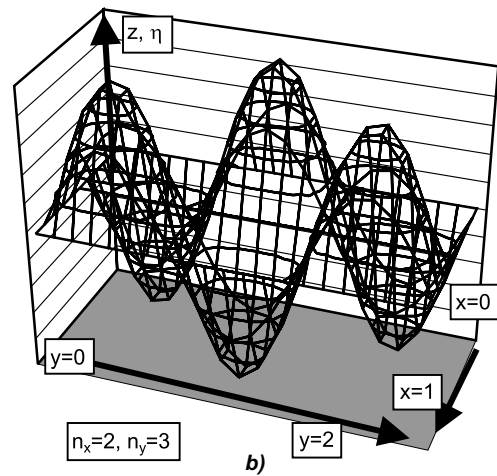
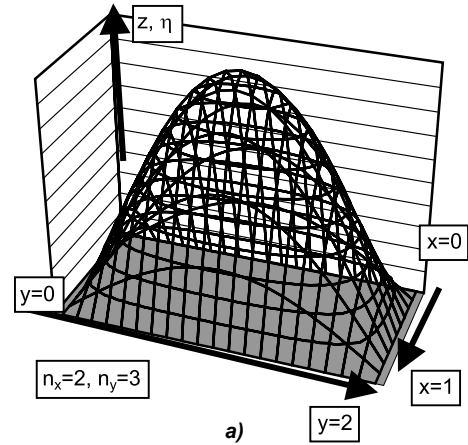
Példaként a 3.44. ábrán 1 m · 2 m felületű, 3 mm vastagságú, a peremek mentén alátámasztott üveglemez $n_x = 1$; $n_y = 1$, $n_x = 2$, $n_y = 3$, ill. $n_x = 2$, $n_y = 3$ módusainak rezgéskitérése látható. Megfigyelhető az alátámasztás peremfeltétel megvalósulása, valamint a maximumok és minimumok kialakulása. Látható, hogy páros módusszám esetén a két sarok módus ellenfázisban, páratlan módus esetén pedig azonos fázisban van.

Az egyes módusok amplitúdóját a korábbival azonos technika alapján a (3.209) összefüggés adja az x_g , y_g pontra ható pontszerű, F_g amplitúdójú erő gerjesztéshez:

$$v_{n_x, n_y} = \frac{4}{L_x \cdot L_y} \cdot \frac{i \cdot \omega}{B'} \cdot \frac{F_g}{k_{n_x, n_y}^4 - k_B^4} \cdot \psi_{n_x, n_y}(x_g, y_g). \quad (3.209)$$

Később, a 4.2.4. pontban elvégzendő feladat előkészítése céljából célszerű a rugalmassági modulushoz kapcsolódó δ_E veszteségi tényező, valamint a saját-körfrekvenciák, ω_{nm} bevezetése (3.210), és így a módusamplitúdó átrendezett összefüggésének megadása a (3.211) formában.

$$\omega_{n_x, n_y} = \left(\left(\frac{n_x \cdot \pi}{L_x} \right)^2 + \left(\frac{n_y \cdot \pi}{L_y} \right)^2 \right) \cdot \sqrt{\frac{B'}{m''}}; \quad (3.210)$$



3.44. ábra. Egyszerűen alátámasztott, hajlítórezgést végző lemez egyes módusai a hely függvényében

a) $n_x = 1$, $n_y = 1$ módus; b) $n_x = 2$, $n_y = 3$ módus;

c) $n_x = 3$, $n_y = 3$ módus

A lemez 1×2 méter felületű üvegtábla, egyéb adatai megegyeznek a korábbi ábrák adataival

$$v_{nx,ny} = \frac{4}{L_x \cdot L_y \cdot \rho \cdot h} \cdot \frac{i \cdot \omega}{\omega_{nx,ny}^2 \cdot (1 + i \cdot \delta_E) - \omega^2} \cdot F_g \cdot \psi_{nx,ny}(x_g, y_g). \quad (3.211)$$

A felületre vonatkozó átlagos rezgésebbesség effektívérték-négyzete, v_{eff}^2 -et a módusok segítségével ki lehet fejezni, ami a karakterisztikus függvény ortogonalitásán alapul:

$$\begin{aligned} \underline{v_{eff}^2} &= \frac{1}{2} \cdot \sum_{nx} \sum_{ny} |v_{nx,ny}^2|^2 = \\ &= \frac{2 \cdot F_g^2}{m} \cdot \sum_{nx} \sum_{ny} \frac{\omega^2 \cdot \psi_{nx,ny}^2}{(\omega_{nx,ny}^2 - \omega^2)^2 + \delta_E^2 \cdot \omega_{nx,ny}^2}. \end{aligned} \quad (3.212)$$

A felület átlagos rezgésebbesség-négyzete, $\underline{v_{eff}^2}$ meghatározható átlagos gerjesztésre is, ami x_g és y_g szerint másodlik integrálást jelent:

$$\underline{v_{eff}^2} = \frac{F_g^2 \cdot \omega^2}{2 \cdot m} \cdot \sum_{nx} \sum_{ny} \frac{1}{(\omega_{nx,ny}^2 - \omega^2)^2 + \delta_E^2 \cdot \omega_{nx,ny}^2}. \quad (3.213)$$

A zajcsökkentési gyakorlatban a gerjesztőerő nem egy meghatározott frekvencián, hanem frekvenciatartományban hat, a tartomány ω_1 és ω_2 körfrekvenciák közötti $\Delta\omega$ frekvenciasáv. E sávban az átlagos rezgésebbesség, v_Δ a (3.214) összefüggéshez képest harmadik átlagolás eredménye:

$$v_\Delta^2 = \frac{1}{\Delta\omega} \int_{\omega_1}^{\omega_2} \underline{v_{eff}^2} d\omega. \quad (3.214)$$

Az integrált kifejtve abban az esetben, ha a frekvenciasávban elegendően sok sajátfrekvencia található, és a $\Delta\omega$ körfrekvencia tartományban a gerjesztőerő nagysága f_Δ , akkor az átlagos rezgésebbesség-négyzet (3.215) szerint alakul. A vizsgált frekvenciasávba jutó sajátfrekvenciák sorszáma $N1$ és $N2$ közötti értéket vehet fel. Az adott sávba jutó saját-körfrekvenciák az összegzésben ω -val helyettesíthetők:

$$v_\Delta^2 \approx \frac{F_\Delta^2}{m^2 \cdot \Delta\omega} \cdot \sum_{n=N1}^{N2} \frac{\pi}{2 \cdot \delta_E \cdot \omega_n} = \frac{F_\Delta^2}{m^2} \cdot \frac{\pi}{2 \cdot \delta_E \cdot \omega} \cdot \frac{N2 - N1}{\Delta\omega}. \quad (3.125)$$

Az eredmény azt tükrözi, hogy az adott frekvenciasávban az átlagos rezgésebbesség effektívérték-négyzete

- fordítottan arányos a rezgőlemez tömegének négyzetével;
- fordítottan arányos a veszteségi tényezővel;
- egyenesen arányos a frekvenciasávban levő módusok számával.

Az első két szempont a rezgésszigetelés hasznosítható tendenciáit jelenti. A harmadik szempont további megfontolásokat igényel, hiszen az utolsó hányados a rezgőlemez módussűrűsége.

A módussűrűséget a korábbi logika alapján lehet kiszámítani. A módusok két irányban épülhetnek fel, felületet alkotva az f térben éppúgy, mint a felületi módusok a 2.6.2. pontban. Egy elemi felület méretét a (3.216) egyenlet fejezi ki:

$$elemi \text{ felület} = \frac{c_B}{4 \cdot L_x \cdot L_y}. \quad (3.216)$$

A módusok az f térben negyedkörben helyezkedhetnek el, így N_f számukat a (3.217) összefüggés, az f frekvencia Δf környezetében levő módusok számát pedig a (3.206) összefüggés alapján a (3.218) összefüggés adja meg:

$$N_f = \frac{f^2 \cdot \pi}{4} \cdot \frac{4 \cdot L_x \cdot L_y}{c_B^2} = \frac{f \cdot S}{2} \cdot \sqrt{\frac{m''}{B'}} = \frac{S \cdot k_B^2}{4 \cdot \pi}, \quad (3.217)$$

$$\frac{\Delta N}{\Delta\omega} = \frac{S \cdot k_B^2}{4 \cdot \pi \cdot \omega}. \quad (3.218)$$

A (3.218) összefüggés visszahelyettesíthető a (3.215) képletbe. Így az átlagos rezgésebbesség effektívérték-négyzetére megállapított tendenciák további két megállapítással egészíthetők ki:

- egyenesen arányos a lemez felületével;
- fordítottan arányos a frekvencia négyzetével.

A (3.192), (3.215), (3.218) összefüggések alkalmazásával és a szerkezetbe bevitt teljesítmény általánosításával a hajlítórengést végző lemez teljesítmény-egyensúlyi állapotára lehet meghatározni összefüggést a (3.219) képlet szerint. Eszerint a szerkezetbe bevitt W_{be} akusztikai teljesítmény a lemez δ látszólagos veszteségi tényezőjének megfelelően távozik a lemezből. A bevitt teljesítmény hatására v átlagos rezgésebbesség alakul ki (felületi átlag, effektív érték), m a lemez össztömege, ω a körfrekvencia:

$$W_{be} = \omega \cdot m \cdot v^2 \cdot \delta. \quad (3.219)$$

A véges kiterjedésű lemez hajlítórengése az egyes rezgési módusokból épül fel. A módusok mindkét térirány eredőjeként jönnek létre. A módusokhoz a peremfeltételek által meghatározott sajátfrekvenciák tartoznak. Az eredő rezgési képet a rezgéseltetés helye is befolyásolja. A rezgésebbesség felületi átlaga a módusokból közvetlenül meghatározható a (3.180d) képlet alapján. Széles sávú, pontszerű gerjesztés esetén a lemez átlagos rezgésebbesség effektívérték-négyzete fordítottan arányos a tömeg négyzetével és a veszteségi tényezővel, egyenesen arányos a lemez felületével és függ az anyagjellemzőktől is.

Ha egy tetszőleges frekvenciatartományban a lemezben elegendően sok sajátfrekvencia alakul ki, a bevitt akusztikai teljesítmény, a lemez átlagos rezgésebbessége (effektív érték, felületi átlag), a veszteségi tényező és a körfrekvencia között a (3.219) képlet fejezi ki a kapcsolatot.

Eszerint például meghatározott nagyságú teljesítmény hatására kialakuló rezgésebbesség négyzetes középértéke:

- fordítottan arányos a lemez össztömegével;
- fordítottan arányos a veszteségi tényezővel;
- fordítottan arányos a körfrekvenciával.

A fordított arányosság azt jelenti, hogy minél nagyobb az össztömeg, a veszteségi tényező, vagy a körfrekvencia, annál kisebb lesz a rezgésebbesség effektívérték-négyzetének felületi átlaga.

4.

KÖLCSÖNHATÁSOK

4.1. A kölcsönhatások értelmezése

Az épületakusztika hangszigeteléssel, zajcsökkentéssel kapcsolatos gyakorlati feladatainak lényege az, hogy egy határolószerveletbe a léghangtérből vagy közvetlen mechanikai kapcsolatokon keresztül teljesítmény érkezik, emiatt a szerkezetben rezgési tér alakul ki. Ez egyébként nem ritkán közvetlenül is tapasztalható, pl.:

- egy gép működésének hatására a gépet tartó szerkezet rezgésbe jön;
- egy szomszédos helyiségben nagy teljesítménnyel működő hangosítóberendezés hatására az elválasztószerveletek rezegni kezdenek.

A rezgő felületek maguk hangforrássá válnak, hangot sugároznak le a „csendes” oldalra. E folyamatban, ha csak a léghanggerjesztést nézzük, két kölcsönhatás alakul ki:

- a léghangtér és az „egyszerű esetben lemezként modellezhető” határolószervelet között a gerjesztés során;
- a rezgőlemez és a keletkező léghangtér között a hangsugárzás során.

A 4. fejezet egyik célja bemutatni e kölcsönhatások néhány példáját, mert ez a hangszigetelés egyik elméleti alapja.

Ha egy határolószerveletben külső hatás, teljesítménybevitel következtében rezgési tér jön létre, akkor e teljesítménynek egy része a gerjesztett szerkezetekhez csatlakozó szerkezetekbe továbbterjed. Kölcsönhatás ekkor a határolószerveletek között alakul ki, hiszen a teljesítmények áramlása során egyensúly jön létre. A kölcsönhatás más formája is megjelenik ez esetben: egy meghatározott hullámforma – pl. hajlítóhullám – hatására a peremkapcsolatoknál mind a visszaverődésben, mind az átvitelben több más hullámforma keletkezik. Legegyszerűbb esetben ezek a hajlító-, longitudinális és nyíróhullámok.

Általánosságban állítható, hogy az épületszerkezetek akusztikai viselkedésének elméleti alapjai e kölcsönhatások modellezésével fejthetők ki. Ugyan-

akkor a jelenségek nyomon követése gyakran vezet jól hasznosítható gondolatokra a zajcsökkentés területén. Ezért érdemes megismerni a kölcsönhatások modellezésének néhány példáját.

4.2. Hajlítórezgést végző lemez hullámimpedanciájának és sugárzási impedanciájának értelmezése [IV.7], [IV.8]

Az x - y síkban levő tetszőleges kiterjedésű, homogén lemezben hajlítóhullámok alakulnak ki. A rezgést létrehozó külső hatás a lemez két oldala közötti nyomáskülönbség, mely síkhullámokból tevődik össze, harmonikus függvénye az időnek. A lemez mozgásegyenlete a (3.188) alapján:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) v(x, y) - k_B^4 \cdot v(x, y) = \frac{j \cdot \omega}{B'} \cdot p(x, y) \quad (4.1)$$

$v(x, y)$ jelenti a lemez rezgésebbességét, amely a felületre merőleges, tehát z irányú, k_B a hullámszám, B' a homogén lemez hajlítómerevsége, $p(x, y)$ a lemez két oldala közötti nyomás helyfüggése, ω a körfrekvencia.

A nyomáskülönbség síkhullám vetületeként írható fel a (4.2) összefüggés szerint, $p(k_x, k_y)$ a hullámszámtól függő nyomáskülönbség-amplitúdó, egyúttal a nyomás hullámszám-tartományra meghatározott Fourier-transzformáltja a (4.3) összefüggés szerint. A fordított irányú transzformációt az egyértelműség kedvéért (4.4) képlet adja meg:

$$p(x, y) = p(k_x, k_y) \cdot e^{-i k_x \cdot x} \cdot e^{-i k_y \cdot y}; \quad (4.2)$$

$$p(k_x, k_y) = \iint p(x, y) \cdot e^{i k_x \cdot x} \cdot e^{i k_y \cdot y} dx dy; \quad (4.3)$$

$$p(x, y) = \frac{1}{4 \cdot \pi^2} \cdot \iint p(k_x, k_y) \cdot e^{-i k_x \cdot x} \cdot e^{-i k_y \cdot y} dk_x dk_y. \quad (4.4)$$

A (4.3)–(4.4) transzformáció pár matematikai alapja azonos az időtartomány – körfrekvencia tartomány közötti kapcsolatot létrehozó Fourier transzformációval, alkalmazásával a hullámterjedés helyfüggésének kifejezési módjaihoz lehet eljutni. A transzformáció párokban az időtartománynak a hely tartomány, a körfrekvencia tartománynak a hullámszám tartomány felel meg.

A nyomhullámok egyezése, mint peremfeltétel miatt – lásd részletesen a 2.2.5. részt – a rezgés sebesség z irányú összetevő-

je is felírható a (4.2) egyenlettel analóg formában, amint azt a (4.5) összefüggés bemutatja. A helyfüggést kifejező tagok a (2.43) összefüggés, valamint a folytonossági feltétel miatt egyeznek meg a nyomáskülönbség helyfüggésének kifejezésével.

$$v(x, y) = v(k_x, k_y) \cdot e^{-ik_x \cdot x} \cdot e^{-ik_y \cdot y}. \quad (4.5)$$

A nyomás és a rezgés sebesség hullámszámaira vonatkozó Fourier transzformáltjainak hányadosa lényegében fajlagos hullámimpedancia, $Z'(k_x, k_y)$, k_x és k_y függvénye, a lemez anyagjellemzőitől függ. A (4.6/a)–(4.6/b) egyenletekből határozható meg a (4.1), (4.2) és (4.5) összefüggések átrendezésével. Az impedancia fajlagos, mert a nyomás miatt egységnyi felületre vonatkozik, hullámimpedancia, mert a nyomás hullám és a sebesség hullám hányadosa. A (4.6/b) egyenlet a levegőben terjedő hang hullámszámának lemez síkra vonatkozó vetülete, k_x és k_y helyett a beesési szög, v és a térbeli hullámszám, k_0 segítségével adja meg a fajlagos hullámimpedancia értékét.

$$Z'_h(k_x, k_y) = \frac{p(k_x, k_y)}{v(k_x, k_y)} = i \cdot \omega \cdot m'' \left(1 - \left(\frac{k_x^2 + k_y^2}{k_B^2} \right)^2 \right); \quad (4.6a)$$

$$Z'_h = i \cdot \omega \cdot m'' \cdot \left(1 - \left(\frac{k_0 \cdot \sin(v)}{k_B} \right)^4 \right). \quad (4.6b)$$

A fajlagos hullámimpedancia tehát a külső gerjesztés – nyomás(különbség) hullám – és a hajlítórezgést végző lemez felületre merőleges rezgés sebessége, tehát a lemezben kialakuló hajlítóhullám rezgésebbessége közötti kapcsolatot jellemzi.

A lemez sugárzási impedanciája fordított irányú kapcsolatot számszerűsít. A hangteret a hajlítórezgést végző lemez gerjeszti, a hangnyomást közvetlenül a lemez felületénél kell meghatározni, a lemez síkjára merőleges, tehát z irányú rezgésebbesség pedig megegyezik a hangtér z irányú rezgésebbességével. A sugárzási impedancia elvi meghatározásához az előző modellhez hasonló modellből lehet kiindulni: a hangot sugárzó lemez szintén az x – y síkban helyezkedik el, felületre merőleges rezgésebbességét a (4.5) összefüggés adja meg. A keletkező hangtér x és y irányú hullámszámait a nyomhullámhosszak egyezése miatt szintén k_x és k_y lesznek, azaz megegyeznek a hajlítóhullám x és y irányú hullámszámaival. A z irányú hullámszám, k_z értékét a (4.7) egyenlet fejezi ki; k_0 a levegőben terjedő hanghullám hullámszámát jelenti. k_0 értékét a terjedési sebesség és a frekvencia meghatározza.

$$k_z^2 = k_0^2 - k_x^2 - k_y^2 \quad (4.7)$$

A folytonossági feltétel miatt a hanghullám x – y síkra merőleges rezgésebbesség összetevője a $z=0$ síkon, tehát az x – y síkon megegyezik a rezgő, hangot sugárzó felület rezgésebbességével. Ebből a (2.28) összefüggés alapján a közeget határon a $p_1(k_x, k_y)$ nyomáshullám amplitúdója meghatározható a hullámszám függvényében:

$$p_1(k_x, k_y) = \frac{\rho_L \cdot c \cdot k_0}{k_z} \cdot v(k_x, k_y). \quad (4.8a)$$

A nyomáshullám helyfüggését, $p(k_x, k_y, k_z)$ – síkhullám – a (4.8/b) összefüggés fejezi ki a hangot sugárzó lemezben kialakuló egy meghatározott hullámszám értékre:

$$p(k_x, k_y, k_z) = p_1(k_x, k_y) \cdot e^{-ik_x \cdot x} \cdot e^{-ik_y \cdot y} \cdot e^{-ik_z \cdot z}. \quad (4.8b)$$

Az eredő hanghullám a szuperpozíció tétele alapján a (4.9) összefüggéssel fejezhető ki. A szuperpozíció elve azért jelenik meg, mert a sugárzó lemezben mindenféle hullámhosszú, tehát hullámszámú hullám kialakulhat.

$$p(x, y, z) = \iint \frac{\rho_L \cdot c \cdot k_0}{k_z \cdot 4 \cdot \pi^2} \cdot v(k_x, k_y) \cdot e^{-ik_x \cdot x} \cdot e^{-ik_y \cdot y} \cdot e^{-ik_z \cdot z} dk_x dk_y. \quad (4.9)$$

A hangot keltő felületen kialakuló nyomásösszefüggés (4.8) és a felületre merőleges rezgésebbesség hányadosa a sugárzási impedancia hullámszámfüggő értékét, Z'_s -t adja meg:

$$Z'_s = \frac{\rho_L \cdot c \cdot k_0}{k_z}. \quad (4.10)$$

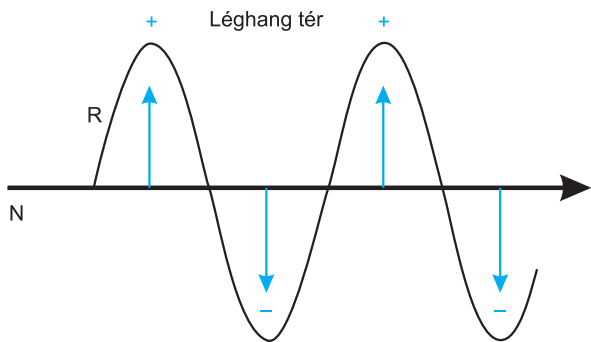
4.3. Határolószervezetek hangsugárzása

4.3.1. A határolószervezetek hangsugárzásának értelmezése

Mindennapi tapasztalataink szerint a szomszédos helyiségekben vagy épületen kívül működő hangforrásokat akkor is halljuk, ha a helyiség határolószervezetei tömörek, rések, átmenő nyílások nem található rajtuk. Ennek az az egyszerű oka, hogy bármely hangforrás a határolószervezeteket rezgésbe hozza, hajlítóhullámokat kelt. A rezgő felület pedig hangforrásként működik, a levegőben a légnyomáshoz képest kismértékű nyomásingadozásokat okoz, tehát hangot kelt. Ezt szemlélteti a 4.1. ábra. Az N nyugalmi helyzetben levő lemezként modellezhető szerkezetben külső gerjesztés hatására hajlítóhullám-terjedés alakul ki. Ezt az állapotot az R hullámvonal szemlélteti. A lemeznek az a része, amely a hangtér felé, előremozdul, nyomásnövekedést hoz létre, és ez a nyomásnövekedés a térben terjed. A hátrafelé mozgó lemez rész-nyomáscsökkenést okoz, ez pedig a nyomásnövekedés terjedését is befolyásolja. A hajlítóhullám hullámhossza a frekvenciának $1/\sqrt{x}$ jellegű, léghang hullámhossza a frekvenciának $1/x$ jellegű, tehát eltérő függvényei, – lásd a 2.2.2.–2.2.3., illetve a 3.10. részeket –, ezért várható, hogy a lemezek hangsugárzási tulajdonságai is frekvenciafüggők lesznek.

A frekvenciafüggő hangsugárzást több közelítéssel lehet vizsgálni, ezek az egyszerűtől az összetett modell irányában a jelenség más-más részletét világítják meg.

Lemezek hangsugárzásának hatékonysága több akusztikai mennyiséggel fejezhető ki. Általánosan elfogadott a σ sugárzási fok alkalmazása, melynek meghatározását a (4.11) összefüggés fejezi ki. A hajlítórezgést végző lemez felülete S , a rezgés sebesség effektív értékének felületi átlaga v_{eff} az elsu-



4.1. ábra. Hangsugárzás szemléltetése

N a nyugalmi helyzetben levő lemez; R hajlítórezgést végző lemez oldalnézete; + az előre mozgó lemezrész nyomásnövekedést okoz; – a hátra mozgó lemezrész nyomáscsökkenést okoz;

gázzott akusztikai teljesítmény W . A sugárzási fok tehát azt fejezi ki, hogy egy lemez által elsugárzott teljesítmény milyen mértékben lesz kisebb, mint egy olyan rezgő dugattyú által elsugárzott akusztikai teljesítmény, amelynek teljes felülete azonos fázisban és nagysággal mozog:

$$W = \rho_0 \cdot c \cdot S \cdot v_{\text{eff}}^2 \cdot \sigma. \quad (4.11)$$

A sugárzási fok legkisebb értéke 0, mindig pozitív. Bizonyos esetekben és bizonyos frekvenciák környezetében 1-nél nagyobb értéket is felvehet.

4.3.2. Végtelen lemez hangsugárzása [IV.8]

A hangsugárzási sajátosságok vizsgálatának kiindulása legyen a végtelen lemez, amelyben csillapodás nélkül, + végtelen irányban hajlítóhullám terjed. Az egyszerűbb ábrázolások érdekében a lemezben csak x irányú síkhullám halad, ezért a lemez inkább szalagnak nevezhető. A rezgésebbesség hely-

függését a (4.12) egyenlet fejezi ki (lásd a 3.10. részt). A lemez előtt kialakuló nyomásra szintén a hullámterjedés lesz jellemző, iránya részben párhuzamosan a lemez síkjával, tehát x irányú, részben pedig arra merőleges, z irányú. A (4.13) összefüggés is ezt tükrözi (a peremfeltételekről lásd részletesebben a 2.2.5. részt). A lemezben terjedő hajlítóhullám amplitúdója v_1 , a nyomáshullámé pedig p_1 . A frekvencia adott, a lemezben a hullámszám k_B , az anyagjellemzőktől függ, a levegőben a folytonossági peremfeltételek miatt az x irányban a hullámszám szintén k_B , z irányban pedig k_z , melynek értékét a folytonossági feltételekből lehet meghatározni.

$$v(x) = v_1 \cdot e^{-i k_B \cdot x}; \quad (4.12)$$

$$p(x, z) = p_1 \cdot e^{-i k_B \cdot x} \cdot e^{-i k_z \cdot z}. \quad (4.13)$$

Az elrendezés vázlata a 4.2. ábrán látható. A (4.13) összefüggésnek ki kell elégítenie a levegőre vonatkozó hullámegyenletet [(2.30) összefüggés] és a határfelületen a hang terjedési sebességének meg kell egyeznie a rezgő lemez normál irányú, tehát felületre merőleges sebességével. A két feltétel a léghang hullámszámára, k_0 , és a nyomás amplitúdójára, p_1 , a következő eredményre vezet:

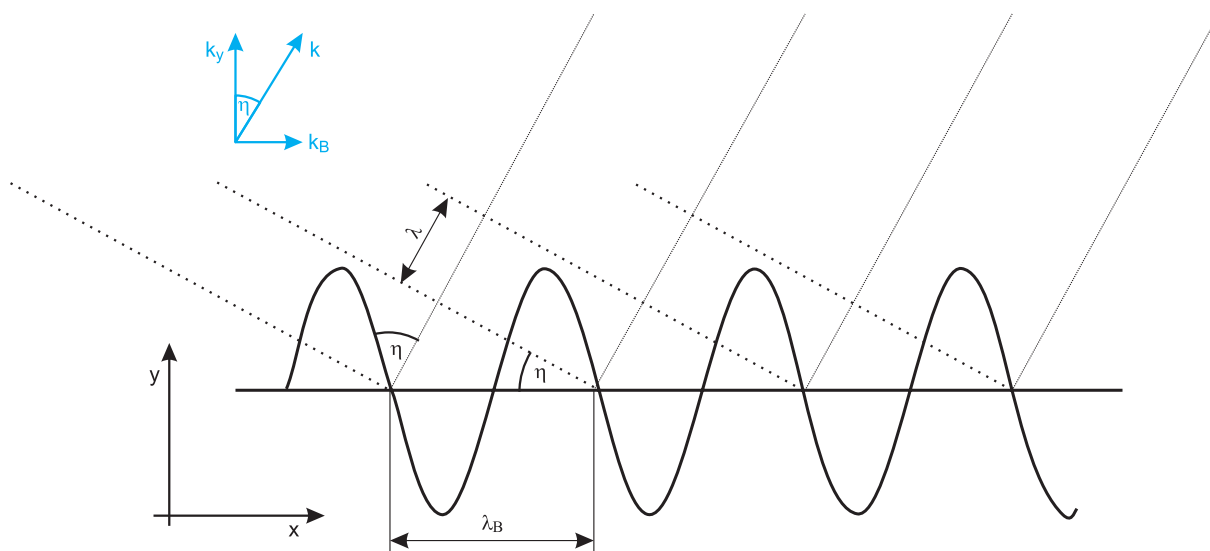
$$k_z^2 = k_0^2 - k_B^2 \quad (4.14)$$

$$p_1 = \frac{v_1 \cdot \rho_0 \cdot c_L}{\sqrt{1 - \frac{k_B^2}{k_0^2}}}. \quad (4.15)$$

A közeget határon felírandó peremfeltétel miatt a hullámszámok és hullámhosszak között a (4.16) összefüggés teremt kapcsolatot, η a léghangterjedés iránya a felületi normálhoz képest. Az összefüggés értelmezhető a levegőben terjedő hanghullám nyomhullámhosszána és a hajlítóhullám hullámhosszána egyezéseként is. A (4.16) és a (4.14) összefüggések összhangban vannak egymással:

$$\sin(\eta) = \frac{\lambda}{\lambda_B} = \frac{k_B}{k_0}. \quad (4.16)$$

A lemez sugárzása következtében kialakuló hangnyomás frekvencia jellege és értéke attól függ, hogy a levegőben ki-



4.2. ábra. Végtelen lemez hangsugárzása

alakuló hullámhossz és a lemez hajlítóhullámhossza hogyan viszonyul egymáshoz. Ha a levegőben kialakuló hullámhossz kisebb, mint a hajlítóhullám hullámhossza, akkor síkhullám jön létre, terjedési iránya a lemez felületi normálisához képest η szöget zár be:

$$p(x, z) = \frac{v_1 \cdot \rho_0 \cdot c}{\cos(\eta)} \cdot e^{-i k_B \cdot x} \cdot e^{-i k_0 \cdot \cos(\eta) \cdot z}, \text{ ha } \lambda_B > \lambda. \quad (4.17)$$

A közegethatáron a hangnyomás és a hajlítóhullám rezgés-sebessége azonos fázisban van, tehát van valóságos teljesítmény áramlás.

Ha a levegőben kialakuló hullám hullámhossza nagyobb, mint a hajlítóhullám hullámhossza, akkor a lemez mentén z irányban exponenciálisan erősen csillapodó köztér alakul ki, a lemez felületén a hangnyomás és a lemez rezgéssebessége között 90° fázis különbség keletkezik, tehát teljesítmény sugárzás nincs. Nem jön létre síkhullám, hiszen nincs olyan valós szög, amelyre a (4.16) összefüggés teljesülne a hullámhosszak közötti kapcsolat miatt.

$$p(x, y) = \frac{i \cdot v_1 \cdot \rho \cdot c}{\sqrt{\frac{k_B^2}{k_0^2} - 1}} \cdot e^{-i k_B \cdot x} \cdot e^{-\sqrt{k_B^2 - k_0^2} \cdot z}, \text{ ha } \lambda_B > \lambda. \quad (4.18)$$

Egységnyi felület által lesugárzott teljesítményt – intenzitást – a (4.19) összefüggés fejezi ki, mind a rezgő felületen kialakuló hangnyomás, mind a felület rezgéssebessége a vizsgált felületre vonatkozó átlagértékként szerepel. A kapott eredményt a (4.11) képlettel összevetve a $\lambda_B > \lambda$ tartományban, tehát a határfrekvencia felett a sugárzási fok értéke a (4.20) képlet szerint alakul.

$$I = p_{\text{eff}} \cdot v_{\text{eff}}^*; \quad (4.19)$$

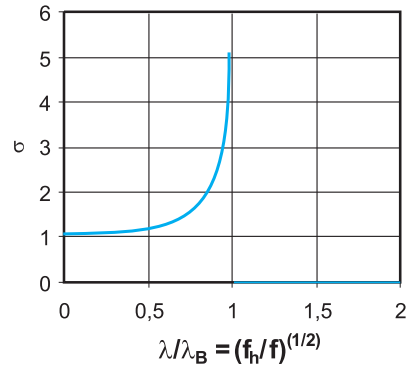
$$\sigma = \frac{1}{\cos(\eta)} = \frac{k_0}{\sqrt{k_0^2 - k_B^2}}, \text{ ha } \lambda_B > \lambda, \text{ ill. } k_B < k_0. \quad (4.20)$$

A $\lambda_B < \lambda$ tartományban a végtelen szalagban terjedő hajlítóhullám által elsugárzott teljesítmény 0, ezért a sugárzási fok értéke is 0 lesz.

A két tartomány között a határ az a hullámhossz, ahol a léghang hullámhossza éppen megegyezik a hajlítóhullám hullámhosszával. Ebben az határesetben a terjedés iránya párhuzamos a rezgő felülettel, tehát $\eta = 90^\circ$. Ismerve a vékony lemezekben terjedő hajlítóhullám hullámhosszának és a lemez anyagjellemzőinek – fajlagos tömeg m'' , fajlagos hajlítási merevség B' – összefüggését, a $\lambda_B = \lambda$ feltételhez tartozó frekvencia, a határfrekvencia, f_c a (4.21) összefüggés szerint fejezhető ki:

$$f_c = \frac{c^2}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{m''}{B'}}. \quad (4.21)$$

A végtelen hosszú lemez hangsugárzásának hatékonysága, tehát a sugárzási fok a lemezben kialakuló hajlítóhullám hullámhosszának, λ_B , és a levegőben kialakuló hullám hullámhosszának, λ -nak a viszonyától függ. Ha $\lambda_B > \lambda$, a sugárzási fok a (4.22) összefüggés szerint alakul. Ha $\lambda_B < \lambda$, akkor a végtelen hosszú rezgő lemez által elsugárzott teljesítmény 0, így a sugárzási fok is 0 értékű lesz. Az eredmény a 4.3. ábra grafikonján látható:



4.3. ábra. Végtelen kiterjedésű lemez sugárzási foka a hullámhosszak arányának vagy a határfrekvencia és a frekvencia arányának függvényében

mény 0, így a sugárzási fok is 0 értékű lesz. Az eredmény a 4.3. ábra grafikonján látható:

$$\sigma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{\lambda^2}{\lambda_B^2}}}. \quad (4.22)$$

A két tartomány közötti határt a $\lambda_B = \lambda$ feltétel fejezi ki. Az e feltételnek megfelelő frekvencia az f_c határfrekvencia, amelyet a (4.21) összefüggéssel kell meghatározni. A határfrekvenciához tartozó hullámhossz λ_h . Homogén, izotróp anyagok esetében, tehát ha az anyagjellemzők állandók, a lemez tömör, a (4.21) képlet tovább egyszerűsíthető. Így közvetlen kapcsolat teremthető a lemez h vastagsága, ρ átlagos testsűrűsége és E dinamikai rugalmassági modulusa, valamint a határfrekvencia között. A lemez Poisson-számát μ , a hangterjedési sebességet levegőben c jelöli:

$$f_c = \frac{c^2}{2 \cdot \pi \cdot h} \cdot \sqrt{\frac{12 \cdot (1 - \mu^2) \cdot \rho}{E}}. \quad (4.23)$$

Az összefüggés két alapvető tendenciát tükröz:

- minél merevebb egy lemez – minél vastagabb, ill. minél nagyobb a rugalmassági modulusa – annál kisebb számértékű lesz a határfrekvenciája;
- minél sűrűbb, tömörebb anyagból készül egy lemez – tehát minél nagyobb a testsűrűsége –, annál magasabban lesz a határfrekvenciája.

A határfrekvencia fogalmának bevezetésével a hangsugárzás tendenciája a frekvenciatartományra is megfogalmazható: a határfrekvencia feletti frekvenciatartományban a hajlítórezgést végző lemez sugárzási foka egynél nagyobb. A határfrekvencia alatt a végtelen lemez nem sugároz hangot. Ez utóbbi állítás azonban a gyakorlati tapasztalatokkal üt-

közik, és ezért a modell további finomítására, azaz a hangszárgázás jelenségeinek további elemzésére volt szükség.

4.3.3. Pontszerűen vagy vonalszerűen gerjesztett, végtelen kiterjedésű, veszteségmentes lemez hangszárgázása [IV.8]

A többhjú épületszerkezetekben az egyes héjak közötti kapcsolatok modellezése során a pontszerű kapcsolat – részben azért, mert a valóságot jól közelíti, részben mert viszonylag egyszerűen kezelhető – hatásának vizsgálata nagyon fontos. Ezért a 4.3.3. rész ennek elemzésével foglalkozik.

A pontszerűen gerjesztett, végtelen kiterjedésű lemezre ható eredő nyomás, p_e két részből áll, ezeknek különbsége: a gerjesztésből, jele p_g és a közeg visszahatásából, jele p_s . Az eredő nyomás és a lemez rezgése sebessége között a kapcsolatot a (4.6) összefüggés fejezi ki. A közeg visszahatása pedig a sugárzási impedanciával van kapcsolatban a (4.10) összefüggés szerint. Így a gerjesztőnyomás és a lemez rezgése sebessége közötti kapcsolatot a (4.24) képlet adja meg a hullámszám-tartományban:

$$p_g(k_x, k_y) = v(k_x, k_y) \cdot (Z'_s(k_x, k_y) + Z'_h(k_x, k_y)). \quad (4.24)$$

Általában a sugárzás következtében létrejövő síkhullám hangnyomása a (4.9) képlettel határozható meg a hely függvényében, az összefüggésbe a (4.24) képletnek megfelelően a gerjesztési nyomás behelyettesíthető. Az egy oldalra elsugárzott teljesítmény kiszámításához a komplex felírási módot alkalmazva a (4.25a) és (4.25b) összefüggéshez lehet jutni:

$$W = \frac{1}{8 \cdot \pi^2} \cdot \iint \operatorname{Re}\{Z'_s\} \cdot |v(k_x, k_y)|^2 dk_x dk_y; \quad (4.25a)$$

$$W = \frac{1}{8 \cdot \pi^2} \cdot \iint \operatorname{Re}\{Z'_s\} \cdot \left| \frac{p_g(k_x, k_y)}{Z'_s + Z'_h} \right|^2 dk_x dk_y. \quad (4.25b)$$

A pontszerű gerjesztést célszerű az $x=y=0$ helyen felvenni, nagysága, azaz amplitúdója F_0 :

$$p(k_x, k_y) = F_0. \quad (4.26)$$

Az elsugárzott teljesítmény kiszámításához segítséget nyújt, ha a munka polár-koordináta-rendszerben folytatódik, a következő helyettesítésekkel:

$$k_x = k_r \cdot \cos(\vartheta); \quad (4.27a)$$

$$k_y = k_r \cdot \sin(\vartheta); \quad (4.27b)$$

$$dk_x dk_y = k_r \cdot dk_r \cdot d\vartheta. \quad (4.27c)$$

A helyettesítéseket elvégezve a további vizsgálatot a jóval a határfrekvencia alatti tartományra elegendő korlátozni, ahol a lemezben kialakuló hullámszám, k_B sokkal nagyobb, mint a levegőben terjedő hang hullámszáma, k_0 :

$$W = \frac{F_0^2}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{\rho_L}{c \cdot m''} \cdot \left(1 - \frac{\rho_L \cdot c}{\omega \cdot m''} \cdot \arctg \left(\frac{\omega \cdot m''}{\rho_L \cdot c} \right) \right), \text{ ha } f \ll f_h. \quad (4.28a)$$

További egyszerűsítésre ad lehetőséget az, hogy az épület-akusztikai feladatokban a határoló szerkezetek tömegimpedanciája sokkal nagyobb, mint a levegő karakterisztikus hullámimpedanciája. Végül a pontszerűen gerjesztett, végtelen lemez által egy oldalra elsugárzott akusztikai teljesítményt a (4.28b) képlet adja meg, ha a gerjesztőerő ismert, a (4.28c) képlet pedig a gerjesztési pont sebességamplitúdójával, v_0 -val számol. F_0 és v_0 között a (3.192) képlet teremt kapcsolatot:

$$W = F_0^2 \cdot \frac{\rho_L}{4 \cdot \pi \cdot m''^2 \cdot c}; \quad (4.28b)$$

$$W = \frac{4}{\pi^3} \cdot \rho_L \cdot c \cdot v_0^2 \cdot \lambda_h^2. \quad (4.28c)$$

Azonos elvi alapon határozható meg az elsugárzott akusztikai teljesítmény abban az esetben, ha a rezgést nem pontszerű, hanem kisméretű, r sugarú körön oszlik el. A kör sugara olyan kicsiny, hogy a vizsgált frekvencia tartományban teljesül a (4.29) feltétel, amelyben a frekvenciafüggő tagot a levegőben terjedő hanghullám hullámszáma, k_0 jelenti:

$$k_0 \cdot r \ll 1. \quad (4.29)$$

E feltétellel az elsugárzott teljesítményt ismert gerjesztési sebesség, v_0 esetén a (4.30) összefüggés fejezi ki:

$$W = \frac{\rho_L \cdot c \cdot \pi}{4} \cdot k_0^2 \cdot v_0^2 \cdot \left(r + \frac{\lambda_B}{4} \right)^4. \quad (4.30)$$

A szerkezeti kapcsolatok modellezése során a nyomatékgerjesztés vizsgálata szintén érdekes lehet. A nyomatékgerjesztést erőpárral lehet leírni: az erőpárt alkotó két erő nagysága $+$ és $-F_0/2$, távolságuk a . A (4.28a) összefüggés értelmezési tartományában az elsugárzott teljesítményt a (4.31) összefüggés fejezi ki:

$$W = \frac{F_0^2 \cdot \rho_L \cdot k_0^2 \cdot a^2}{12 \cdot \pi \cdot m''^2 \cdot c}. \quad (4.31)$$

A vonalszerű gerjesztés az előzőekkel analóg módon határozható meg. A vonalszerűen gerjesztett, egy oldalra hangot sugárzó, végtelen kiterjedésű lemez által lesugárzott akusztikai teljesítményt a (4.32) képlet adja meg, l egy hanghíd hosszát jelöli, a gerjesztési vonal mentén a rezgési sebesség állandó, nagysága v_0 :

$$W = \frac{\rho_L \cdot c \cdot l \cdot \lambda_h}{\pi} \cdot v_0^2. \quad (4.32)$$

A pontszerűen, vonal mentén vagy kisméretű körön keresztül erővel, nyomatékval vagy sebességkényszerrel gerjesztett, végtelen kiterjedésű lemez a határfrekvencia alatt is hangot sugároz. Az egy oldalra elsugárzott akusztikai teljesítményt a (4.28), (4.30)–(4.32) összefüggések határozzák meg. A sugárzás a gerjesztés helye környezetében kialakuló közeltéri hatás következtében jön létre, hiszen a végtelen kiterjedésű lemez önmagában a határfrekvencia alatt nem sugároz hangot. Az elsugárzott teljesítmény minden esetben arányos a forrás jellemző négyzetével és arányos a határfrekvenciához tartozó hullámhosszal. Egyes esetekben a vizsgált tartományban nem tapasztalható frekvenciafüggés, más esetekben azonban akár négyzetes frekvencia-

függés alakul ki. Ez mindig a gerjesztés módjától függ.

A határfrekvencia felett – tekintettel arra, hogy a lemez veszteségmentes – az összes bevitt teljesítmény elsugárzódik.

4.3.4. Véges kiterjedésű, veszteséges lemez hangsugárzása [4.1], [4.2]

A választott modell alapjáról általánosságban a 2.2.8. pontban volt szó. A feladat megoldásához a modell végtelen kiterjedésű, merev falban található L_x, L_y méretű lemez, amely hajlítózregést végez. Az egyszerűség kedvéért a peremek mentén egyszerű alátámasztás szabályozza a mozgást: elmozdulás nem lehetséges, szögelfordulás azonban igen. A vizsgált gerjesztés pontszerű erő vagy nyomaték, vonalszerű erő vagy nyomaték, vagy zárt helyiségben kialakuló hangtér lehet. A lemez veszteségét a veszteséges rugalmassági modulus fejezi ki a 3.12.3. pontban adottaknak megfelelően. A 2.2.8. pontban a hangsugárzásra általánosan meghatározott összefüggés egyszerűen módosítható úgy, hogy a hangnyomást a sugárzó lemez távolterében fejezze ki, tehát a lemez méreteihez képest a lemeztől mért távolság nagy legyen.

A lemez és egy tetszőleges térbeli pont közötti R távolság sokkal nagyobb, mint a lemez méretei. A pont koordinátái polárkoordinátákkal kifejezve R, φ, θ . Ebben az esetben a hangnyomás értékét a (4.33) összefüggés fejezi ki, feltéve, hogy a lemez csak egy oldalra sugároz:

$$p(R, \varphi, \theta) = \frac{i \cdot \omega \cdot \rho_L}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{e^{-i \cdot k \cdot r}}{R} \cdot \iint_{x, y} v(x, y) \cdot e^{-i \cdot k \cdot x \sin(\theta) \cos(\varphi)} \cdot e^{-i \cdot k \cdot y \sin(\theta) \sin(\varphi)} dx dy. \quad (4.33)$$

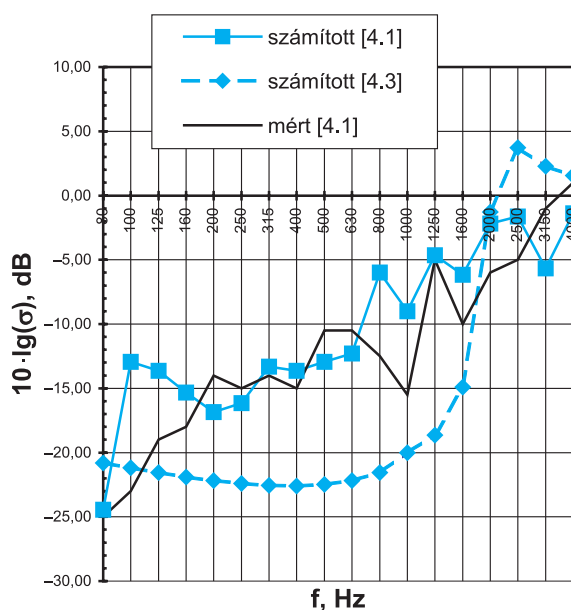
Az elsugárzott teljesítményt polár-koordinátarendszerben kifejezve:

$$W_{rad} = \int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi/2} \frac{|p|^2}{\rho_L \cdot c} \cdot R^2 \cdot \sin(\theta) d\theta d\varphi. \quad (4.34)$$

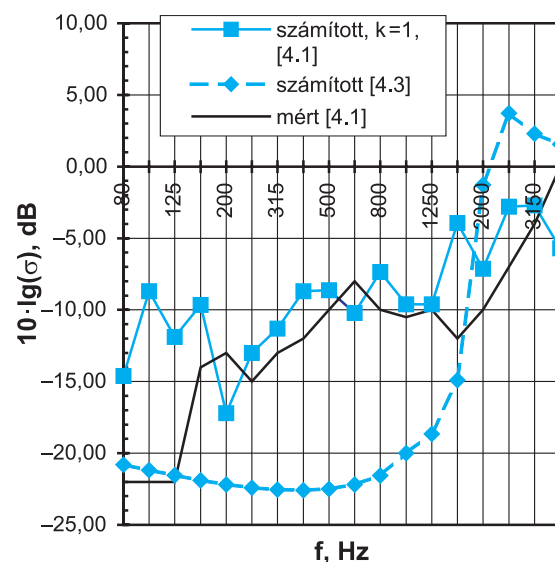
A rezgéssebesség felületi átlagát (3.180d) képlet adta meg. A sugárzási fokot a (4.11) definíciós összefüggésből lehet kiszámítani.

A részletes elemzés ugyanazt a tendenciát fedte fel, amit más megközelítésből [4.3] korábban levezetett: a hangsugárzás szempontjából a legfontosabbak a páratlan – páratlan rezgési módusok. A páros indexű módusok rezgésformájában akusztikus rövidzár alakul ki, ezért a sugárzás hatékonysága csekély. A [4.3]-ban levezetett összefüggés összehasonlítás-ként szerepel a 4.4.–4.6. ábrákon.

A gerjesztés módjának egyébként a pontszerű és vonalszerű gerjesztéseknél nincs erős, tendencia jellegű hatása, a kísérleti munkában a pontszerű nyomatéki gerjesztés bizonyult a legjobban realizálhatónak. Az erőgerjesztésnél – belátható



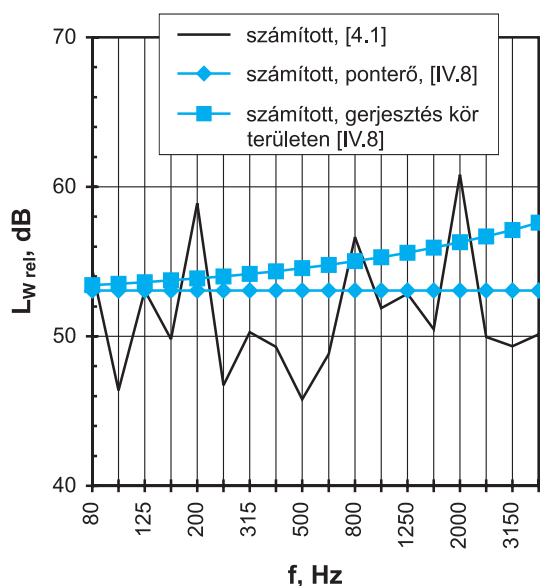
4.4. ábra. Sugárzási fok pontszerű nyomatéki gerjesztés esetén



4.5. ábra. Sugárzási fok vonalszerű erőgerjesztéssel

okok miatt – a gerjesztés környezetében kialakuló közelítéri hatás erősebb, mint a nyomatéki gerjesztésnél.

A 4.4.–4.6. ábrán ismert méretű 1,25 cm vastag gipszkarton lemez hangsugárzásának példái láthatók. A 4.4. ábrán pontszerű, nyomatéki gerjesztés számítási és mérési eredménye, valamint Maidanik képletével [4.3] számolt eredmény szerepel. A 4.5. ábra a vonalmenti erőgerjesztéssel meghatározott sugárzási fok számított és mért eredményeit mutatja be. A 4.6. ábra a [4.1]-ben található kísérlet alapján végzett hangteljesítmény-számítás eredményeit hasonlítja össze a (4.28b) és (4.30) összefüggésekkel számított teljesítménnyel. Látható, hogy a végtelen lemezzel számított eredmények tendencia jelleggel ugyanazt az eredményt adják, mint a részletes számítás eredményei.



4.6. ábra. Erővel gerjesztett lemez által lesugárzott teljesítmény

A lesugárzott teljesítmény meghatározása tovább finomítható, a lemezben kialakuló rezgési teret a gerjesztés környezetében kialakuló közzeltérre és hajlítóhullámú diffúz rezgési térre bontják. Ha a gerjesztést pontszerű erő hozza létre, akkor a lesugárzott teljesítményt a (4.35) összefüggés fejezi ki. Az összegzés első tagja (4.28) képlettel egyezik meg, a második taghoz a sugárzási fok pl. [4.3] összefüggése alapján határozható meg. A képletben $\underline{v}$ a hangot sugárzó felület átlagos rezgése sebessége (effektív érték, felületi átlag):

$$W = F_0^2 \cdot \frac{\rho_L}{4 \cdot \pi \cdot m^2 \cdot c} + \rho_L \cdot c \cdot S \cdot \underline{v}^2 \cdot \sigma. \quad (4.35)$$

A gerjesztés által létrehozott kényszer eredményezi azt, hogy a zárt térből (diffúz hangtér) gerjesztett lemez sugárzási foka a határfrekvencia alatt nagyobb, mint az egyes módusok hatásának figyelembevételével számított sugárzási fok. Ennek az az oka, hogy a léhanggerjesztés a levegőben terjedő hang hullámhosszával egyező hajlítóhullámot hoz létre a lemezben, amelyhez tartozó hajlítóhullám sugárzási foka 1 lesz. Ezt a vékony lemezek által lesugárzott teljesítmény mérés meghatározása során figyelembe kell venni [4.2]. A jelenség kéthéjű szerkezeteknél is megfigyelhető.

A véges kiterjedésű lemezek hangsugárzásának legfontosabb összetevője a páratlan – páratlan módusok hangsugárzása. A gerjesztés helyének és módjának tendencia jellegű hatása nincs, de a részletes, frekvenciafüggő eredményeket e tényezők befolyásolják. A pontszerű erővel gerjesztett végtelen lemez által lesugárzott teljesítmény tendencia jelleggel ugyanazt az eredményt adja, mint a részletes, frekvenciafüggő számítás. A léhangtérből gerjesztett lemez sugárzási foka mindig nagyobb, mint a test-

hanggerjesztés hatására kialakuló sugárzási fok, mert a léhangtér felé létrejövő kényszerkapcsolat miatt a lemezben olyan hajlítóhullám is létrejön, amelynek hullámhossza megegyezik a léhang nyomhullámhosszával.

4.4. Homogén, egyhéjű szerkezetek léhanggátlásának közelítései

4.4.1. Az áttekintés céljai

A homogén, lemez jellegű, egyhéjű szerkezetek léhanggátlását leíró különböző modellek és sajátosságok áttekintése jól ismert, és egyszerű példákön keresztül a léhangszigetelés néhány alapvető sajátosságát fogja bemutatni. E sajátosságok megismerése a hangszigetelés tervezésének gyakorlata szempontjából fontos és hasznos következtetések levonását alapozza meg.

Azon szerkezeteket, amelyek hangszigetelését az egyes részek tárgyalják, gyakran lemez jellegűnek tekintik a levezetések. A lemez jellegű kitétel arra utal, hogy a modellekben a teret ketté osztó szerkezet vastagsága a többi méretnél sokkal kisebb. Az egyhéjű megkülönböztetés arra utal, hogy a szerkezet két oldalán a rezgése sebesség a teljes frekvenciatartományban megegyezik. A homogén jelző azt fejezi ki, hogy a modellben a lemez jellegű szerkezet anyagjellemzői, tehát a vastagsága, rugalmasági modulusa, testsűrűsége és veszteségi tényezője a teljes felületen azonos lesz.

A szakirodalom e szerkezet hanggátlásának leírására számos megoldást ismert, amelyek a valóság egyik-másik elemét veszik jobban figyelembe. E modellek a megismerés folyamatában egymásra épültek. Ezért az áttekintés a sok lehetőség közül azokból válogatott, amelyek az alapvető hanggátlási sajátosságokat meglehetősen világosan mutatják be.

Szavakban, minőségileg kifejezve a vizsgált szerkezeten keresztül a hangterjedés a következő lépésekben jön létre:

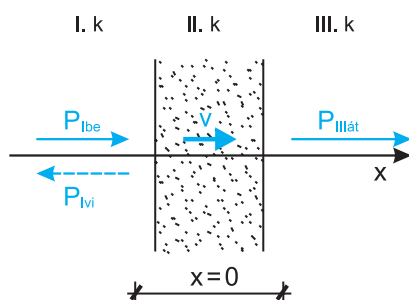
- a szerkezet egyik oldala felől beérkező hanghullám a szerkezetnek teljesítményt ad át, tehát rezgésbe hozza azt;
- a szerkezetbe bevitt teljesítmény egy része a belső veszteségek miatt hővé alakul, egy része a csatlakozó más szerkezetek miatt eltávozik e szerkezetből;
- a vékony lemez jelleg miatt a szerkezet két oldala azonos amplitúdóval rezeg;
- a rezgő felület hangot sugároz le a szerkezet másik oldalára.

4.4.2. A legegyszerűbb közelítés

A legegyszerűbb közelítés a következő elemekből épül fel:

- a szerkezet ideálisan vékony, de tömeggel rendelkező merev lemez, amely teljes felületén azonos fázisban és azonos amplitúdóval rezeg;
- a „zajos” oldal felől a léghang a felületre merőleges síkhullám formájában érkezik a felületre;
- a „csendes” oldalon síkhullám keletkezik, amely a szerkezettől eltávolodik.

A rendszer tehát három közegből áll, I. jelöli a „zajos” oldal hangterét, II. jelöli a lemez jellegű szerkezetet, és III. jelöli a „csendes” oldal hangterét. Az ideálisan vékony lemez, az $x = 0$ helyen található. A mennyiségi viszonyokat a 2.2.4. pont alapján írjuk fel, a modell vázlata a 4.7. ábrán látható. Az I. közegben $-\infty$ irányból a lemez teljes felületére síkhullám érkezik, jele p_{Ibe} , a lemez rezgése teljes felületen síkhullámot kelt, amely a III. közegben $+\infty$ irányban terjed, jele $p_{IIIát}$. A hullámamplitúdókat az 1 index jelöli. Mindkét hullám a hely függvénye.



4.7. ábra. Léghanggátlási szám meghatározásának modellje merőleges beesési szög esetén.

p_{Ibe} a beeső síkhullám; p_{Ivi} a visszavert síkhullám;
 $p_{IIIát}$ a III. közegbe átvitt síkhullám; k közeg

Felhasználva a 2.2.4.-ben már ismertetetteket, a soron következő egyenletekből az időfüggő részt elhagyva és a komplex írásmódot választva az I. közegben $+x$ irányban terjedő síkhullám egyenletét a (4.36), a visszavert, tehát $-x$ irányba terjedő hullám egyenletét (4.37), III. közegben szintén $+x$ irányban terjedő hullám egyenletét (4.38) mutatja be. p_{Ibe} , p_{Ivi} és $p_{IIIát}$ a megfelelő hullámok helyfüggő kifejezése, k a hullám-szám, az 1 index jelöli az amplitúdót. r jelöli a reflexió tényezőt, t pedig az átviteli tényezőt. Az I. közegben kialakuló eredő hanghullám, p_{Ier} a beeső és visszavert hullám összege:

$$p_{Ibe}(x) = p_{Ibe1} \cdot e^{-i \cdot k \cdot x}, \quad (4.36)$$

$$p_{Ivi}(x) = p_{Ivi1} \cdot e^{i \cdot k \cdot x} = p_{Ibe1} \cdot r \cdot e^{i \cdot k \cdot x}, \quad (4.37)$$

$$p_{IIIát}(x) = p_{IIIát1} \cdot e^{-i \cdot k \cdot x} = p_{Ibe1} \cdot t \cdot e^{-i \cdot k \cdot x}, \quad (4.38)$$

$$p_{Ier}(x) = p_{Ibe}(x) + p_{Ivi}(x). \quad (4.39)$$

A síkhullámokhoz tartozó, a levegő részecskéinek rezgését kifejező rezgésebességet általában a (2.43) összefüggés alapján lehet meghatározni, amely minden időpontban teljesül, tehát a csúcsertékre és az effektív értékre is igaz. Így az I. és II. közeg határán, $x = 0$ helyen a hanghullámhoz tartozó rezgésebesség amplitúdóját a (4.40)., míg a III. közeg határán, szintén $x = 0$ helyen a (4.41) képlet adja meg:

$$v_I(x=0) = \frac{p_{Ibe1} \cdot (-1+r)}{\rho_L \cdot c}, \quad (4.40)$$

$$v_{III}(x=0) = \frac{-p_{Ibe1} \cdot t}{\rho_L \cdot c}. \quad (4.41)$$

A közegethatárokon a folytonossági feltétel miatt mindhárom közegben az x irányú rezgésebesség egyenlő lesz a (4.42) szerint. A II. közeg mozgásának dinamikai feltétele Newton II. törvénye alapján írható fel az egységnyi felületű, m'' fajlagos tömegű lemezre:

$$v_I(x=0) = v_{II}(x=0) = v_{III}(x=0); \quad (4.42)$$

$$p_{Ier}(x=0) - p_{Ivi}(x=0) = i \cdot \omega \cdot m'' \cdot v_{II}(x=0). \quad (4.43)$$

Az egyenleteket a reflexió tényezőre, r -re és az átviteli tényezőre, t -re meg lehet oldani, így minden további mennyiség meghatározható.

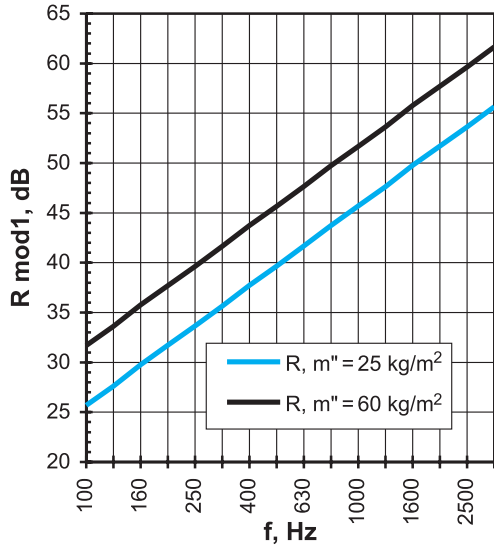
A 2.2.4.-ben már alkalmazott megoldást e három elemről álló rendszerre is végigkövetve a számszerű viszonyok meghatározhatók. A modellszerkezet léghangszigetelésére a beeső síkhullám által szállított akusztikai teljesítmény, W_{Ibe} és az átvitt síkhullám, $W_{IIIát}$ által szállított akusztikai teljesítmény abszolút értékeinek aránya a jellemző. Ezt az arányt lég-hanggátlási számnak nevezik, jele R , mértékegysége dB. Mindkét teljesítmény a hangnyomás amplitúdó-négyzetével arányos.

$$R = 10 \cdot \lg \left(\frac{|p_{Ibe1}|^2}{|p_{IIIát1}|^2} \right) = 20 \cdot \lg \left(\frac{\omega \cdot m''}{\rho_L \cdot c} \right). \quad (4.44)$$

Az összefüggés tendenciái:

- a fajlagos tömeg növelésével a léghanggátlás nő, ha a tömeg kétszeresére nő, a hanggátlás 6 dB-lel nagyobb lesz;
- a frekvencia növekedtével a léghanggátlás nő, a kétszeres frekvenciához tartozó növekedés mértéke 6 dB.

A tendenciákat a 4.8. ábra számpéldákon is bemutatja. Az a tény, hogy a lemez fajlagos tömegének növelése a léghanggátlás növekedését eredményezi, nem idegen az építészeti szigetelések világától, hiszen a tömeggel szigetelés elve más szigetelési feladatokban is megjelenő lehetőség.



4.8. ábra. Léhanggátlási szám a frekvencia függvényében, ha a lemez végtelen kiterjedésű, merev, teljes felületén azonos fázisban rezeg

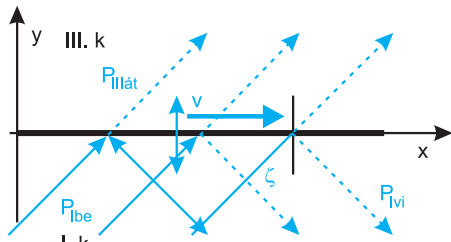
4.4.3. Hajlítórezgést végző lemez léhanggátlása [IV.8]

Az előző modellhez képest a továbblépés alapvetően két tényezőben jelenik meg:

- a teret két részre osztó lemezben hajlítóhullám terjed a gerjesztés, tehát az I. közegből érkező hanghullám hatására; a lemez anyagjellemzői ennek megfelelően a vastagság h , a testsűrűség ρ , a dinamikai rugalmassági modulus E ;

- a gerjesztést létrehozó hanghullám a felületi normálisához képest ζ szög alatt érkezik a lemezhez.

A modell további elemeiben változás nincs, tehát a lemez szintén végtelen kiterjedésű, homogén. Az elrendezés vázlata a 4.9. ábrán látható.



4.9. ábra. Modell végtelen kiterjedésű lemez léhanggátlásának meghatározásához, ha a beesési szög nem merőleges

p_{Ibe} a beeső síkhullám; p_{Ivi} a visszavert síkhullám; p_{IIIat} a III. közegben terjedő, átvitt síkhullám; v a hajlító rezgés terjedési iránya; ζ beesési szög; L végtelen kiterjedésű lemez; $I. k$ 1. közeg; $III. k$ 3. közeg

A beeső síkhullám, $p_{Ibe} + y$ és $+x$ irányban terjed. A visszavert hullám, p_{Ivi} terjedési iránya $-y$ és $+x$, az átvitt hullám, p_{IIIat} terjedési iránya szintén $+y$ és $+x$. Az I. közegben az eredő

hullám, p_{Ier} , két síkhullám, p_{Ibe} és p_{Ivi} összege. A levegő részecskéi rezgésebbességének a II. közeg síkjára merőleges összetevőjét kell meghatározni az I. és III. közeg határán, tehát az $y = 0$ helyen, jelük v_I és v_{III} . A számítást ismét (2.43) alapján kell elvégezni. A ferde beesési szög miatt a helyfüggés kifejezésében, amint már a 2.2.5.-ben is, az iránykoszinuszok és irányiszinusok is megjelennek, amelyekkel a hullámszám tengelyirányú vetületét ki lehet fejezni. Mind a visszaverési tényező, r_ζ , mind az átviteli tényező, t_ζ a beesési szögtől is függ:

$$p_{Ibe}(x, y) = p_{Ibe} \cdot e^{-i \cdot k \cdot y \cdot \cos(\zeta)} \cdot e^{-i \cdot k \cdot x \cdot \sin(\zeta)}; \quad (4.45)$$

$$p_{Ivi}(x, y) = r_\zeta \cdot p_{Ibe} \cdot e^{i \cdot k \cdot y \cdot \cos(\zeta)} \cdot e^{-i \cdot k \cdot x \cdot \sin(\zeta)}; \quad (4.46)$$

$$p_{III}(x, y) = t_\zeta \cdot p_{Ibe} \cdot e^{-i \cdot k \cdot y \cdot \cos(\zeta)} \cdot e^{-i \cdot k \cdot x \cdot \sin(\zeta)}; \quad (4.47)$$

$$p_{Ier} = p_{Ibe} + p_{Ivi}; \quad (4.48)$$

$$\begin{aligned} v_I &= \frac{i}{k \cdot \rho_L \cdot c} \cdot \frac{\partial p_{Ier}(y=0)}{\partial y} = \\ &= \frac{p_{Ibe} \cdot \cos \zeta}{\rho_L \cdot c} \cdot (1 - r_\zeta) \cdot e^{-i \cdot k \cdot x \cdot \sin \zeta}; \end{aligned} \quad (4.49)$$

$$\begin{aligned} v_{III} &= \frac{i}{k \cdot \rho_L \cdot c} \cdot \frac{\partial p_{III}(y=0)}{\partial y} = \\ &= \frac{p_{Ibe} \cdot t_\zeta \cdot \cos \zeta}{\rho_L \cdot c} \cdot (1 - r_\zeta) \cdot e^{-i \cdot k \cdot x \cdot \sin \zeta}. \end{aligned} \quad (4.50)$$

A lemez felületre merőleges rezgésebbessége, v_{II} és a három nyomásösszetevő eredőjeként létrejövő gerjesztőnyomás hányadosa a II. közeg, azaz a vizsgált lemez hullámimpedanciája, $Z_{T\zeta}$, l. a 4.2. alfejezetet:

$$Z_{T\zeta} = \frac{p_{Ibe}(y=0) + p_{Ivi}(y=0) - p_{IIIat}(y=0)}{v_{II}}. \quad (4.51)$$

A folytonossági feltételek az I. és II., ill. a II. és III. közegek határán az y irányú, tehát a közegekhatárra merőleges sebességek egyenlőségét jelentik, pl. az I. és II. közeg határán ez a következő egyenletre vezet:

$$\begin{aligned} \frac{p_{Ibe} \cdot \cos \zeta \cdot (1 - r)}{\rho_L \cdot c} &= \\ &= \frac{p_{Ibe}(y=0) + p_{Ivi}(y=0) - p_{IIIat}(y=0)}{Z_{T\zeta}}. \end{aligned} \quad (4.52)$$

A két folytonossági egyenletet a visszaverődési tényezőre és az átviteli tényezőre megoldva bármilyen további mennyiség már kiszámítható.

A lemez léhanggátlási száma a lemez felületére ferde irányból érkező hanghullám (síkhullám), $W_{bel}(\zeta)$ által szállított akusztikai teljesítmény és a másik oldalra lesugárzott akusztikai teljesítmény, $W_{át}(\zeta)$ hányadosa:

$$R = 10 \cdot \lg \frac{W_{bel}(\zeta)}{W_{át}(\zeta)} = 20 \cdot \lg \left| 1 + \frac{Z_{T\zeta} \cdot \cos(\zeta)}{2 \cdot \rho_L \cdot c} \right|. \quad (4.53a)$$

Ha a frekvencia a határfrekvenciánál sokkal kisebb, a léhanggátlási szám egyszerűbb alakot ölt:

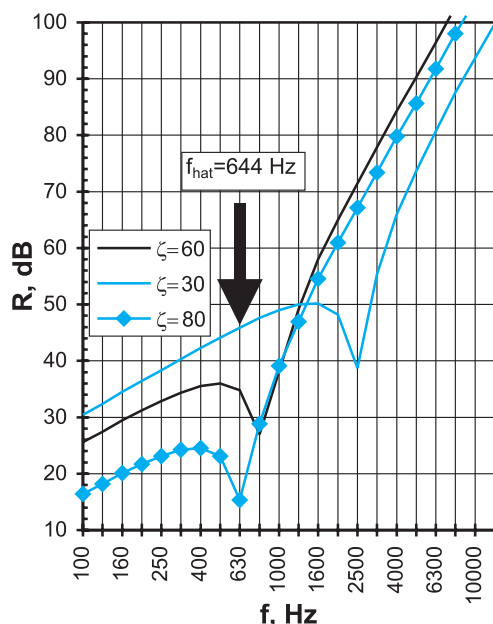
$$R \approx 20 \cdot \lg \left(\frac{\omega \cdot m'' \cdot \cos(\zeta)}{2 \cdot \rho_L \cdot c} \right). \quad (4.53b)$$

Az összefüggés a fajlagos tömegre és a frekvenciára az előző összefüggéssel azonos tendenciát mutat:

- a fajlagos tömeg növelése a határfrekvencia alatt megnöveli a léghanggátlási számot, a növekedés mértéke 6 dB/kétszeres fajlagos tömeg;
- a léghanggátlási szám a frekvencia növekedtével nő, kétszeres frekvenciához szintén 6 dB hanggátlás-növekedés tartozik;
- a határfrekvencia alatt a léghanggátlási szám a beesési szögtől is függ: minél nagyobb a hanghullám beesési szöge, annál kisebb a léghanggátlási szám.

A határfrekvencia felett a (4.53a) összefüggés a frekvencia függvényében gyors hanggátlás-növekedést ígér. Ezt azonban a gyakorlat nem támasztja alá. Ugyanakkor az is megfigyelhető, hogy a határfrekvencia környezetében erős csökkenés alakul ki. A valóságban a helyiségek közötti szerkezet felületére sok irányból érkezik hanghullám, így a határfrekvencia felett sok irányból és frekvencián kialakulhat a léghanghullám nyomhullámhosszána és a hajlítóhullám hullámhosszána megegyezése.

A tendenciákat számpéldán a 4.10. ábra mutatja. A számított hanggátlás 20 mm vastag üvegtáblára vonatkozik, melynek sűrűsége 2500 kg/m^3 , rugalmassági modulusa $6 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$, így határfrekvenciája 645 Hz. Az ábrán a felsorolt tendenciákon túl megfigyelhető az is, hogy a levegőben terjedő síkhullám nyomhullámhossza a beesési szög növekedtével egyre kisebb frekvencián egyezik meg a hajlítóhullám hullámhosszával. Az egyezést a hanggátlás hirtelen erős csökkenése jelzi.



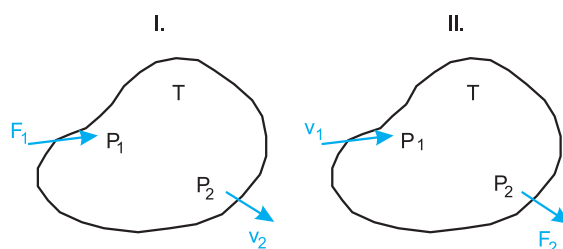
4.10. ábra. Homogén, egyhéjú szerkezet léghanggátlási száma a beesési szög és a frekvencia függvényében

A számított szerkezet 20 mm vastag üvegtábla, melynek sűrűsége 2500 kg/m^3 , rugalmassági modulusa $6 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$. A beesési szög $\zeta = 30^\circ, 60^\circ$ és 80°

A határfrekvencia feletti hanggátlás menetét más közelítés alapján kell meghatározni.

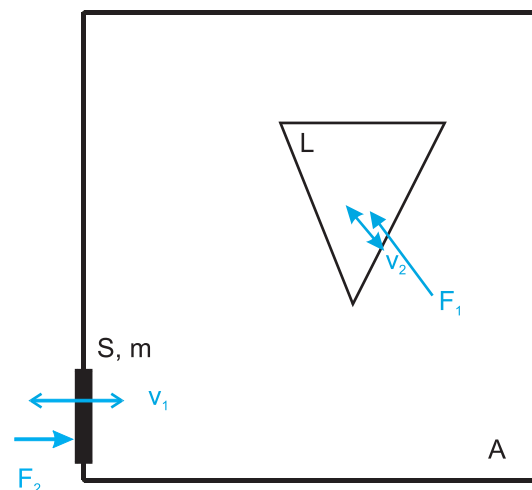
4.4.4. Homogén, egyhéjú szerkezetek léghanggátlásának meghatározása a határfrekvencia felett, a reciprocitás elvének felhasználásával [IV.8]

A határfrekvencia feletti léghanggátlás kiszámítására szintén sok közelítés – klasszikus és újszerű egyaránt – rendelkezésre áll. A reciprocitás elve azonban fontos és széles körben jól használható, így érdemes egy egyszerűbb, belátható feladat megoldása során azt is áttekinteni.



4.11a ábra. A reciprocitás elvének magyarázata

T kiterjedt lineáris viselkedésű test; A reciprokpárok a következők: I. állapotban a P_1 pontra F_1 erő hat, amelynek hatására a P_2 pontban v_2 sebesség jön létre; II. állapotban a P_2 pontban v_2 -vel azonos irányban F_2 erő hat, és ennek hatására P_1 pontban F_1 -gyel azonos irányú v_1 sebesség keletkezik; a reciprocitási kapcsolatot a (4.54) képlet fejezi ki



4.11/b ábra. Elrendezési vázlat a határfrekvencia feletti hanggátlás meghatározásához

L gerjesztett lemez; F_1 az I. kísérletben a lemezre ható erő; v_1 a lemez rezgése által keltett hangtér az S felületű, m tömegű dugattyút rezgésbe hozza, a dugattyú rezgése sebessége v_1 ; F_2 a II. kísérletben v_2 -vel azonos irányú, a dugattyúra ható erő; v_2 a lemez rezgése F_1 -gyel azonos irányban és helyen a dugattyú által keltett hang hatására; A : a helyiség egyenértékű hangelnyelési felülete

A reciprocitás elvét kiindulásként egy egyszerű példa mutatja be, az elvi elrendezés vázlata a 4.11a ábrán látható. A T jelű kiterjedt, tetszőleges tulajdonságú, de lineáris viselkedésű test P_1 pontjára az ábra szerint bejelölt irányú F_1 erő hat. Az erőhatás következtében a T test P_2 pontja a szintén bejelölt irányú v_2 sebességgel mozog. A gerjesztést és a mérést felcserélve a P_2 pontban v_2 -vel azonos irányban F_2 erő hat, akkor P_1 -ben F_1 erővel azonos irányú v_1 sebesség jön létre. A gerjesztések és válaszok közötti kapcsolat:

$$\frac{F_1}{v_2} = \frac{F_2}{v_1}. \quad (4.54)$$

Ez az elv alkalmazható épületszerkezetek lég-hanggátlásának meghatározására is a határfrekvencia feletti frekvenciatartományban. Reciprokpárok – az előbbi egyszerű példában a gerjesztőerő és az általa létrehozott rezgésebbesség – további mennyiségek között is létrehozhatók, erről áttekintés található pl. a [4.19] előadásban.

A modell ideálisan merev határolószervezetekkel készült, diffúz hangterű helyiségben elhelyezett lemezből áll. A helyiségnek, melynek egyenértékű hangnyelési felülete A , az egyik határolófelületén egy helyen nyílás található, amelyben nagy tömegű, merev dugattyú helyezkedik el. A dugattyú felülete S , tömege m . Az elrendezés vázlata a 4.12. ábrán látható. A kísérlet két részből áll.

Az I. kísérletben a lemezre F_1 erő hat, a lemez által elszugárzott akusztikai teljesítmény, W_{sug} az erő négyzetével arányos az arányossági tényező jele a , l. a (4.55) képletet a 4.3.4. alapján. Az elszugárzott teljesítmény hatására a diffúz hangtérben a térbeli átlagos hangnyomásszint, p_1 a (4.56) képlet szerint fejezhető ki a 2.6.4. pontnak megfelelően. A határfelületeken a hangvisszaverődések miatt a hangnyomás gyök kétszeres lesz, ez mozgatja a falban levő dugattyút. A dugattyú rezgésebbességének abszolút értéke, $|v_1|$ a tömegimpedancia segítségével fejezhető ki.

$$W_{sug} = a \cdot F_1^2; \quad (4.55)$$

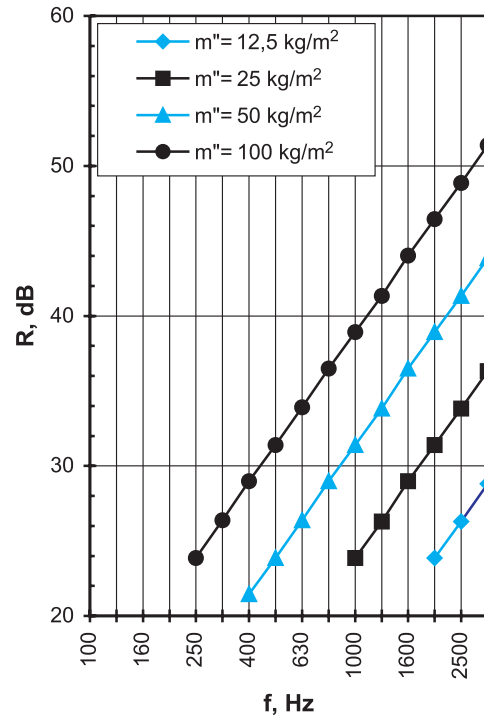
$$|p|^2 = \rho_L \cdot c \cdot \frac{W_{sug} \cdot 4}{A}; \quad (4.56)$$

$$|v_1| = \frac{\sqrt{2} \cdot |p_1| \cdot S}{\omega \cdot m}. \quad (4.57)$$

A lemezre ható gerjesztőerő és a dugattyú rezgésebbessége aránya a rendszer adataitól függ:

$$\frac{|v_1|}{F_1} = \frac{2 \cdot S^2 \cdot \rho_L \cdot c \cdot a \cdot 4}{(\omega \cdot m)^2 \cdot A}. \quad (4.58)$$

A II. kísérletben, amely a folyamatot ellentétes irányban követi végig, az F_2 erő a dugattyúra hat. A dugattyú rezgésebbessége a tömegimpedancia alapján számítható. A dugattyú mint hangforrás térfogatsebbességét, Q -t a következő összefüggés fejezi ki:



4.12. ábra. A vastagság szerepe a lég-hanggátlás határfrekvencia feletti menetében

$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ testsűrűségű, $E = 7,0 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$ rugalmassági modulusú, különböző vastagságú, gipsz alapanyagú falazólapok számított hanggátlása, a veszteségi tényező értéke 0,01

$$Q = \left(\frac{F_2}{\omega \cdot m} \right)^2 \cdot S^2. \quad (4.59)$$

A dugattyú által a diffúz hangtérben lesugárzott teljesítményt a (4.60) összefüggés fejezi ki a (2.113) alapján, figyelembe véve azt, hogy a dugattyú jelen esetben csak 2π térszögbe sugároz. A diffúz hangtérben kialakuló átlagos hangnyomásszintet pedig (4.61) összefüggés mutatja:

$$W = \frac{\rho_L}{2 \cdot \pi \cdot c} \cdot \left(\frac{F_2 \cdot S}{m} \right)^2; \quad (4.60)$$

$$p^2 = \frac{2 \cdot \rho_L^2}{A \cdot \pi} \cdot \left(\frac{F_2 \cdot S}{m} \right)^2. \quad (4.61)$$

A diffúz térben elhelyezett lemez rezgésebbesség-négyzete, v_2^2 arányos a hangnyomás effektív értékének négyzetével, az arányossági tényező jele b . Így a folyamatos létrehozó F_2 gerjesztőerő és a válasz rezgésebbesség, v_2 közötti arányt a (4.63) képlet mutatja:

$$v_2^2 = b \cdot p^2; \quad (4.62)$$

$$\left| \frac{v_2}{F_2} \right|^2 = 2 \cdot b \cdot \frac{\rho_L^2}{A \cdot \pi} \cdot \left(\frac{S}{m} \right)^2. \quad (4.63)$$

A reciprocitás elve miatt a (4.58) összefüggés és a (4.63) összefüggés megegyezik egymással, az a és b tényező hányadosa a rendszer elemeitől független:

$$\frac{a}{b} = \frac{\rho_L \cdot \omega^2}{4 \cdot \pi \cdot c}. \quad (4.64)$$

Az összefüggés és a teljes folyamat azt jelenti, hogy egy diffúz hangterben levő lemeznek a felület mentén ható hangnyomás hatására kialakuló rezgése meghatározható az erre a lemezre ható ponterő következtében kialakuló hangnyomás segítségével. Tehát a pontszerű gerjesztés és a diffúz hangterből származó gerjesztés felcserélhetők egymással.

Egy épületszerkezet léghanggátlási száma az 5. fejezet szerint a felületére beeső akusztikai teljesítmény és a lesugárzott akusztikai teljesítmény hányadosának tízszeres logaritmus. A beeső akusztikai teljesítményt a diffúz téri közelítés alapján a (4.65) összefüggés, a lesugárzott teljesítményt pedig a (4.11) összefüggés adja meg. A hangnyomás négyzetének és a rezgéssebesség négyzetének aránya pedig a (4.62) képlettel határozható meg. A határfrekvencia felett sugárzási fok értéke 1:

$$W_{be} = \frac{p^2}{\rho_L \cdot c} \cdot \frac{S}{4}; \quad (4.65)$$

$$R = 10 \cdot \lg \left(\frac{W_{be}}{W_s} \right) = 10 \cdot \lg \left(\frac{p^2}{\rho_L \cdot c} \cdot \frac{S}{4} \cdot \frac{1}{\rho_L \cdot c \cdot v^2 \cdot S \cdot \sigma} \right); \quad (4.66a)$$

$$R = 10 \cdot \lg \left(\frac{1}{(2 \cdot \rho_L \cdot c)^2 \cdot b} \right) = 10 \cdot \lg \left(\frac{k^2}{16 \cdot \pi \cdot \rho_L \cdot c \cdot a} \right). \quad (4.66b)$$

Az összefüggés második tagjának az a jelentősége, hogy a léghanggátlási számot ponterőgerjesztés alapján fejezi ki.

A (3.181b) és (3.184) összefüggések együttesen a hajlítórezgést végző lemez átlagos rezgéssebesség négyzetét adják meg a gerjesztőerő függvényében. A gerjesztőerő is felületi átlag. A határfrekvencia felett egy vizsgálati frekvenciatartományban sok sajátfrekvencia alakul ki, ezért a statisztikus közelítés alkalmazható. F jelöli a gerjesztőerő felületi átlagát, ω a körfrekvencia, m'' , S és δ a lemez fajlagos tömege, felülete és veszteségi tényezője, k_B a hajlítóhullám hullámszáma.

$$v^2 = \left(\frac{F}{\omega m''} \right)^2 \cdot \frac{k_B^2}{8 \cdot \delta \cdot S}. \quad (4.67)$$

A (4.11) és (4.55), (4.66a) és (4.66b) összefüggések felhasználásával a léghanggátlási számra a (4.68) összefüggés vezethető le.

Homogén, egyhéjú szerkezetek léghanggátlása a határfrekvencia felett a (4.68) képlettel fejezhető ki. A hanggátlás az ω körfrekvenciától, a szerkezet m'' fajlagos tömegétől, az f_h határfrekvenciától, és a vizsgálati beépítésben a veszteségi tényezőtől – a következő képletben δ , a korábbi összefüggésekben η – függ:

$$R = 10 \cdot \lg \left(\left(\frac{\omega \cdot m''}{2 \cdot \rho_L \cdot c} \right)^2 \right) + 10 \cdot \lg \left(\frac{2 \cdot \delta}{\pi} \right) + 10 \cdot \lg \left(\sqrt{\frac{f}{f_h}} \right). \quad (4.68)$$

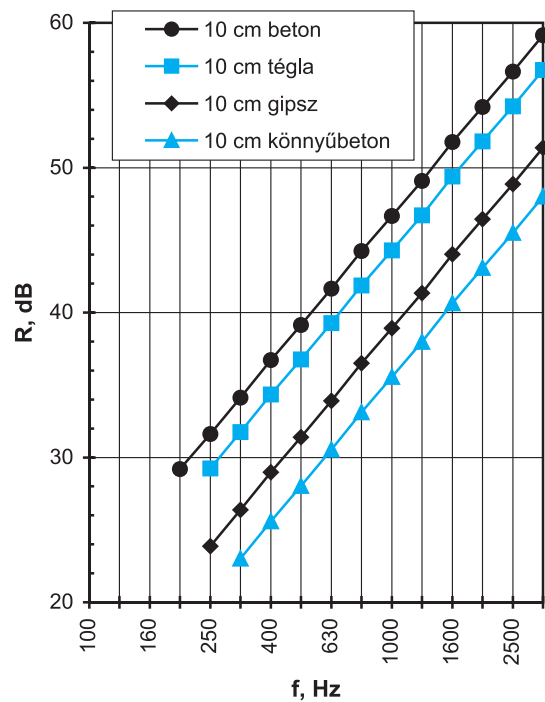
A tömegtörvény tartományában kialakuló hanggátlásfüggéshez képest legfontosabb, tendencia jellegű eltérések a következők:

- a határfrekvencia felett a hanggátlás 7,5 dB/kétszeres frekvenciamerevedéssel nő;
- a határfrekvencia felett a hanggátlás függ a veszteségi tényezőtől is, ezért a veszteségi tényező

szintén termék- és laborjellemző; egy vizsgált laboratóriumi beépítésben a veszteségi tényező növekedése növeli a léghanggátlási számot; a veszteség tényező részben a szerkezet anyagának sajátosságaitól, részben a vizsgálat helyszínétől, tehát a laboratórium felépítésétől függ, ezért nem választható meg szabadon;

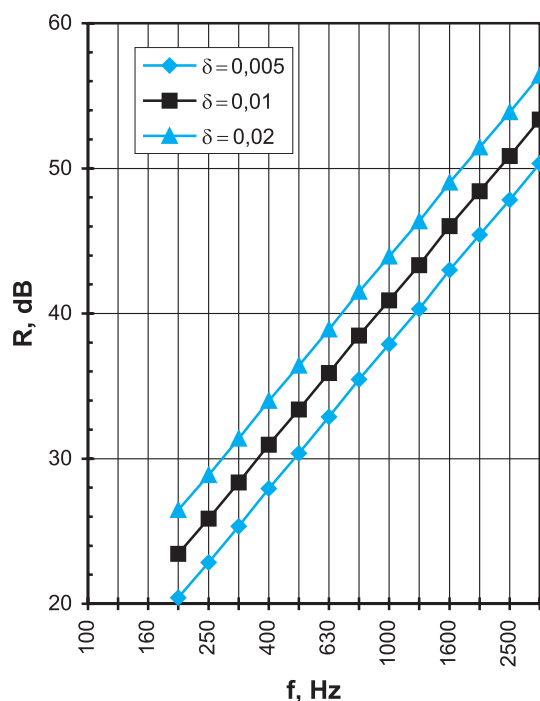
- a fajlagos tömeg növelése részben a vastagság növelésével oldható meg; a vastagság növelése növeli a léghanggátlást, a kapcsolat azonban nem 6 dB/kétszeres tömeg, mert a határfrekvencia, amely szintén függ a sűrűségtől és a vastagságtól, fordítottan arányos a léghanggátlással. Mindezeket a 4.13. és 4.14. ábra szemlélteti.

A veszteségi tényező nagyon fontos szerepet játszik a laboratóriumi mérések eredményének alakulásában a határfrekvencia környezetében és a határfrekvencia felett. Erről számol be a [4.4] konferenciaelőadás, amely nagyon pontosan azonos, homogén, tömör falazat – mészhomok téglá – hanggátlásának vizsgálati eredményeiről szól. A különböző laboratóriumokban azonos szerkezeten végzett mérések eredményei közötti eltérések alapvetően a laboratóriumi szerkezetek által meghatározott veszteségi tényezők eltéréseivel magyarázhatók.



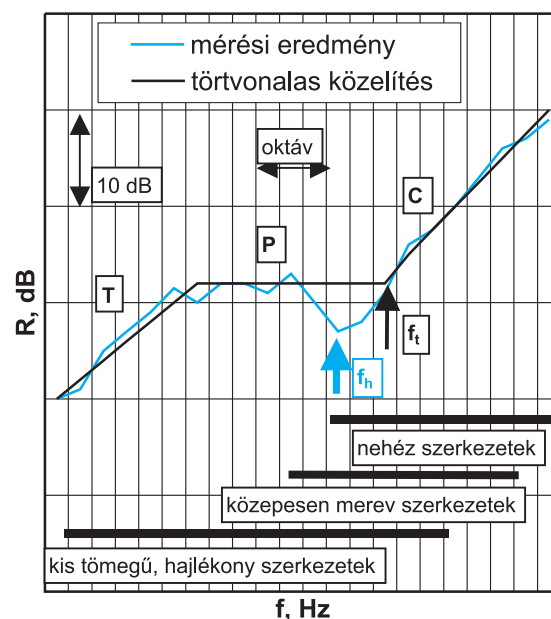
4.13. ábra. Különböző testsűrűségű és rugalmassági modulusú, 10 cm vastagságú és 0,01 veszteségi tényezőjű falazatok léghanggátlása

beton: $\rho = 2300 \text{ kg/m}^3$, $E = 2,6 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$; téglá: $\rho = 1800 \text{ kg/m}^3$, $E = 1,6 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$; gipsz: $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, $E = 7,6 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$; könnyűbeton: $\rho = 700 \text{ kg/m}^3$, $E = 3,8 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$



4.14. ábra. A veszteségi tényező hatása a léghanggátlásra a határfrekvencia felett

12 cm vastag gipsz alapanyagú falazat számított léghanggátlása, test-sűrűség $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, rugalmassági modulus $E = 7,0 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$



4.15. ábra. Homogén, egyhéjú szerkezet léghanggátlásának törtvonalas közelítése

Természetesen a homogén, egyhéjú szerkezetek léghanggátlásának számítására számos más közelítés is ismert, pl. a [4.5], [4.6], [4.7] stb., de a fizikai alapokat és az alapvető tendenciákat e példák jól mutatják.

4.4.5 . Grafikus és számításos közelítés a tömör, homogén épületszerkezetek hanggátlásának meghatározására a frekvencia függvényében [IV.10]

A homogén, egyhéjú szerkezetek léghanggátlási számának frekvencia-jelleggörbéjére – laboratóriumi léghanggátlás, termékjellemző – egyenes szakaszból álló törtvonalas közelítés állítható fel. Az átmeneti szakaszra vízszintes, tehát állandó hanggátlású közelítés. A 4.15. ábrán egy széles frekvenciatartományban mért, egyhéjú szerkezet léghanggátlásának menete és a hanggátlás törtvonalas közelítése látható. Általánosságban a törtvonalas közelítés három szakaszból áll:

- a tömegtvörvény tartománya, *T*; e szakasz a korábbiak szerinti fizikai tartalommal rendelkezik; e tartományban a közelítő egyenes meredeksége 6 dB/oktáv;
- a határfrekvencia feletti tartomány, *C*; e szakasz a korábbiak szerinti fizikai tartalommal rendel-

kezik; e tartományban a közelítő egyenes meredeksége 7,5 dB/oktáv;

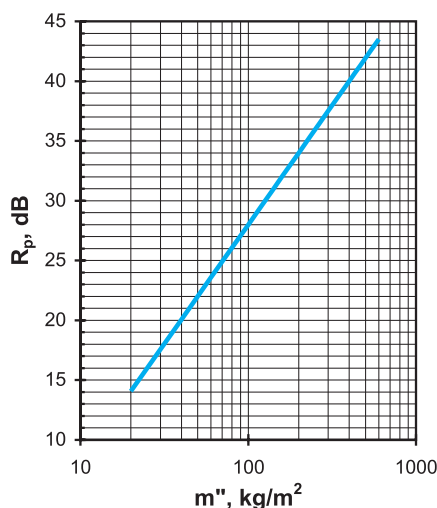
- az átmeneti tartományt közelítő vízszintes szakasz, neve plató, *P*.

A plató és a határfrekvencia feletti tartomány közelítő egyeneseinek metszéspontja a törésponti frekvencia, jele f_p , amely a határfrekvencia környezetében található, de nem annak a közelítése, hanem a törtvonalas közelítés két szakaszának metszéspontja.

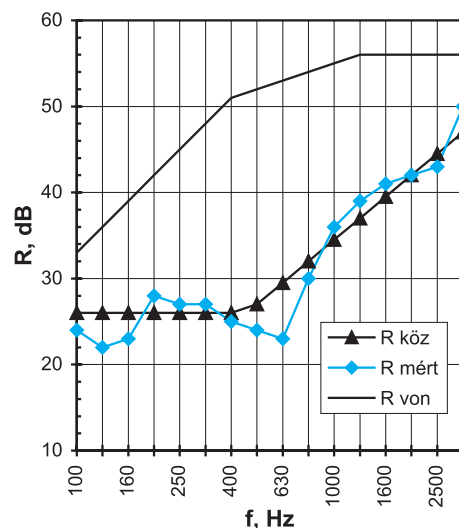
A vékony, hajlékony lemezek (pl. 4–10 mm üvegtábla, 9,5–12,5 mm gipszkarton lemez, 1–2 mm acéllemez, alumíniumlemez stb.) hanggátlása a 100–3150 Hz-es tartományban túlnyomóan a tömegtvörvény tartományába esik, esetleg a határfrekvencia hatása is megjelenik. E tartomány diffúz terrek közötti közelítését a (4.69) képlet mutatja, a hanggátlás az f frekvenciától és a szerkezet m'' fajlagos tömegétől függ:

$$R = 20 \cdot \lg(f \cdot m'') - 48. \quad (4.69)$$

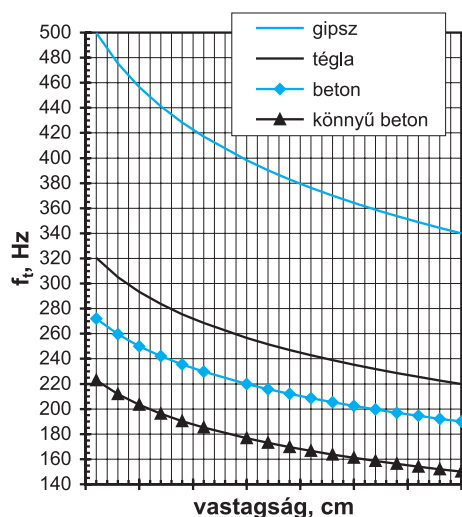
A közepesen merev épületszerkezetek határfrekvenciája a 300–600 Hz tartományba esik, tipikusan e csoportba tartozik a 8–12 cm gipsz- vagy könnyűbeton falazóelemből készült falazat, a 8–12 cm téglafal stb. A 100–3150 Hz tartományban látható az átmeneti tartomány, amelyet a plató közelít, látható a határfrekvencia környezete, valamint a határfrek-



4.16. ábra. Plotomagasság meghatározása homogén, tömör, egyhéjú falazatok léghanggátlásának törvonalas közelítéséhez



4.18. ábra. 8 cm vastag, 80 kg/m² fajlagos tömegű gipsz alapanyagú falazat léghanggátlása – mérési eredmény ($R_{mért}$) és a törvonalas közelítés ($R_{köz}$)



4.17. ábra. Törésponti frekvencia meghatározása homogén, tömör, egyhéjú falazatok léghanggátlásának törvonalas közelítéséhez

vencia feletti tartomány. A plotomagasság, R_p értéke a szerkezet fajlagos tömegétől függ, az összefüggést a 4.16. ábra mutatja. A törésponti frekvencia, f_t , anyagtól függő értékei a 4.17. ábrán láthatók. A közelítésben meghatározott hanggátlási értékek átlagos laboratóriumi beépítésre vonatkoznak.

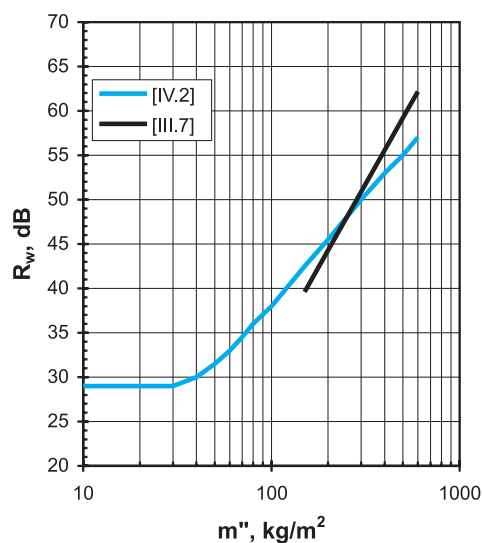
A nehéz, merev épületszerkezetek határfrekvenciája 200 Hz alatt van. E csoportba tartoznak pl. a legalább 15 cm vastag, tömör betonszerkezetek, a tömör, kisméretű téglából készült 25 cm vastag falazat stb.

Mintapéldaként a 4.18. ábrán 8 cm vastag gipsz alapanyagú falazat mért és közelítőleg meghatározott léghanggátlása látható. A falazat fajlagos tö-

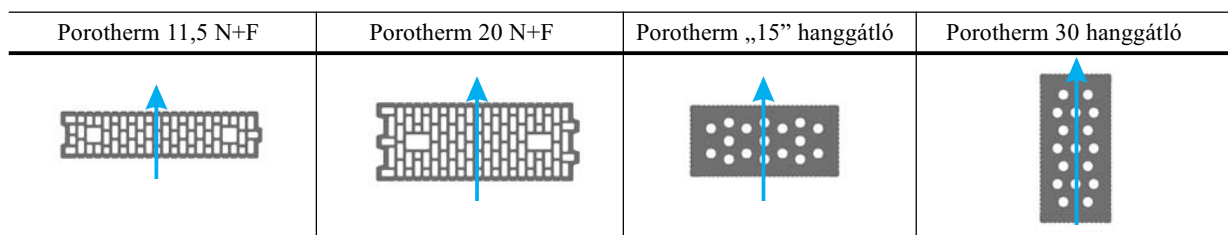
mege $m'' = 80 \text{ kg/m}^2$, így a plotomagasság $R_p = 26 \text{ dB}$, a törésponti frekvencia $f_t = 475 \text{ Hz}$. A törvonalas közelítés e két adatból megszerkeszthető.

4.4.6. Homogén, egyhéjú szerkezetek súlyozott léghanggátlási számának meghatározása a fajlagos tömeg alapján

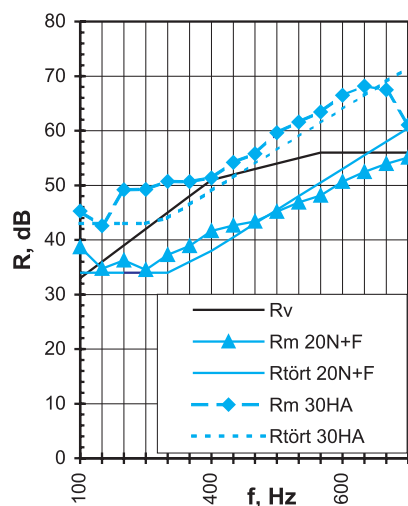
A homogén, tömör épületszerkezetek súlyozott léghanggátlási száma a fajlagos tömeg alapján becsülhető. A becslés átlagos laboratóriumi beépítésre vonatkozik, tehát a veszteségi tényező valamilyen nem meghatározott átlagos értékkel szerepel. Két szakirodalmi forrásból származó becslés látható a 4.19. ábrán.



4.19. ábra. Egyhéjú falazatok súlyozott léghanggátlási száma a fajlagos tömeg függvényében



4.20. ábra. Üreges falazóelemek, amelyek léghanggátlása követi a hanggátlás hagyományos elméletét



4.21. ábra. Üreges falazóelemekből készült falazatok, amelyek léghanggátlása követi a hagyományos elméletet

20N+F: Porotherm 20 N+F eleméből készült falazat,
 $m'' \approx 210 \text{ kg/m}^2$, $R_p = 34 \text{ dB}$, $f_i = 275 \text{ Hz}$, $R_w = 46 \text{ dB}$; 30HA:
 Porotherm 30 hanggátló falazóeleméből készült falazat,
 $m'' \approx 590 \text{ kg/m}^2$, $R_p = 43 \text{ dB}$, $f_i = 235 \text{ Hz}$, $R_w = 59 \text{ dB}$

4.5. Üreges elemekből álló szerkezetek léghanggátlása

4.5.1. Üreges falazóelemek

A 4.20. ábrán olyan falazóelemek felülnézete látható, amelyek követik a hanggátlás eddig megismert törvényszerűségeit:

- a határfrekvencia jelensége kialakul, felismerhető, értéke a mért sugárzási fokból becsülhető;
- a határfrekvencia feletti hanggátlástartomány felismerhető, az átlagos testsűrűségből és a további anyagi jellemzőkből számítható;
- a szerkezet súlyozott léghanggátlási száma a fajlagos tömegből becsülhető.

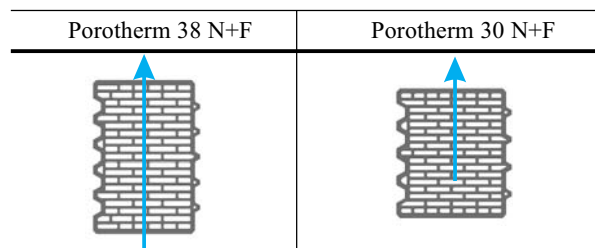
Az ábrán látható elemek üregrendszerének jellemzői (vagylagos jellemzők):

- az üregek a falazóelem térfogatának 20%-nál kisebb részét alkotják;
- a hangterjedés irányával párhuzamos lamellák egyenesen, folytonosan kötik össze az elem fal-síkjait alkotó két oldalát.

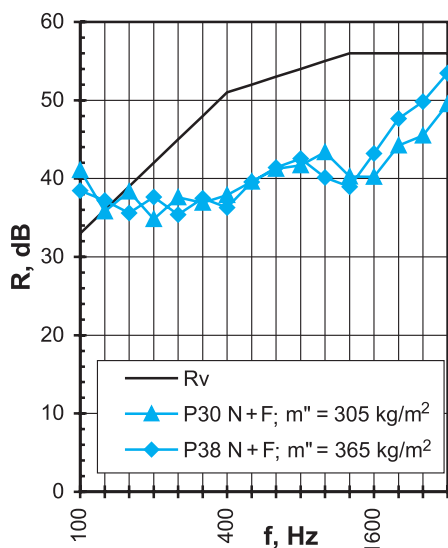
Példaként a 4.21. ábrán Porotherm 20 N+F falazóeleméből, ill. Porotherm 30 hanggátló téglából készült, két oldalról vakolt falazat léghanggátlása és a 4.4.5. pontban ismertetett törtvonalas közelítések láthatók. E csoportokat a továbbiakban $\ddot{U}$ -vel (üreges) vagy ML -lel jelöljük (falsíkra merőleges irányban lamellás).

4.5.2. Hőszigetelési célból kifejlesztett, üreges falazóelemekből készült falazat léghanggátlása

A hőszigetelési célból kifejlesztett kerámia alapanyagú falazóelemeknek sajátos üregszerkezetük és belső lamellarendszerük van. Belső szerkezetük teljes egészében a hőszigetelési igények elérését szolgálja. Hanggátlásuk eltér a hagyományos, homogén, tömör falazatok hanggátlásától, súlyozott léghanggátlási számuk 5–10 dB-lel kisebb, mint a fajlagos tömeg alapján lehetne. Számos szerző vizsgálta e szerkezetek hanggátlási tulajdonságait – pl. [4.8]–[4.10] – a szemléletes magyarázatok egyértelműek, de a kísérleti igazolás, különösen a kis-mintás mérések eredményei (rezgésebbesség-átviteli tényező, transzfer impedancia) további elemzések előtt nyitották meg az utat. A falazóelemek jellegzetes szerkezetét a 4.22. ábra, a hanggátlás frekvenciamenetét két példa alapján a 4.23. ábra mutatja. A belső szerkezetet tükrözi a továbbiakban alkalmazott jelölés: PL (falsíkkal párhuzamos irányban lamellás).



4.22. ábra. Üreges falazóelemek, amelyek léghanggátlása nem követi a hanggátlás hagyományos elméletét



4.23. ábra. Hőszigetelési célból kifejlesztett kerámia alapanyagú falazóelemekből készült falazatok léghanggátlása (példák)

A mérések a BME ÉSZÉGI Épületakusztikai Laboratóriumban készültek; mindkét falazat súlyozott léghanggátlási száma 42 dB volt, pedig a fajlagos tömeg alapján [IV.2] szerint becsülve 50 dB, ill. 53 dB lett volna

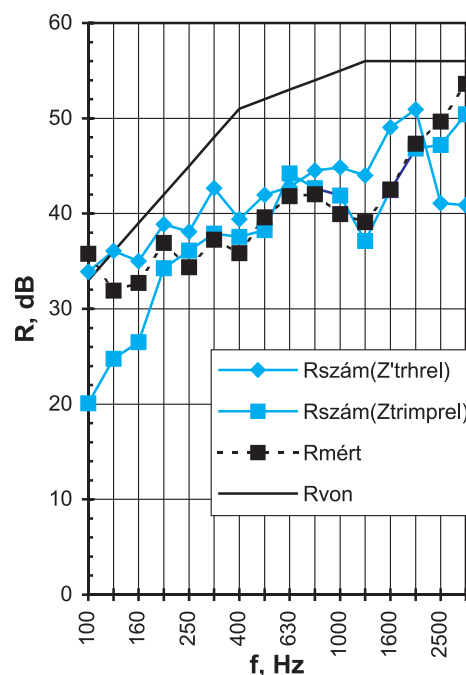
Az általános magyarázat szerint a kis hanggátlás oka a vastagsági rezonancia jelensége: a falazat két oldala meghatározott frekvencia felett nem azonos fázisban és azonos nagysággal rezeg a gerjesztés hatására. A jelenség akkor lép fel, ha a falsíkra mérőleges vastagság a terjedési irányban kialakuló testhang fél hullámhosszának egész számú többszöröse. Ezt azonban a kísérleti eredmények csak részben igazolják.

A léghanggátlás hagyományostól eltérő menete a transzfer hullámimpedancia szokásostól eltérő viselkedésével magyarázható. A (4.53a) összefüggés részben elhanyagolás, részben további értelmezés alapján a következő alakban is felírható:

$$R \approx 20 \cdot \lg \left| \frac{Z'}{2 \cdot \rho_L \cdot c} \right| + K_h, \quad (4.69)$$

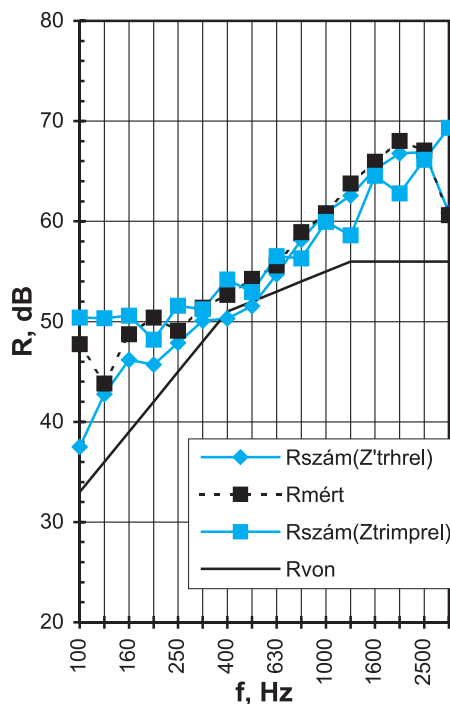
Z' a kísérletekben a mintafalon pontszerű, erőgerjesztéssel mért transzfer impedancia, vagy diffúz hangterű helyiségek közé épített falazaton a léghanggerjesztéssel mérhető transzfer hullámimpedancia. K_h a hitelesítési korrekciós tényező, ez frekvenciafüggetlen, állandó érték.

A 4.24. ábra Porotherm 38 N+f falazóelemből készült falazat, a 4.25. ábra Porotherm 30 hanggátló falazóelemből készült falazat léghanggátlásának számított és mért értékeit mutatja be. Látható, hogy akár pontszerű, erőimpulzus-gerjesztéssel, akár léghanggerjesztéssel történt a transzfer impedancia mérése, az ebből meghatározott léghanggátlási szám jól közelíti a szabványos módszerrel mért léghanggátlási szám értékét. Tehát a hőszigetelő falazóblokkból készült falazat hanggátlásának a klasszikustól eltérő frekvenciamenete a transzfer hullámimpedanciával megmagyarázható.



4.24. ábra. Porotherm 38 N+F falazat léghanggátlásának elemzése

$R_{szám}(Z'trhrel)$: a léghanggátlási szám számított értéke a léghanggerjesztéssel mért fajlagos hullámimpedanciából; $R_{szám}(Z'trimprel)$: a léghanggátlási szám számított értéke a pontszerű erőgerjesztéssel mért transzfer impedanciából; $R_{mért}$: a léghanggátlási szám szabványos mérési eredménye

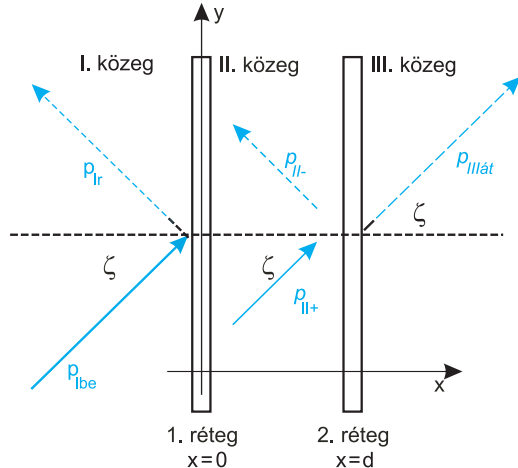


4.25. ábra. Porotherm 30 hanggátló elemből készült falazat léghanggátlásának elemzése

$R_{szám}(Z'trhrel)$: a léghanggátlási szám számított értéke a léghanggerjesztéssel mért fajlagos hullámimpedanciából; $R_{szám}(Z'trimprel)$: a léghanggátlási szám számított értéke a pontszerű erőgerjesztéssel mért transzfer impedanciából; $R_{mért}$: a léghanggátlási szám szabványos mérési eredménye

4.6. Az ideális kéthéjúszerkezet léghanggátlása [4.12], [4.13]

Az ideális kéthéjúszerkezet két homogén, végtelen kiterjedésű héjból és a közöttük levő légrésből áll. Nemcsak azért hívják ideálisnak, mert a két héj homogén, minden irányban azonos anyagjellemzőkkel rendelkezik, hanem mert a két héj között merev vagy rugalmas szerkezeti elem nem hoz létre kapcsolatot. Egy egyszerű és a hangterjedés folyamatának megértését segítő modell vázlata a 4.26. ábrán látható.



4.26. ábra. Ideális kéthéjúszerkezet elrendezési vázlata a hanggátlás meghatározásához

ζ beesési szög, ájtutási szög; p_{Ibe} , p_{II+} : az I. közegben a beeső és visszavert síkhullám p_{II+} , p_{II-} : a II. közegben a többszörös visszaverődések miatt $+x$ és $-x$ irányú síkhullám; $p_{IIIát}$: a III. közegbe ájtutó síkhullám

- A térből az I. közegben léghang (a továbbiakban síkhullám) érkezik az 1. réteg felületére. A hullám az 1. réteget rezgésbe hozza, a teljesítmény egy része visszaverődik, egy része az 1. réteg mozgására fordítódik, egy további része bejut a II. közegbe.
- A II. közegben a két határolószerkezet (az 1. és 2. réteg) között alakul ki léghangterjedés, amely a $+x$ és a $-x$ irányú terjedés összegeként írható fel, szintén síkhullámú terjedés formájában. E terjedés során a 2. réteg is rezgésben jön, hajlítórezgés alakul ki benne. Mint rezgő felület, a III. közegbe hangot sugároz. Ha mindhárom közeg azonos anyagjellemzőjű, akkor a beesési szögek megegyeznek egymással, az ábra ezt mutatja.
- A III. közegben síkhullám alakul ki, ami az ájtutott akusztikai teljesítményt szállítja.

A [4.12] erre az ideális szerkezetre dolgozott ki számítási módszert, amely alapvetően az egyhéjúszerkezetek hullámelméleti modellezésének módszerét alkalmazta a kéthéjúszerkezetre.

Az I. közegben az eredő hangnyomás, $p_I(x,y)$ két síkhullám eredőjeként alakul ki. A beeső hullám amplitúdója p_{Ibe} , a visszavert síkhullám amplitúdója p_{Iv} . A beesési – és áthaladási szög – ζ , a léghangterjedés hullámszáma k .

A felírásban az egyes terjedési komponensek és terjedési irányok külön-külön szerepelnek, bár elemi matematikai műveletekkel össze lehet vonni azokat. A fizikai tartalom megértését segíti a részletezett egyenletfelírás.

$$p_I(x,y) = p_{Ibe} \cdot e^{-i \cdot k \cdot x \cdot \cos(\zeta)} \cdot e^{-i \cdot k \cdot y \cdot \sin(\zeta)} + p_{Iv} \cdot e^{i \cdot k \cdot x \cdot \cos(\zeta)} \cdot e^{-i \cdot k \cdot y \cdot \sin(\zeta)} \quad (4.70)$$

A II. közegben az eredő hangtér, $p_{II}(x,y)$ $-x$ és $+x$ irányú síkhullámú terjedés eredőjeként jön létre. Az y irányban mindig $+$ a terjedés iránya. A két terjedési irány amplitúdója p_{II-} és p_{II+} :

$$p_{II}(x,y) = p_{II+} \cdot e^{-i \cdot k \cdot x \cdot \cos(\zeta)} \cdot e^{-i \cdot k \cdot y \cdot \sin(\zeta)} + p_{II-} \cdot e^{i \cdot k \cdot x \cdot \cos(\zeta)} \cdot e^{-i \cdot k \cdot y \cdot \sin(\zeta)} \quad (4.71)$$

A III. közegben csak a $+x$, $+y$ irányú terjedés alakul ki:

$$p_{III}(x,y) = p_{IIIát} \cdot e^{-i \cdot k \cdot x \cdot \cos(\zeta)} \cdot e^{-i \cdot k \cdot y \cdot \sin(\zeta)} \quad (4.72)$$

A folytonossági peremfeltételek közül a nyomhullámok egyezőségének feltételét a beesési és ájtutási szögek egyenlősége már figyelembe vette. További folytonossági feltétel az 1. és 2. réteg felületre merőleges sebességeinek egyezése a réteget határoló közegek felületre merőleges sebességeivel, amit a (2.28) egyenlet egydimenziós, harmonikus rezgést feltételező alakjával lehet kifejezni. A (4.73) egyenlet példaként az 1. réteg két oldalán kialakuló, az 1. réteg felületére merőleges rezgésebbességek egyenlőségét mutatja. Az I. és II. közötti lemez mozgásának dinamikai feltételét a (4.74) egyenlet fejezi ki, felhasználva a hullámimpedancia (4.6) összefüggés által meghatározott fizikai tartalmát.

$$v_I(x=0) = \frac{i}{\omega \cdot \rho_L} \cdot \frac{\partial p_I(x=0)}{\partial x} = v_{II}(x=0) = \frac{i}{\omega \cdot \rho_L} \cdot \frac{\partial p_{II}(x=0)}{\partial x}; \quad (4.73)$$

$$p_I(x=0) - p_{II}(x=0) = Z_h' \cdot v_I(x=0). \quad (4.74)$$

A kettős szerkezet léghanggátlását a (4.75) egyenlet adja meg, a nyomások négyzetének aránya ezen feltételekből meghatározható:

$$R = 10 \cdot \lg \left(\frac{p_I^2(x=0)}{p_{III}^2(x=d)} \right) \quad (4.75)$$

Az ideális kéthéjúszerkezet léghanggátlását példaként két 12,5 mm vastag gipszkarton lemezen végzett számítás mutatja be, a határfrekvencia alatti tartományban. A merőleges beesési szög és a 60°-os beesési szög eredményeit a 4.27. ábra mutatja. Látható, hogy a hanggátlás menetében két élesen elkülönülő szakasz, a rezonanciafrekvencia alatti és feletti szakasz alakul ki. A rezonanciafrekvencia értékét a (4.76) képlet adja, m''_1 és m''_2 a két kéregle-

mez fajlagos tömege, d a légrés vastagsága, v a beesési szög. A valóságban diffúz hangterű helyiségek közötti szerkezetre sok irányból érkezik hanghullám, ezért a rezonanciafrekvencia nem olyan éles, mint a számított eredmény:

$$f_{rez} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \cos(v)} \cdot \sqrt{\frac{\rho_L \cdot c^2 \cdot (m_1'' + m_2'')}{m_1'' \cdot m_2'' \cdot d}}. \quad (4.76)$$

A rezonanciafrekvencia alatt a szerkezet egyhjúként viselkedik, fajlagos tömege a két kéreglemez fajlagos tömegének összege. A tartományban a hanggátlás frekvenciafüggése a (4.69) képlettel határozható meg. A (4.76) képlet azt a fizikai tartalmat tükrözi, hogy a két kéreglemez tömegként, a levegő rugóként működik. Ha a légrésbe szorosan szálas szigetelőanyagot tesznek, akkor az fog rugóként működni, nagyobb merevsége miatt a rezonanciafrekvencia lényegesen magasabbra kerülhet. Ha a légrést a szálas szigetelőanyag lazán tölti ki, akkor az a rezonanciafrekvenciát nem befolyásolja lényegesen.

A rezonanciafrekvencia felett a hanggátlás törvonalas közelítését a (4.69) összefüggés rezonanciafrekvencián adódó értékéből indított, 18 dB/oktáv meredekségű egyenes adja. Ez egyenértékű azal, hogy a rezonanciafrekvencia felett a hanggátlást a (4.77) összefüggés szerint kell kiszámítani. $R(m_1'' + m_2'')$ ismét a (4.69) képlet alkalmazását jelenti:

$$R_{ki} = R(m_1'' + m_2'') + 40 \cdot \lg\left(\frac{f}{f_{rez}}\right). \quad (4.77)$$

A [4.13] közelítése a rezonanciafrekvencia feletti tartományra eltérő. E tartományt az f_l frekvenciáig a (4.78), a felett a (4.79) képlettel közelíti. f_l értékét a (4.80) képlet adja meg. $R(m_1'')$ és $R(m_2'')$ és az egyhjú szerkezetek (4.69) képlettel számolt hanggátlását jelenti. E közelítés is a határfrekvencia alatt alkalmazható:

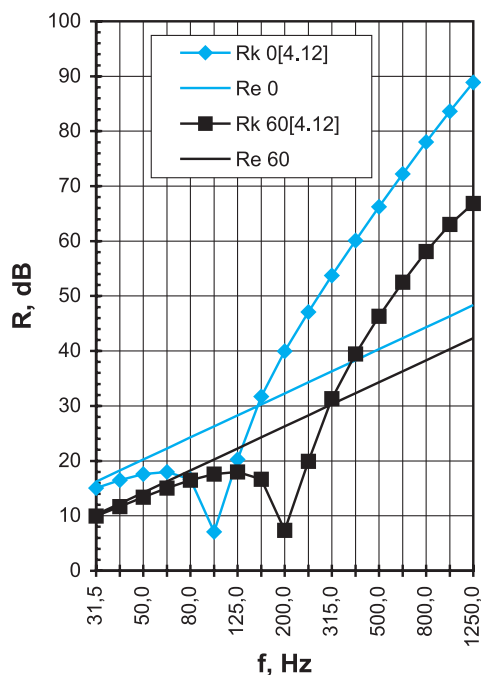
$$R_{ki} = R(m_1'') + R(m_2'') + 20 \cdot \lg(f \cdot d) - 29,$$

$$f_{rez} < f < f_l, \quad (4.78)$$

$$R_{ki} = R(m_1'') + R(m_2'') + 6, \quad f_l < f; \quad (4.79)$$

$$f_l = \frac{55}{d}. \quad (4.80)$$

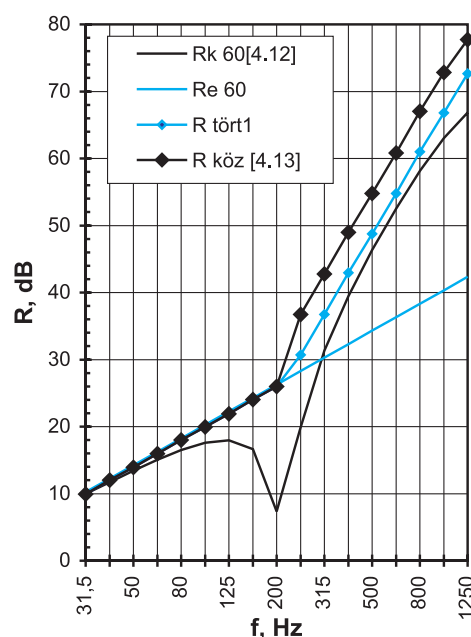
Az 4.27. ábrán a már feldolgozott számítási példa adataival a 4.28. ábra a két törtvonalas közelítést szemlélteti. Látható, hogy a közelítő számítá-



4.27. ábra. Ideális kéthjú szerkezet léghanggátlásának számított értéke

A két lemez azonos, mindkettő 12,5 mm gipszkartonból készült, $\rho = 1000 \text{ kg/m}^2$, $E = 7,0 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$; a légrés 5 cm; a mérőleges beeséshez a rezonanciafrekvencia 106 Hz, a 60 fokokos beeséshez a rezonanciafrekvencia számított értéke 213 Hz.

Re jelenti a 2 · 12,5 mm vastag lemez léghanggátlását, Rk pedig a kéthjú szerkezet léghanggátlását



4.28. ábra. Ideális kéthjú szerkezet léghanggátlásának közelítő számításai

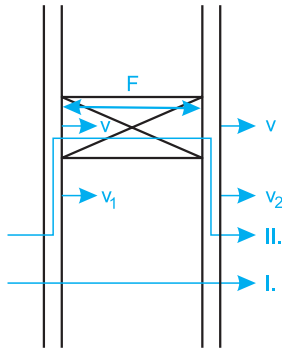
A két lemez azonos, mindkettő 12,5 mm gipszkartonból készült; $\rho = 1000 \text{ kg/m}^2$; $E = 7,0 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$; a légrés 5 cm; a 60°-os beeséshez a rezonanciafrekvencia számított értéke 213 Hz. Re a 2 · 12,5 mm vastag lemez léghanggátlása, Rk pedig a kéthjú szerkezet léghanggátlása; R tört a rezonanciafrekvencián keletkező hanggátlásértéktől indított, 18 dB/oktáv meredekségű egyenes

sok a hanggátlásgörbe menetét jól követik, de nem adják vissza a rezonanciafrekvencia környezetének sajátosságait.

4.7. Hajlékony lemezekből felépülő, valóságos kéthéjű szerkezetek léghanggátlása [4.13]

A hajlékony lemezekből felépülő, valóságos kéthéjű szerkezetek kéreglemezektől és az ezeket összekapcsoló vázszerkezetből állnak. Elvi keresztmetszeti vázlat a 4.29. ábrán látható. A szerkezetben két hangátviteli út alakul ki:

- 1. lemez csatolás a gerjesztési oldalhoz – légrés – 2. lemez hangsugárzás;
- 1. lemez csatolás a gerjesztési oldalhoz – szerkezeti kapcsolat – 2. lemez hangsugárzás.



4.29. ábra. Hajlékony rétegekből és vázból álló valóságos kéthéjű falszerkezet keresztmetszeti vázlata

v_1 és v_2 az 1. és 2. lemez átlagos rezgéssebessége, v pedig a szerkezeti kapcsolat csatlakozási pontjában kialakuló rezgés sebessége; F a szerkezeti kapcsolat által átadott erő

Az eredő hanggátlás e két hangátviteli út hatásának eredőjeként alakul ki. Első közelítésben és a tervezés szempontjából egymástól függetlennek tekinthetők.

A szerkezeti kapcsolaton keresztül kialakuló hangterjedéshez a W_k lesugárzott teljesítményt a (4.81) összefüggés alapján lehet meghatározni, az ε tényező a 2. lemez gerjesztésének módjától, azaz a csatolás módjától függ, l. a (4.28c) és a (4.32) összefüggéseket. A csatolási pontok számát n jelöli. A légrésen keresztül kialakuló hangátvitelhez tartozó W_l lesugárzott teljesítményt a lemez átlagos rezgéssebességével kell számítani a (4.11) képlet szerint. A légrés mint kényszerkapcsolat miatt, l. a 4.3.4. pontot, a sugárzási fokot 1-nek kell tekinteni:

$$W_k = \rho_L \cdot c \cdot \varepsilon \cdot v^2. \quad (4.81)$$

Az ideális kéthéjű szerkezet R_{ki} léghanggátlásához képest a szerkezeti kapcsolat hanggátláscsökkenést, ΔR_s -t okoz, amit

a (4.82a) fejez ki. Emiatt a valóságos kéthéjű szerkezet léghanggátlása a (4.82b) képlettel fejezhető ki:

$$\Delta R_s = 10 \cdot \lg \left(1 + \frac{W_k}{W_l} \right); \quad (4.82a)$$

$$R_{kv} = R_{ki} - \Delta R_s. \quad (4.82b)$$

A légrésen és a szerkezeti kapcsolaton keresztül kialakuló hangterjedéshez tartozó lesugárzott teljesítmények aránya a (4.83) képlet szerint határozható meg, a rezgéssebességek aránya részben az elektromechanikai analógiákból számítható ki a határfrekvencia alatt. A (4.84) képletben szereplő impedanciák az indexnek megfelelő sorszámu lemez bemeneti impedanciái, a szerkezeti kapcsolattól függően:

- bemeneti pontimpedanciák, ha a szerkezeti kapcsolat a kéreglemezek között pontszerű, l. a (3.192a) képletet;
- bemeneti vonalimpedanciák, ha a kéreglemezek között borda jellegű, tehát vonalmenti kapcsolat van, l. a (3.192b) képletet:

$$\frac{W_k}{W_l} = \frac{n \cdot \varepsilon}{S} \cdot \left(\frac{v}{v_1} \right)^2 \cdot \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^2; \quad (4.83)$$

$$\frac{v}{v_1} = \frac{z_1}{z_1 + z_2}. \quad (4.84)$$

Az 1. és 2. lemez átlagos rezgéssebességének aránya a frekvenciától is függ:

$$\frac{v_1}{v_2} = k_1 \cdot f^2, \text{ ha } f_0 < f < f_l; \quad (4.85a)$$

$$\frac{v_1}{v_2} = k_2 \cdot f, \text{ ha } f_l < f. \quad (4.85b)$$

A (4.83)–(4.85) képleteket (4.82a)-ba behelyettesítve a valóságos kéthéjű szerkezetek léghanggátlására törvonalas közelítés adható meg a határfrekvencia alatti tartományban. A kiszámítható eredmény az egyhéjű szerkezet léghanggátlásához képest is kifejezhető.

Az 1. falréteghez képest a 2. falréteg és a szerkezeti kapcsolatok együttes hatására a valóságos kéthéjű fal rezonanciafrekvencia feletti léghanggátlásában, R_{kv} az egyhéjúként működő, $m''_1 + m''_2$ faljagos tömegű fal hanggátlásához, $R(m''_1 + m''_2)$ képest ΔR javulás tapasztalható a (4.85) képlet szerint. A javulás mértéke a rendszer minden paraméterétől függ:

- a két kéreglemez fajlagos tömege, m''_1 és m''_2 és határfrekvenciája, f_h ;
- a légrés mérete, d ;
- a rögzítés sűrűsége, azaz pontszerű kapcsolat esetén a rögzítési pontok közötti e távolság, vonalyszerű, bordák által létrehozott kapcsolat esetén a bordák közötti b távolság;

$$R_{kv} = R(m''_1 + m''_2) + \Delta R. \quad (4.86)$$

Az eredő hanggátlásgörbén az ideális kéthéjű szerkezet jellege is, a szerkezeti kapcsolatok miatt kialakuló javulás jellege is megjelenik. Ha a légrés-

sen keresztül vezető hangterjedéshez tartozik a léghanggátlás-javulás, akkor azt a (4.78) képlet alapján lehet közelíteni. Ha szerkezeti kapcsolatok hatására kialakuló hanggátlásjavulást kell meghatározni, az a (4.87a) összefüggés (pontszerű kapcsolat) vagy a (4.87b) összefüggés (vonalszerű kapcsolat) alapján történik. A K korrekciós tényező a (4.87c) összefüggéssel közelíthető, ha a két kéreglemez jellemzői nem térnek el lényegesen egymástól. A (4.87) képletekben az f_h határfrekvencia a két lemez határfrekvenciája közül a nagyobb számértékű, e jelenti a pontszerű kapcsolatban a rögzítési pontok átlagos távolságát, b pedig a vonalszerű kapcsolatban a bordatávolságot:

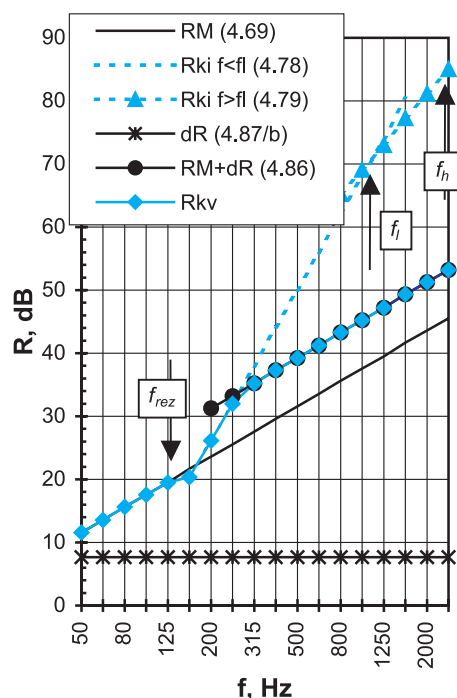
$$\Delta R = 20 \cdot \lg(e \cdot f_h) + K - 45; \quad (4.87a)$$

$$\Delta R = 10 \cdot \lg(b \cdot f_h) + K - 18; \quad (4.87b)$$

$$K = 20 \cdot \lg\left(\frac{m_1''}{m_1'' + m_2''}\right). \quad (4.87c)$$

A rezonanciafrekvencia értékét a (4.76.) összefüggés adja meg.

A 4.30. ábra a léghanggátlási szám frekvenciafüggésének általános törtvonalas közelítését mutatja be reális adatok felhasználásával, bejelölve, hogy melyik szakasz melyik összefüggés alapján hatá-



4.30. ábra. Hajlékony kéreglemezekből és borda kapcsolatból álló valóságos kéthéjú szerkezet számított léghanggátlása a határfrekvencia alatt

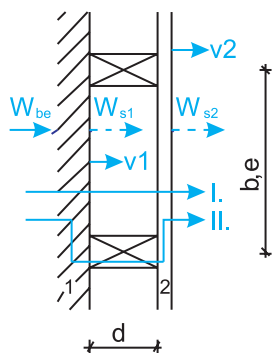
A kéreglemezek 9,5 mm vastag gipszkarton lemezből készültek, a bordatávolság 60 cm, a légrés 10 cm; $m'' = 9,5 \text{ kg/m}^2$, $f_h = 2460 \text{ Hz}$, $f_{rez} = 125 \text{ Hz}$, $f_l = 1100 \text{ Hz}$; $dR = \Delta R$

rozható meg. A léghanggátlás határfrekvencia alatti menetére a következő általános megállapítások tehetők:

- a kéreglemezek fajlagos tömegének növelése
 - növeli a léghanggátlást a rezonanciafrekvencia alatt;
 - csökkenti a rezonanciafrekvenciát, emiatt a gyors hanggátlás-növekedést eredményező, ideális kéthéjú szerkezet hanggátlási tartománya hamarabb kezdődik;
 - csökkenti a határfrekvenciát;
 - csökkenti ΔR értékét a (4.87) képletek szerint;
- a légrés növelése
 - nem befolyásolja a léghanggátlást a rezonanciafrekvencia alatt;
 - csökkenti a rezonanciafrekvenciát, emiatt a gyors hanggátlásnövekedést eredményező, ideális kéthéjú szerkezet hanggátlási tartománya hamarabb kezdődik;
 - csökkenti f_l értékét;
- a bordatávolság csökkentése
 - nem befolyásolja a rezonanciafrekvencia helyét és a hanggátlást a rezonanciafrekvencia alatt;
 - csökkenti ΔR értékét a (4.87) összefüggések szerint;
- a bordák menti rögzítés, tehát a vonalszerű szerkezeti kapcsolat cseréje pontszerű rögzítésre
 - nem befolyásolja a rezonanciafrekvencia helyét és a hanggátlást a rezonanciafrekvencia alatt;
 - a rögzítés rendszere szerint érdemben javíthat ΔR értékén a (4.87) képletek alapján.

4.8. Nehéz, merev lemezből és hajlékony lemezből felépülő, valóságos kéthéjú szerkezetek léghanggátlása (hanggátlást javító falburkolatok) [IV.8], [IV.1]

A nehéz, merev lemezből és hajlékony, vékony lemezből készülő valóságos, kéthéjú szerkezetek két rétege között az előzőekhez hasonlóan a szerkezeti kapcsolatok vagy pontszerű vagy vonalszerű jellegűek lehetnek. Az épületszerkezeti megfelelés a száraz vakolat, előtétlél, előtétfal szerkezeti csoport. A nehéz, merev szerkezet a kiinduló fal vagy földm, erre kerül burkolatként az építőlemezéből – gipszkarton lemez, faforgács lap, cementkötésű faforgács lap stb. – készült burkolati héj. A légrés méretét többi között a burkolati héj rögzítésmódja határozza meg. E szerkezeteket hanggátlást javító bur-



4.31. ábra. Hanggátlást javító burkolatok szerkezeti vázlata

kolatoknak is nevezik. A szerkezet keresztmetszetének vázlata a 4.31. ábrán látható. A nehéz, merev szerkezet az 1., a felületére beeső akusztikai teljesítmény W_{be} . A nehéz szerkezet átlagos rezgéssébsége v_1 . A légrés vastagsága d , amelyet a modellezés szempontjából levegő, a gyakorlatban részben szálaz szigetelőanyag tölt ki. A rögzítési pontok közötti átlagos távolság pontszerű szerkezeti kapcsolat esetén e , bordakapcsolat esetén b . A hajlékony, vékony lemez a 2., a rögzítési helyeken a rezgéssébség v_2 . Az 1. szerkezet által lesugárzott akusztikai teljesítmény W_{s1} akkor, amikor a burkolat nincs felszerelve. A 2. lemez által lesugárzott akusztikai teljesítmény W_{s2} .

Az előző példához hasonlóan a szerkezeten keresztül két hangterjedési út alakul ki:

- az I. jelű a nehéz szerkezet – légrés – hajlékony szerkezet – hangsugárzás a zaj ellen védendő oldalra elemeken keresztül vezet;
- a II. jelű a nehéz szerkezet – szerkezeti kapcsolat – hajlékony szerkezet – hangsugárzás a zaj ellen védendő oldalra elemeken át jut akusztikai teljesítmény a zaj ellen védendő oldalra.

A szerkezet akusztikai modellezése és méretezése e két hangterjedési út számbavétele alapján történhet.

Az alapszerkezet léghanggátlását a (4.88) összefüggés fejezi ki, felhasználva (4.11.) képletet, a léghanggátlási szám meghatározását, valamint azt, hogy a merev, nehéz szerkezet sugárzási foka 1. A szerkezet felülete S . A burkolat által lesugárzott akusztikai teljesítményt (4.81) összefüggés fejezi ki, az ϵ tényező a gerjesztés módjától függ, lásd a (4.28/c) és a (4.32) összefüggéseket. A rögzítés sűrűségét pontszerű csatolás esetén n'' , vonalszerű csatolás esetén n' fejezi ki, értéküket (4.89/a) és (4.89/b) képletek adják meg. A pontszerű rögzítésre jellemző átlagos rögzítési pont távolságot e , a vonalszerű rögzítésre jellemző átlagos bordatávolságot b jelöli. Az előbbi mérték-egysége $1/m^2$, az utóbbié $1/m$.

$$R_1 = 10 \cdot \lg \left(\frac{W_{be}}{\rho_L \cdot c \cdot S \cdot v_1^2} \right); \quad (4.88)$$

$$n'' = \frac{1}{e^2}; \quad (4.89a)$$

$$n' = \frac{1}{b}. \quad (4.89b)$$

Az összetett szerkezet II. hangátviteli úthoz tartozó eredő léghanggátlását a (4.90a) és (4.90b) képletek adják meg. Mivel az 1. szerkezet sokkal merevebb, mint a 2., merev, tömeg nélküli szerkezeti kapcsolatokra $v_1 = v_2$. A határfrekvencián a hullámhossz λ_h :

$$R = 10 \cdot \lg \left(\frac{W_{be}}{W_{s2}} \right) = 10 \cdot \lg \left(\frac{W_{be}}{W_{s1}} \right) + 10 \cdot \lg \left(\frac{W_{s1}}{W_{s2}} \right) = R_1 + 10 \cdot \left(\frac{\pi^3}{8 \cdot n'' \cdot \lambda_h^2} \right); \quad (4.90a)$$

$$R = 10 \cdot \lg \left(\frac{W_{be}}{W_{s2}} \right) = 10 \cdot \lg \left(\frac{W_{be}}{W_{s1}} \right) + 10 \cdot \lg \left(\frac{W_{s1}}{W_{s2}} \right) = R_1 + 10 \cdot \left(\frac{\pi}{2 \cdot n' \cdot \lambda_h} \right). \quad (4.90b)$$

A légrésen keresztül vezető hangterjedési út hanggátlás javulása, ΔR_l a rezonanciafrekvencia felett a korábbiakkal összehangban:

$$\Delta R_l = 40 \cdot \lg \left(\frac{f}{f_{rez}} \right). \quad (4.91)$$

Az 1. jelű alapszerkezethez merev, tömeg nélküli csatolóelemekkel rögzített burkolat – száraz vakolat, előtét, előtétfal – a rezonanciafrekvencia alatt nem javítja az alapszerkezet léghanggátlását. A rezonanciafrekvencia felett és a hajlékony, vékony héj-határfrekvencia alatt a szerkezet javít az alapszerkezet léghanggátlásán. A javítás törtvonalas közelítését a (4.91), (4.93)–(4.94) összefüggések fejezik ki.

A rezonanciafrekvencia értékét a (4.76) képletből lehet kiszámítani. A gyakorlatban $m''_1 \gg m''_2$, az összefüggés részben ezért, részben a merőleges beesési szög miatt egyszerűbb lesz:

$$f_{rez} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{\rho_L \cdot c^2}{m''_2 \cdot d}}. \quad (4.92)$$

A légrésen keresztül vezető, I. hangterjedési út hanggátlás javító hatását a (4.91) képlet fejezi ki a rezonanciafrekvencia felett.

A pontszerű merev, tömeg nélküli szerkezeti kapcsolat hanggátlás javító hatása a törtvonalas közelítésben a következő:

$$\Delta R_{II,p} = 10 \cdot \lg \left(\frac{\pi^3 \cdot f_h^2}{8 \cdot n'' \cdot c^2} \right). \quad (4.93)$$

A vonalszerű, merev, tömeg nélküli szerkezeti kapcsolat hanggátlást javító hatása:

$$\Delta R_{II,v} = 10 \cdot \lg \left(\frac{\pi \cdot f_h}{2 \cdot n' \cdot c} \right). \quad (4.94)$$

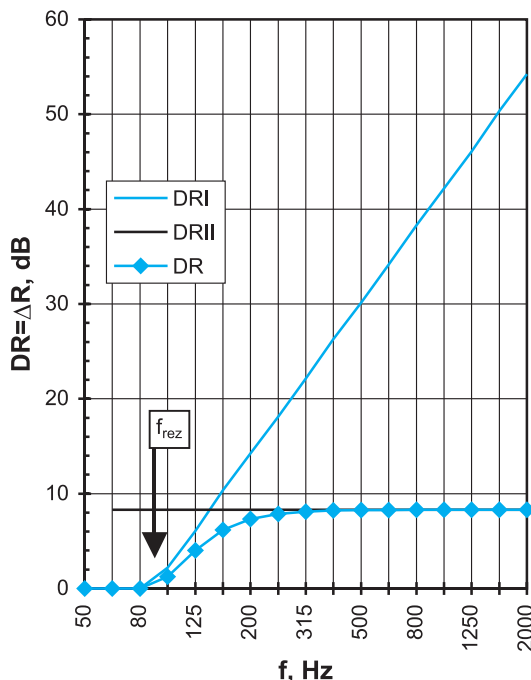
A II. hangátviteli úthoz tartozó javító hatások frekvenci függetlenek, tehát platóként, vízszintes szakaszként jelennek meg.

A burkolat két hangterjedési útjának eredő javító hatása:

$$\Delta R = -10 \cdot \lg (10^{-0,1 \cdot \Delta R_I} + 10^{-0,1 \cdot \Delta R_{II}}). \quad (4.95)$$

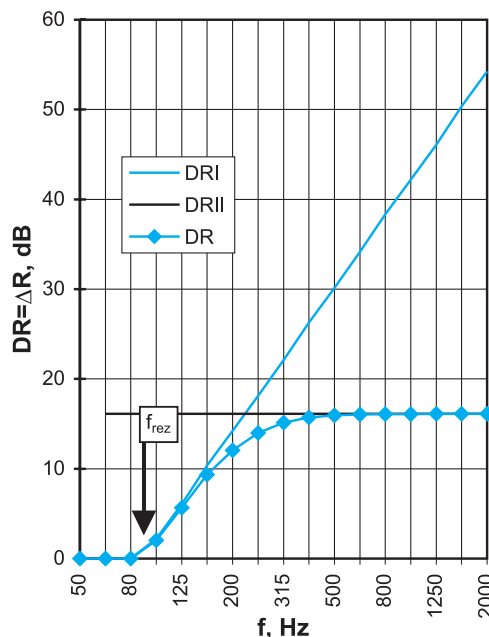
Az eredő javító hatás törtvonalas közelítését a 4.32. és 4.33. ábra szemlélteti. A hanggátlásjavítás alapvető tendenciái a következők:

- a kéreglemez vastagságának növelése csökkenti a rezonanciafrekvenciát, de egyúttal csökkenti ΔR_{II} értékét is, mert a vastagság növelésével a határfrekvencia is csökken;
- a légrésvastagság növelése csökkenti a rezonanciafrekvenciát, a többi paramétert nem változtatja;
- a hajlékony héj rögzítési módjai közül a pontszerűvel lényegesen nagyobb javulás érhető el elvileg, mint a vonalszerű rögzítéssel;
- a rögzítés sűrűségének növelése csökkenti ΔR_{II} értékét;



4.32. ábra. Falburkolat léghanggátlás-javító hatása

A burkolat 9,5 mm gipszkarton lemezből készül ($\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, $E = 7 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$), 60 cm-es bordaosztással, vonalmenti rögzítéssel erősítik az alapszerkezethez. A légrés 5 cm vastag. ΔR , DR , eredő hanggátlás javulása; ΔR_I , DR_I az I. hangterjedési út hanggátlás javulása; ΔR_{II} , DR_{II} a II. hangterjedési út hanggátlás javulása



4.33. ábra. Falburkolat léghanggátlás javító hatása

A burkolat 9,5 mm gipszkarton lemezből készül ($\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, $E = 7 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$), pontszerű rögzítéssel erősítik az alapszerkezethez. A rögzítési pontok sűrűsége 4,86 db/m². A légrés 5 cm vastag. További megjegyzések azonosak a 4.32. ábrával

- a javulás mértéke első közelítésben nem függ az alapszerkezettől;
- az egyadatos mennyiséggel számolva az alapszerkezet súlyozott léghanggátlási száma közelítőleg ΔR_{II} értékével javul akkor, ha a rezonanciafrekvencia 100 Hz alatt van.

4.9. Födémek szabványos lépéshangnyomóasszintjének értelmezése [IV.7]

A szabványos lépéshangnyomóasszint a födémek lépéshang elleni szigetelését leíró szerkezetjellemző, értelmezése az 5. fejezetben található. Szabványos vizsgálata során a födém felületét az ún. kopogógéppel előállított erőimpulzusok érik, ezek hozzák rezgésbe a szerkezetet. A kopogógép olyan mechanizmus, amely 10 Hz ismétlődési frekvenciával állít elő erő impulzusokat. Az impulzusok nagysága a hitelesítéssel állandó, mert az impulzusokat 0,5 kg tömegű, henger alakú, a szerkezet felületére szabadon leeső „kalapácsfejek” hozzák létre.

A kalapácsfejek által okozott erő időfüggvényét a (4.96) összefüggés fejezi ki, $f_{\bar{u}}$ az ütések frekvenciája, $\omega_{\bar{u}}$ az ütések körfrekvenciája, n a Fourier-sorfejtés indexe, F_n az n -edik tag amplitúdója:

$$F(t) = \sum_n F_n \cdot \cos(n \cdot \omega_{\bar{u}} \cdot t) \quad (4.96)$$

Az n -edik tag amplitúdóját a (4.97) képlet adja. A vizsgálathoz használt eszköz rövid idejű erőimpulzusokat állít elő, ezért a koszinuszos tag nagysága nem nagyon tér el 1-től. Az ütközés nem ideálisan rugalmas, ezért az erő nagysága a kalapács impulzusának nagyságával határozható meg. A kalapács impulzusa az m_k tömegéből és az ütközés pillanatában mérhető v_k sebességéből számítható:

$$F_n = \frac{2}{T} \int_0^T F(t) \cdot \cos(n \cdot \omega_z \cdot t) dt = 2 \cdot m_k \cdot v_k \cdot f_{\bar{u}}. \quad (4.97)$$

A kalapács érintkezési pontjában a vizsgált szerkezet rezgésebbessége, $v_f(t)$, a födém bemeneti impedanciája, Z_f segítségével határozható meg a (4.98) összefüggés szerint. Ha a számítást nem egy meghatározott frekvencián, hanem Δf frekvenciasávban kell elvégezni, és e sávban N spektrumvonal található, akkor az ütközési pontban a födém rezgésebbességének effektív értékét, v_{eff} -et a (4.99) fejezi ki:

$$v_f(t) = \sum_n \frac{2 \cdot I \cdot f_{\bar{u}}}{Z_f} \cdot \cos(n \cdot \omega_z \cdot t); \quad (4.98)$$

$$v_{eff} = \frac{I \cdot f_{\bar{u}} \cdot \sqrt{2 \cdot N}}{|Z_f|}. \quad (4.99)$$

A szerkezetbe bevitt akusztikai teljesítményt a korábbiak alapján a (4.100) összefüggés adja meg. A födém bemeneti impedanciája mellett a kalapács Z_k impedanciája is szerepel. Ez az összefüggés, ill. az ez által tükrözött fizikai tartalom az oka annak, hogy a könnyű födém szerkezete lépéshang-szigetelésének vizsgálati módszere és értékelése napjainkban is kutatási téma: a födém tömege összemérhető a kalapács tömegével. A használat során a szerkezetbe bevitt teljesítmény nem a kalapács, hanem a járkáló személyek lábának tömegétől függ:

$$W_{be} = \frac{|F|^2}{2} \cdot \operatorname{Re} \left(\frac{1}{Z_f + Z_k} \right). \quad (4.100)$$

A bevitt teljesítmény az eredő veszteségi tényezőnek megfelelően távozik a rendszerből – l. a (3.219) összefüggést – és így a gerjesztett födém átlagos rezgésebbességének effektív értéke, v_{eff} is meghatározható:

$$\frac{v_{eff}}{\sqrt{\omega \cdot m'' \cdot \eta \cdot S}} = \sqrt{\operatorname{Re} \left(\frac{1}{Z_f + Z_k} \right)}; \quad (4.101)$$

m'' a födém fajlagos tömege; S a felülete; η a veszteségi tényező.

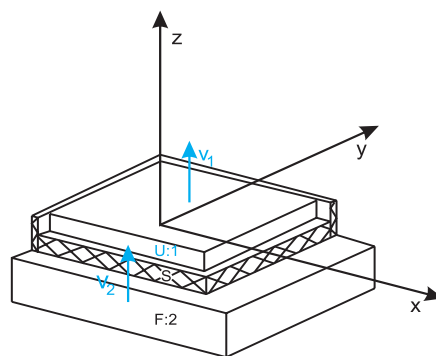
A födém szabványos lépéshangnyomásszintjének kopogógépes vizsgálata során a födémre ható erő nagysága a vizsgálati módszer sajátossága, hitelesítéssel beállítható. A födém felülete, fajlagos tömege, veszteségi tényezője és bemeneti impedanciája a szerkezet műszaki jellemzői. A rezgésebbesség effektív értékének átlaga közvetlen kapcsolatban van az elsugárzott teljesítménnyel és így a födém szabványos lépéshangnyomásszintjével. Minél kisebb v_{eff} értéke, annál jobb a lépéshang elleni szigetelés.

A (4.101) összefüggés arra is rávilágít, hogy a könnyű – kis fajlagos tömegű – szerkezet kisebb szigetelést eredményez. A szerkezet veszteségi tényezője szintén fontos hatású, és ez már a laboratóriumi vizsgálat során kifejezésre jut.

4.10. Úszópadló lépéshang-szigetelést javító hatásának modellezése

Az úszópadló hatékonyan fokozza a födémek lépéshang-szigetelését. Általános metszete a 4.34. ábrán látható. Az F lemez a burkolatlan födém, amelyet első közelítésben tömör lemeznek tekintenek, a padlóburkolatok szigetelést javító hatásának törtvonalas közelítései azonban függetlenek az alapszerkezettől. Az S réteg rugalmas lemez, a gyakorlatban ez a lépéshang-szigetelő lemez. Leggyakrabban ásványgyapot vagy műanyaghab anyagú, a számításokban az s'' fajlagos dinamikai merevségével veszik figyelembe. Az úsztatott aljzat, amit az ábrán U jelöl, az esetleg szükséges technológiai szigetelés után (erre kerül) készülhet helyszíni betonból vagy akár építőlemezekből is. Ez utóbbit a hétköznapi gyakorlatban száraz esztrichnek nevezik. Mind a födém, mind az úsztatott aljzatban testhangterjedés, tehát hajlítóhullám-terjedés alakul ki, amit a részletesebb számítás figyelembe vesz. A közbülső, rugóként működő lemezben mind a részletes, mind a közelítő számítás nem vesz figyelembe hullámterjedést, csak helyi hatást. Részletes számítás több szakirodalmi forrás tartalmaz, jó áttekintő anyag található [4.14]-ben, [IV.1]-ben, az ismertetés [IV.8] alapján készült. A törtvonalas közelítés a [IV.2] anyagban található.

Az úsztatott aljzat és a födém dinamikai merevsége B_1 és B_2 , vastagságuk, testsűrűségük és fajlagos tömegük h_1 és h_2 , ρ_1 , ρ_2 , m''_1 és m''_2 . Az alapszerkezet rezgés sebessége v_2 , az úsztatott aljzaté v_1 . A két lemezben a hullámszám k_{B1} , illetve



4.34. ábra. Úsztatott födém szerkezet elvi ábrája a lépéshang-szigetelés meghatározásához

k_{BB2} . A gerjesztés tiszta harmonikus, kiindulásul és a hullám-impedancia alkalmazása érdekében a gerjesztés a felület mentén ható helyfüggő nyomás, p .

Az úsztatott aljzatra fölülről tehát a gerjesztőnyomás, alulról a rugalmas lemez hat. A fődémet a rugalmas lemez által átadott nyomás hozza rezgésbe. Ez tükröződik a (4.102) egyenletben, amely az 1. indexű lemez, valamint a (4.103) egyenletben, amely a 2. indexű úsztatott aljzat mozgásegyenlete. Az egyenletek és a megoldás is a 4.2. alfejezet alapján határozható meg:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}\right)^2 v_1(x, y) - k_{B1}^4 \cdot v_1(x, y) = \frac{j \cdot \omega}{B_1'} \cdot [p(x, y) - s \cdot (v_1(x, y) - v_2(x, y))]; \quad (4.102)$$

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}\right)^2 v_2(x, y) - k_{B2}^4 \cdot v_2(x, y) = \frac{j \cdot \omega}{B_1'} \cdot [-s \cdot (v_1(x, y) - v_2(x, y))] \quad (4.103)$$

A 4.2. alfejezet megoldási menetét követve határozható meg a két lemez fajlagos hullámimpedanciája, Z'_{h1} és Z'_{h2} , k_x és k_y értelmezése is azonos:

$$Z'_{h1} = \frac{p}{v_1} = \frac{B_1'}{j \cdot \omega} \cdot \frac{\left((k_x^2 + k_y^2)^2 - k_I^4\right) \cdot \left((k_x^2 + k_y^2)^2 - k_{II}^4\right)}{(k_x^2 + k_y^2)^2 - k_{BB2}^4}; \quad (4.104)$$

$$Z'_{h2} = \frac{p}{v_2} = \frac{-B_1' \cdot B_2'}{j \cdot \omega \cdot s} \cdot \left((k_x^2 + k_y^2)^2 - k_I^4\right) \cdot \left((k_x^2 + k_y^2)^2 - k_{II}^4\right). \quad (4.105)$$

A jelölések:

$$k_{I,II}^4 = \frac{1}{2} \cdot (k_{BB1}^4 + k_{BB2}^4) \pm \sqrt{\frac{1}{4} \cdot (k_{BB1}^4 - k_{BB2}^4)^2 + \frac{(\omega_1 \cdot \omega_2)^2 \cdot m_1'' \cdot m_2''}{B_1' \cdot B_2'}}; \quad (4.106)$$

$$k_{BB1}^4 = \frac{\omega^2 \cdot m_1''}{B_1'} \cdot \left(1 - \frac{\omega_1^2}{\omega^2}\right) \quad (4.107a)$$

$$k_{BB2}^4 = \frac{\omega^2 \cdot m_2''}{B_2'} \cdot \left(1 - \frac{\omega_2^2}{\omega^2}\right) \quad (4.107b)$$

$$\omega_1^2 = \frac{s''}{m_1''} \quad (4.108a)$$

$$\omega_2^2 = \frac{s''}{m_2''} \quad (4.108b)$$

$$k_1^4 = \frac{\omega^2 \cdot m_1''}{B_1'} \quad (4.109a)$$

$$k_2^4 = \frac{\omega^2 \cdot m_2''}{B_2'} \quad (4.109b)$$

Az összefüggések közül ω_1 és ω_2 szemléletes jelentése a következő: mindkét rezonancia körfrekvencia egy-egy olyan rendszer rezonancia körfrekvenciája, amely végtelen nagy tömegű, merev aljzatra fektetett s'' fajlagos dinamikai merevségű rugalmas lemez, és a rajta levő m_1'' , vagy m_2'' fajlagos tömegű, tömegként működő rétegre jellemző. A (4.107.) kép-

letekben levő csatolt rendszer hullámszámai, k_{BB1} és k_{BB2} az erős csatolás miatt jelennek meg. Ha a szigetelés jó, tehát például jó méretezés esetén a rezonanciafrekvencia felett, a csatolás gyenge lesz és ekkor e kifejezések a megfelelő indexű elem hullámszámaivá egyszerűsödnek a (4.109) képlet szerint. A megoldás további lépései megegyeznek a 4.2.-ben már követett lépésekkel.

A lépéshang-szigetelés értelmezésének fizikai tartalma pontszerű erőhatáshoz kapcsolódik, amit a 3.11.4. pontban ismertetett módon lehet megoldani, a megoldás a $H_0^{(2)}$ a másodrendű Hankel-függvény bevezetését eredményezi. A következő összefüggésekben a gerjesztési pont és a mérési pont közötti távolságot r jelöli. Az egyszerűbb áttekintés érdekében a (4.110) képlettel bevezetve a az egyes lemezek rezgésebségét a (4.111)–(4.113) képletek adják meg. Az 1. lemez, tehát az úsztatott aljzat rezgésebsége $v_1(r)$, $v_2(r)$ a fődém rezgésebsége az úsztatott aljzat alatt, és $v_{20}(r)$ a fődém rezgésebsége abban az esetben, ha a gerjesztés közvetlenül a felületén történik, tehát nincs rajta úsztatott aljzat. A gerjesztőerő amplitúdója F_0 :

$$\Pi(k_{I,II} \cdot r) = H_0^{(2)}(k_{I,II} \cdot r) - H_0^{(2)}(j \cdot k_{I,II} \cdot r); \quad (4.110)$$

$$v_1(r) = \frac{F_0 \cdot \omega}{8 \cdot B_1' \cdot (k_I^4 - k_{II}^4)} \cdot \left(\frac{k_I^4 - k_{BB2}^4}{k_I^2} \Pi(k_I \cdot r) - \frac{k_{II}^4 - k_{BB2}^4}{k_{II}^2} \Pi(k_{II} \cdot r) \right); \quad (4.111)$$

$$v_2(r) = \frac{F_0 \cdot \omega}{8 \cdot B_1' \cdot (k_I^4 - k_{II}^4)} \cdot \frac{s''}{B_2'} \cdot \left(\frac{1}{k_I^2} \Pi(k_I \cdot r) - \frac{1}{k_{II}^2} \Pi(k_{II} \cdot r) \right); \quad (4.112)$$

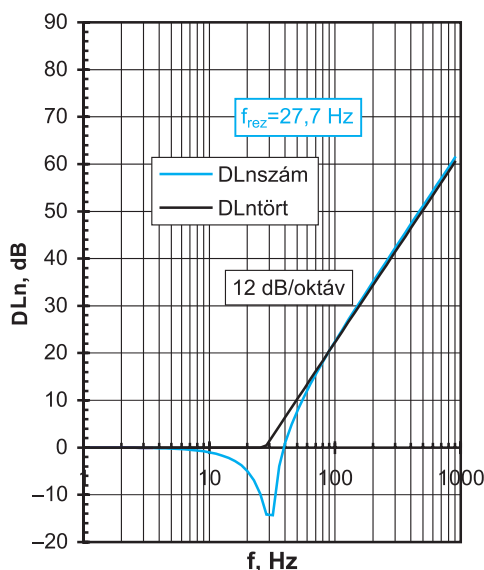
$$v_{20}(r) = \frac{F_0 \cdot \omega}{8 \cdot B_1' \cdot k_2^2} \cdot (\Pi(k_2 \cdot r)). \quad (4.113)$$

Az úsztatott padló szabványos lépéshangnyomásszint-csökkenése az 5. fejezet szerint értelmezve a rezgésebségekből a (4.114) képlettel határozható meg:

$$\Delta L_n = 20 \cdot \lg \left(\left| \frac{v_{2,0}}{v_2} \right| \right). \quad (4.114)$$

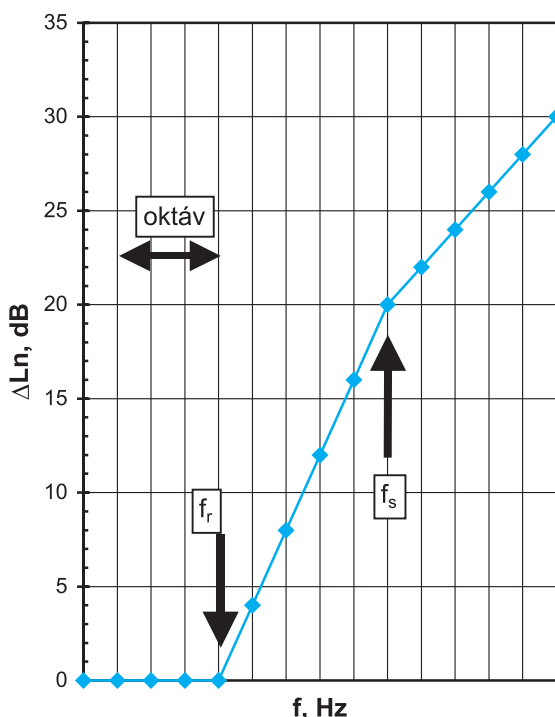
A 4.35. ábrán a (4.114) képlet alkalmazásával hibátlanul kivitelezett úszópadrólra vonatkozó számítás látható: a fődém 20 cm vastag, az úsztatott aljzat pedig 5 cm vastag monolit vasbeton lemez $E = 26 \cdot 10^{10}$ Pa, $\rho = 2200$ kg/m³; az úsztatórétteg 3 cm vastag, dinamikai rugalmassági modulusa $E_d = 100$ kPa, így a rezonanciafrekvencia 27,7 Hz. Analitikusan is levezethető és az ábra is mutatja a legegyszerűbb törtvonalas közelítést: a rezonanciafrekvencia alatt a szerkezet szigetelése 0 dB, a rezonanciafrekvencia felett a szigetelést 12 dB/oktáv meredekségű, a rezonanciafrekvenciától induló egyenes közelíti. A számítások során a ΔL_n értéke nem mutatott függést r értékétől a $k \cdot r \ll 1$ tartományban.

Az úsztatott fődém szerkezetek lépéshang-szigetelést javító hatásának, azaz a ΔL_n szabványos lépéshangnyomásszint-csökkenése frekvenciafüggő értékére törtvonalas közelítés dolgozható ki, amely [IV.2] alapján a 4.36. ábra szerint épül fel. A köze-



4.35. ábra. Úszópaddló lépéshang-szigetelést javító hatásának részletes számítása és törtvonalas közelítése a [IV.8] alapján

A földem 20 cm vastag, az úsztatott aljzat 5 cm vastag monolit vasbeton lemez ($E = 2,6 \cdot 10^{10}$ Pa, $\rho = 2200$ kg/m³; az úsztató réteg 3 cm vastag, dinamikai rugalmassági modulusa $E_d = 100$ kPa, így a rezonanciafrekvencia 27,7 Hz; DL_n szám: részletes számítás [IV.8] alapján, DL_n tört: a rezonanciafrekvencia felett 12 dB/oktáv törtvonalas közelítés; $DL_n = \Delta L_n$



4.36. ábra. Úszópaddló szabványos ΔL_n lépéshangnyomásszint-csökkenésének törtvonalas közelítése

ΔL_n az úszópaddló által okozott szabványos lépéshangnyomásszint-csökkenés; f_r a szerkezet rezonanciafrekvenciája; f_s a szigetelőanyagban kialakuló hullámterjedés határa

lítés két jellegzetes frekvenciát tartalmaz, és három szakaszból áll:

- az úsztatott aljzat mint egy szabadsági fokú rezgőrendszer f_r rezonanciafrekvenciáját a (4.115) képlet fejezi ki, m_u'' az úsztatott aljzat rezonanciafrekvenciája, s'' az úsztatóréteg fajlagos dinamikai merevsége; zárt cellás műanyag habok esetében s'' az anyag rugalmasságát fejezi ki, szálas szigetelőanyagok esetében tartalmazza az anyagba zárt levegő dinamikai merevségét is:

$$f_r = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{s''}{m_u''}}; \quad (4.115)$$

- a szálas szigetelőanyagban kialakuló hullámterjedési jelenségek határa az f_s frekvenciától figyelhető meg, melyet közelítően a (4.116) képlet ad meg; a szigetelőlemez (úsztatóréteg) fajlagos tömege m'' :

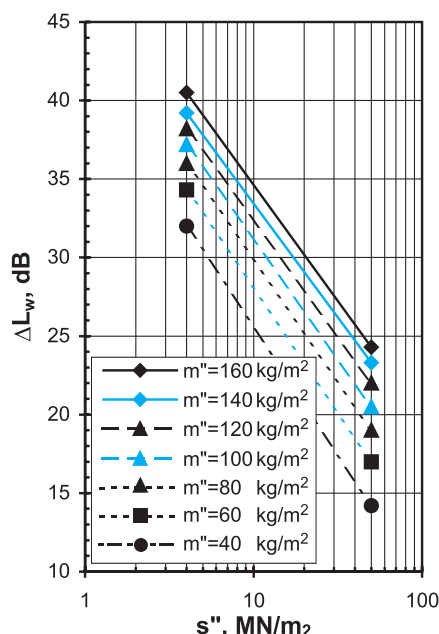
$$f_s \approx 0,7 \cdot f_r \cdot \sqrt{\frac{m_u''}{m''}}; \quad (4.116)$$

- a rezonanciafrekvencia alatt a szerkezet nem szigetel, ezért ott ΔL_n értéke 0;
- az $f_r < f < f_s$ frekvencia tartományban ΔL_n értékét a rezonanciafrekvenciától indított 12 dB/oktáv meredekségű egyenes közelíti;
- az $f_s < f$ frekvenciatartományban ΔL_n értékét 6 dB/oktáv meredekségű egyenes közelíti, melyet $\Delta L_n(f_s)$ 2. szakaszának értékétől kell indítani.

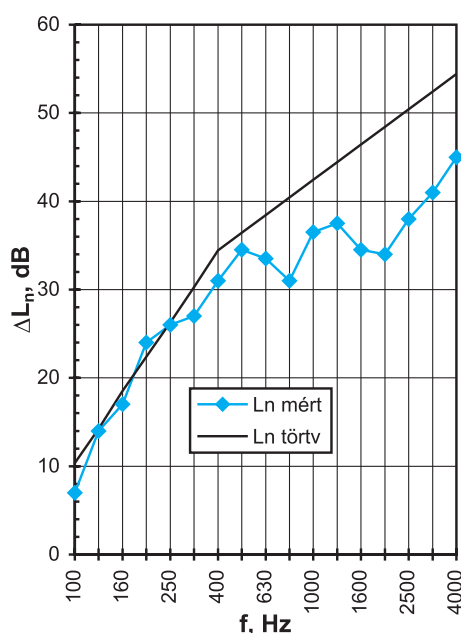
Ha a burkolatlan földem elegendően merev és szabványos lépéshangnyomásszintjének frekvenciafüggése nem tartalmaz kiugró csúcsokat, akkor közelítő számításokat az úsztatóréteg súlyozott szabványos lépéshangnyomásszintjével is lehet végezni (l. a 9. fejezetet). Az úsztatott szerkezet ΔL_w súlyozott szabványos lépéshangnyomásszintje pedig a szerkezet egyadatos mennyiségei alapján közelíthető az [I.15] alapján. A közelítés számításokon alapul, és a 4.37. ábrán látható.

Egy laboratóriumi mérés eredménye és a termékjellemzőkből kiszámítható közelítő adatok a 4.38. ábrán láthatók. A törtvonalas közelítés 6 dB/oktáv meredekségű szakaszának indulása, azaz f_1 értéke tűnik csak optimistának.

A 4.9. alfejezetben ismertetett közelítések szigorúan csak a feltétellel alkalmazhatók, hogy a földem sokkal merevebb, mint az úsztatott aljzat. Nem alkalmazhatók e közelítések ezért például a szerelt földemre épített úsztatott szerkezetek hatásának becslésére, de ilyen feladatokban az 5. fe-



4.37. ábra. Úszópadró súlyozott szabványos lépéshangnyomásszint-csökkenésének becslése az úsztatórét s'' , dinamikai merevsége és az úsztatott aljzat m'' fajlagos tömege alapján [I.15] szerint



4.38. ábra. Példa úszópadró ΔL_n szabványos lépéshangnyomásszint-csökkenésének tört vonalas közelítésére és a ΔL_w súlyozott szabványos lépéshangnyomásszint-csökkenésre

A szigetelőanyag a Saint Gobain – ISOVER TDPS 25/20 terméke, melynek katalógusadatai $s''=10,5 \text{ MN/m}^2$, a terhelés alatti vastagság 20 mm; testsűrűsége nem katalógusadat, értéke közelítőleg 60 kg/m^3 ; porozitása nem katalógusadat, de feltételezhető, hogy 0,9-nél nagyobb; a laboratóriumi beépítésben az úsztatott beton aljzat fajlagos tömege 134 kg/m^2 ; az rezonanciafrekvenciához a levegő dinamikai merevségét a [II.23] szabvány alapján lehet meghatározni; a rezonanciafrekvencia számított értéke kerekítve $f_r=55 \text{ Hz}$, az f_s frekvencia értéke 577 Hz ; a vizsgálat a BME ÉSZÉGI Épületakusztikai Laboratóriumban történt; ΔL_w mért értéke 32 dB [I.15] alapján közölt katalógusadata 31 dB

jezetben ismertetett vizsgálati módszer sem megfelelő. A jelenlegi ismeretek szintjén a szerelt földemre épített burkolatokat az alapszerkezettel együtt lehet csak vizsgálni és modellezni, mert kölcsönösen befolyásolják egymás működését.

4.11. Szerkezeti csomópontok rezgésgátlása és a rezgésgátlás hatása az épületszerkezetek hangszigetelésére

4.11.1. Hullámfajták beérkezése, visszaverődése és átvitele [IV.8], [IV.2]

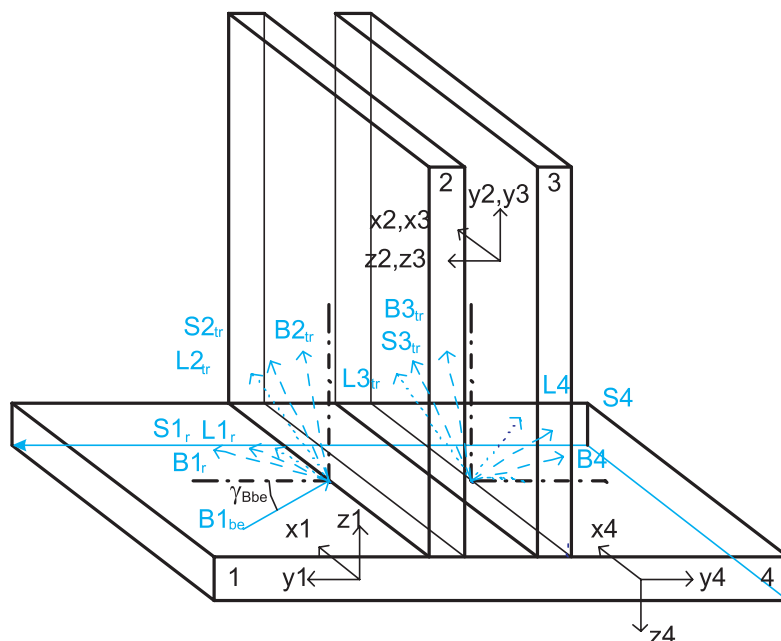
A 9. fejezetben ismertetett, az épületek helyiségei közötti hangszigetelést meghatározó méretezési módszerek azon alapulnak, hogy a határoló szerkezeteken keresztül vezető hangátviteli utak rezgésgátlása meghatározható. Különböző alaprajzi példákhoz kapcsolva többféle csomóponti elrendezést soroltak fel az egyes méretezési módszerekhez:

- egyhjú elemekből felépülő, eltérő geometriájú csomópontok
 - L alakú;
 - szimmetrikus és aszimmetrikus T alakú;
 - X alakú;
- egy- és kéthjú elemek kombinációjából felépülő csomópontok
 - Π és kettős Π alakú.

A szerkezeti csomópontok rezgésgátlásának tárgyalása során egyebek mellett a csomópontokra beérkező és az abból eltávozó hullámok fajtáját is figyelembe kell venni. A gyakorlati fontosság miatt a csomópontokra beérkező testhanghullám mindig hajlítóhullám lesz, erre a B index utal, a csomópontból távozó, visszavert vagy átvitt hullám pedig a három alapvető hullámforma bármelyike, tehát hajlító-, longitudinális vagy nyíróhullám egyaránt lehet. A longitudinális hullám jele L , a nyíróhullámé pedig S . A pilléreken keresztül vezető szerkezeti kapcsolatokban a pillér mozgásának leírásához a longitudinális és hajlítóhullám mellett a torziós hullám létrejöttével is számolni kell, ezt T fogja jelölni.

A szerkezeti kapcsolatok vagy merevek, vagy rugalmasak lehetnek. Ez a megkülönböztetés a peremfeltételek felírásánál játszik fontos szerepet, de valóságos tartalma is van, szerkezeti részletekhez kapcsolható.

Az áttekinthetőség érdekében nem a legösszetettebb, hanem egy egyszerűbb alakú, Π formájú szerkezeti csomópont elemzése található a következő részekben. A csomópont vázlata a 4.39. ábrán látható. A hosszágakban és keresztágakban összesen 4 elem csatlakozik. Az egyszerűbb felírás érdekében



4.39. ábra. Elrendezés Π alakú szerkezeti csomópont rezgésgátlásának meghatározásához, ha a csomópont elemei között merev kapcsolat van. Hullámfajták az egyes elemekben
 L longitudinális hullám; B hajlítóhullám; S nyíróhullám; tr index: a csomóponton átjutott és a 2, 3, 4. elemekben terjedő hullám;
 be index: a csomópontra beeső hullám; r index: a csomóponttól visszaverődött hullám

minden elemhez saját koordináta-rendszer tartozik. A közös csomóvonal az x tengely, erre merőleges az y irány, az elemek síkjára merőleges a z irány. Minden elem több irányban végtelen kiterjedésű:

- vagy a $+y$, vagy a $-y$ irányban;
- $\pm x$ irányban.

Az egyes elemekben kialakuló hullámok a következők lesznek:

- a csomópontba beérkező hajlítóhullám jele $B1$, a rezgésssebesség v_{B1} az 1. indexű elem keresztül $+\infty$ irányból $-y$ irányba terjed; a beesési szög φ_{B1} , a hullám amplitúdója v_{B0} ;
- a beérkező hullám a csomóponttól visszaverődik, hajlítóhullámként $+\infty$ irányba terjed; a visszavert hajlítóhullám jele $B1r$, a rezgésssebesség v_{B1r} , a visszaverődési szög megegyezik a beesési szöggel, a reflexiós tényező r_{B1} ; a peremfeltételek teljesítése miatt egy közeltéri hatású, exponenciálisan csillapodó hajlítóhullámú összetevő is kialakul, az ehhez tartozó visszaverődési tényező p_{B1} ;
- a visszaverődés során longitudinális és nyíróhullám is keletkezik, jelük $L1r$ és $S1r$, visszaverődési szögeik φ_{L1} és φ_{S1} , a reflexiós tényezők rendre r_{L1} és r_{S1} ;
- bármelyik i indexű további elemekben hajlító-, longitudinális és nyíróhullám alakul ki, jelük Bi , Li és Si ; távolodnak a csomóponttól, áthaladási szögeik φ_{Bi} , φ_{Li} és φ_{Si} ; átviteli tényezőik t_{BBi} , t_{BLi} és t_{BSi} ; az átvitt hullámok a $+\infty$ irányba terjednek; a hajlítóhullámhoz a peremfeltételek teljesítése miatt egy közeltéri hatású, exponenciálisan csillapodó hajlítóhullámú összetevő is kialakul, az ehhez tartozó visszaverődési tényező d_{Bi} ;
- minden hullámterjedésnél az időfüggés harmonikus, ez a képletekben nem szerepel;
- minden hullámterjedésben a frekvencia megegyezik a gerjesztés, tehát a beeső hullám frekvenciájával, a hullám-

hosszakat azonban minden közeg a saját anyagjellemzőivel, hullámfajtajával és a közös a frekvenciával határozza meg;

- a 2...4. közegben kialakuló hullám áthaladási szöge, hullámhossza és a beesési szög és az 1. közegben terjedő hajlítóhullám hullámhossza között kölcsönös kapcsolat van, ezt a nyomhullámhosszak egyezése fejezi ki, l. pl. a 2.2.5. pontot.

A hullámfajták közös jelölése K , az általános összefüggések tömörebb felírása érdekében. Az 1. közegben a csomópontba érkező hajlítóhullám és bármelyik közegben a visszavert vagy áthaladó hullám visszaverődési, áthaladási szöge között a (4.115) képlet terem kapcsolatot:

$$\frac{\lambda_{B1}}{\sin(\varphi_{B1})} = \frac{\lambda_{Ki}}{\sin(\varphi_{Ki})}. \quad (4.115)$$

Ennek megfelelően minden hullámfajta-hoz van az 1. közegben terjedő hajlítóhullámnak egy olyan beesési szöge, amelynél nagyobb beesési szögek esetén az adott hullámfajta az i -edik szögben már nem jön létre, tehát a visszaverődési vagy átviteli szög éppen 90° lenne. A beeső hajlítóhullám φ_{Bh} határszög:

$$\sin(\varphi_{Bh}) = \frac{\lambda_{B1}}{\lambda_{Ki}}. \quad (4.116)$$

Az egyszerűbb képletek elérése érdekében a hullámhosszak, terjedési sebességek, illetve szögek arányának jelölésére célszerű bevezetni a κ_{Ki} jelölést:

$$\kappa_{Ki} = \frac{k_{Ki}}{k_{B1}} = \frac{\lambda_{B1}}{\lambda_{Ki}} = \frac{c_{B1}}{c_{Ki}} = \frac{\sin(\varphi_{B1})}{\sin(\varphi_{Ki})}. \quad (4.117)$$

A nyomhullámhosszak egyezésének feltétele miatt az x irányú függés mind a visszaverődés, mind az átvitel során minden hullámfajta azonos alakú lesz:

$$v_0(x) = v_{B10} \cdot e^{-j \cdot k_{B1} \cdot \sin(\varphi_{B1}) \cdot x}. \quad (4.118)$$

Példaként néhány hullám felírását mutatják az (4.119)–(4.123) egyenletek a fizikai tartalom szemléltetésére:

– a $+\infty$ irányból a csomóponthoz érkező hajlítóhullám v_{B1} :

$$v_{B1}(y1, x) = v_0(x) \cdot e^{j \cdot k_{B1} \cdot \cos(\varphi_{B1}) \cdot y1} \quad (4.119)$$

– az 1. közegben a visszaverődött hajlítóhullám, $B1r$ a (4.120) képletnek megfelelő alakban írható fel; a képlet második tagja a hajlítóhullám visszaverődésére jellemző, exponenciálisan csillapodó (tehát nem síkhullámú) hullámterjedést fejezi ki; ennek a hullámformának a teljesítményviszonyokban nincs szerepe a gyors csillapodás miatt:

$$v_{B1r}(y1, x) = v_0(x) \cdot \left(r_{B1} \cdot e^{-j \cdot k_{B1} \cdot \cos(\varphi_{B1}) \cdot y1} + p_{B1} \cdot e^{-k_{B1} \cdot \sqrt{1 + \sin^2(\varphi_{B1})} \cdot y1} \right) \quad (4.120)$$

– az i -edik elembe átjutott Bi hajlítóhullám rezgésebbességének helyfüggésében is megjelenik az exponenciálisan gyorsan csillapodó tag:

$$v_{Bi}(yi, x) = v_0(x) \cdot \left(t_{Bi} \cdot e^{-j \cdot k_{Bi} \cdot \cos(\varphi_{Bi}) \cdot yi} + d_{Bi} \cdot e^{-k_{Bi} \cdot \sqrt{1 + \sin^2(\varphi_{Bi})} \cdot yi} \right); \quad (4.121)$$

– bármelyik közegbe a visszaverődött vagy átvitt L hullám rezgésebbességének y és x irányú összetevőjét, v_{Lyi} és v_{Lxi} a (4.122a) és (4.122b) egyenletek adják meg, hiszen az L hullám rezgésebbessége terjedés irányába mutat; a felírásban az átviteli tényező szerepel, és $i = 2 \dots 4$, de t -t r -gyel helyettesítve az 1. közegben terjedő visszavert longitudinális hullám felírását meg lehet kapni;

$$v_{Lyi} = v_0(x) \cdot \cos(\varphi_{Li}) \cdot t_{Li} \cdot e^{-j \cdot k_{Li} \cdot \cos(\varphi_{Li}) \cdot yi}; \quad (4.122a)$$

$$v_{Lxi} = v_0(x) \cdot \sin(\varphi_{Li}) \cdot t_{Li} \cdot e^{-j \cdot k_{Li} \cdot \cos(\varphi_{Li}) \cdot yi}; \quad (4.122b)$$

– bármelyik közegbe a visszaverődött, vagy átvitt S hullám rezgésebbességének y és x irányú összetevőjét, v_{Syi} és v_{Sxi} a (4.123a) és (4.123b) egyenletek adják meg; az S hullám rezgésebbessége a terjedés irányára merőleges; a felírásban az átviteli tényező szerepel, és $i = 2 \dots 4$, de t -t r -gyel helyettesítve az 1. közegben terjedő visszavert longitudinális hullám felírását meg lehet kapni:

$$v_{Syi} = v_0(x) \cdot \sin(\varphi_{Si}) \cdot t_{Si} \cdot e^{-j \cdot k_{Si} \cdot \cos(\varphi_{Si}) \cdot yi}; \quad (4.123a)$$

$$v_{Sxi} = v_0(x) \cdot \cos(\varphi_{Si}) \cdot t_{Si} \cdot e^{-j \cdot k_{Si} \cdot \cos(\varphi_{Si}) \cdot yi}. \quad (4.123b)$$

Az egyes hullámfajták által szállított teljesítményről a 3. fejezetben már szó volt. A csomópont rezgégátlását az átvitt hajlítóhullámra, B_i -re elegendő meghatározni, mert a helyszíni hangterjedés során a 9. fejezetben ismertetendő közelítések ebből indulnak ki. Az i -edik elem és az 1. elem közötti $\tau_{B1i}(\varphi_{B1})$ teljesítmény átviteli tényezőt a korábbiak alapján a (4.124a) képlet adja meg. A teljesítményátviteli tényező a beesési szögtől függ, ezért a gyakorlati felhasználáshoz a τ_{B1i} átlagos teljesítményátviteli tényezőre van szükség, ezt fejezi ki formálisan a (4.124b) összefüggés:

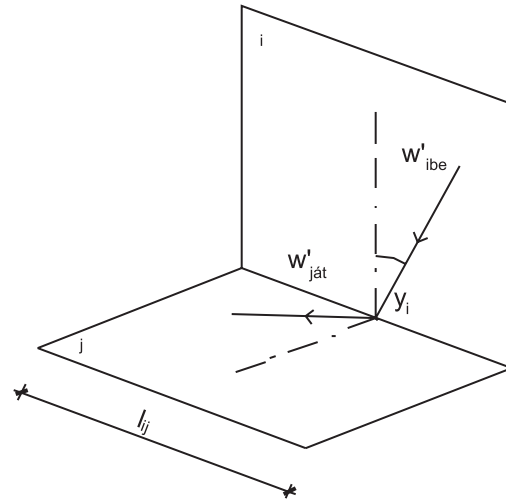
$$\tau_{B1i}(\varphi_{B1}) = \frac{W_{Bi}}{W_{B1}} = \frac{m_i'' \cdot c_{Bi}}{m_1'' \cdot c_{B1}} \cdot \frac{\cos(\varphi_{Bi})}{\cos(\varphi_{B1})} \cdot |t_{Bi}|^2; \quad (4.124a)$$

$$\tau_{B1i} = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \tau_{B1i}(\varphi_{B1}) \cdot \cos(\varphi_{B1}) d\varphi_{B1}. \quad (4.124b)$$

A szerkezeti csomópont hajlítóhullám szembeni rezgégátlását az előzőek alapján a (4.125) képlet mutatja. A rezgégátlásra számos szakirodalmi forrás az R jelölést alkalmazza, azonban ez értelmezési zavarokat okozhat, ezért szerepel a γ jelölés itt és a 9. fejezetben is:

$$\gamma_{li} = 10 \cdot \lg \left(\frac{W_{B1}}{W_{Bi}} \right) = 10 \cdot \lg \left(\frac{1}{\tau_{B1i}} \right). \quad (4.125)$$

A valóságban az elemek véges méretűek, ezért az átvitt akusztikai teljesítmény véges térbeli kiterjedésű rezgési teret hoz létre. Az egyes elemekben, tehát a lemezekben, a hajlítóhullámú terjedéshez kialakuló átlagos rezgésebbességet a teljesítményegyensúly alapján lehet felírni. Az elrendezés a 4.40. ábrán látható.



4.40. ábra. Teljesítményátviteli tényező és rezgégátlás értelmezése

Az 1. indexű lemezben hajlítóhullám terjed, az általa szállított teljesítmény egységnyi hosszú csomóponti szakaszra W'_1 , értékét (4.126) képlet fejezi ki (3.181) alapján. A beesési szög φ_1 . Az összes teljesítmény W_1 a (4.127) összefüggés szerint, l_{ij} a csatlóási élhossz, azaz az i és j lemez közös hossza:

$$W'_{1be} = 2 \cdot m'' \cdot c_{B1} \cdot v_1^2; \quad (4.126)$$

$$W_{1be} = l_{1i} \cdot W'_{1be}. \quad (4.127)$$

A beesési szöghöz tartozó, az i elembe hajlítóhullám formájában átvitt W'_{iat} teljesítmény:

$$W_{jât} = \tau_{1i}(\varphi_1) \cdot \cos(\varphi_1) \cdot W'_1 \cdot l_{1i}. \quad (4.128)$$

Az összes átvitt teljesítményt, $W'_{össz}$ a beesési szög szerint integrálva lehet meghatározni. Felhasználva az átlagos teljesítményátviteli tényezőt a (4.124/b) képletből:

$$W'_{össz} = 2 \cdot l_{1i} \cdot v_1^2 \cdot m_1'' \cdot c_{B1} \cdot \tau_{B1i}. \quad (4.129)$$

A bevitt teljesítmény a látszólagos veszteségi tényezővel kifejezhető módon távozik az i -edik elemből. A látszólagos

veszteségi tényező a belső veszteség, a sugárzási veszteség és a további rendszerrelmékek irányába mutató csatolási veszteség együttes hatását tükrözi. A veszteség miatt alakul ki állandósult, tehát egyensúlyi állapot. A veszteségi tényező helyett az utózengési időt helyettesítve és alkalmazva a (3.219) összefüggést, [4.15] kapjuk:

$$\frac{1}{\tau_{li}} = \frac{m_1'' \cdot c_{B1}}{m_i'' \cdot c_{Bi}} \cdot \frac{v_1^2}{v_i^2} \cdot \frac{l_{li} \cdot T_i \cdot 2 \cdot c_{Bi}}{2,2 \cdot S_i \cdot \pi^2}; \quad (4.130a)$$

$$\gamma_{li} = D_{vli} + 10 \cdot \lg \left(\frac{m_1'' \cdot c_{B1}}{m_i'' \cdot c_{Bi}} \right) + 10 \cdot \lg \left(\frac{l_{li} \cdot T_i \cdot 2 \cdot c_{Bi}}{2,2 \cdot S_i \cdot \pi^2} \right). \quad (4.130b)$$

Az 1 és i indexű szerkezet közötti szerkezeti csomópont τ_{li} teljesítményátviteli tényezője vagy γ_{li} rezgésgátlása, a szerkezeti csomóponton keresztül csatolásban levő két lemez jellegű szerkezet v_1 és v_i átlagos rezgésebbessége (effektív érték, felületi átlag) vagy rezgésebbességszint-különbsége, D_{vli} , az l_{li} csatolási élhossz, az i indexű elem S_i felülete, a lemezek m_1'' , m_i'' fajlagos tömege, a lemezekben terjedő hajlítóhullám terjedési sebessége, c_{B1} , c_{Bi} , valamint az i indexű lemez T_i szerkezeti utózengési ideje között a (4.130a), (4.130b) képletek szerinti kapcsolat van. Eszerint a rezgésgátlás és a rezgésebbességszint különbség kölcsönösen függ egymástól, egyik a másiból meghatározható. A kapcsolat jellege azonban olyan, hogy D_{vli} inkább csak homogén elemek között számítható egyenes módon a rezgésgátlásból, a valóságos szerkezeteknél célszerűbb D_{vli} -re tapasztalati adatgyűjtést végezni. Ha a rezgésgátlást mérés útján kell meghatározni, akkor a közvetlenül mérhető akusztikai mennyiségek D_{vli} és T_i , és ha a lemezek homogén jellegűek, akkor a hullámterjedési sebességek számíthatók (vagy szintén mérhetők). A rezgésgátlás ezen mérési adatokból számítható.

A feladat további megoldásához a peremkapcsolatok által meghatározott peremfeltételeket kell megadni.

4.11.2. Peremfeltételek merev szerkezeti kapcsolatok esetén [IV.8], [IV.2]

A peremfeltételek részben folytonossági, részben egyensúlyi feltételek. A közös y tengely mentén fejezik ki a feltételeket (l. a 4.41 ábrát). Az egyszerűség érdekében a hajlítóhullám terjedésénél a vékony lemez közelítést veszik csak figyelembe.

A folytonossági feltételek az 1. elem és a rá merőleges 2. elem között a (4.131a)–(4.131d) egyenletekkel írhatók fel. A rezgésebbességek indexe arra a hullámformára utal, amelyhez tartozik. A (4.131d) feltétel a hajlítóhullám-terjedésből származó x irányú szögelfordulások egyenlőségét fejezi ki. Ismét gondolni kell arra, hogy a hajlítóhullám rezgésebbessége merőleges a lemez síkjára, a longitudinális hullám rezgésebbessége a terjedés irányába mutat, a nyíróhullám rezgésebbessége

pedig a terjedés irányára merőleges. A rövidebb képletek elérése céljából az összefüggés külön nem hangsúlyozza azt, hogy a feltételek az x tengely mentén fejezik ki az egyensúlyt:

$$v_{B1} = v_{L2} \cdot \cos(\varphi_{L2}) + v_{S2} \cdot \sin(\varphi_{S2}); \quad (4.131a)$$

$$v_{L1} \cdot \cos(\varphi_{L1}) + v_{S1} \cdot \sin(\varphi_{S1}) = v_{B2}; \quad (4.131b)$$

$$v_{L1} \cdot \sin(\varphi_{L1}) + v_{S1} \cdot \cos(\varphi_{S1}) = v_{L2} \cdot \sin(\varphi_{L2}) + v_{S2} \cdot \cos(\varphi_{S2}); \quad (4.131c)$$

$$\frac{\partial v_{B1}}{\partial y_1} = \frac{\partial v_{B2}}{\partial y_2}. \quad (4.131d)$$

Hasonló elven határozható meg a többi elempár rezgésebbességei és szögsebességei közötti kapcsolat is.

Az egyensúlyi feltétel azt fejezi ki, hogy az y tengely mentén az azonos irányba mutató erők és nyomaték eredője 0. Az erők indexe arra a hullámfajtra utal, amelyhez tartozik. Az egyensúlyt három koordinátairány erőinek, valamint az y irányú nyomatékoknak az egyensúlyára kell kifejezni. Mind az erők, mind a nyomatékok fajlagos, tehát egységnyi hosszra vonatkozó mennyiségek. Ezt a ' jelölés fejezi ki. A rövidebb képletek elérése céljából az összefüggés külön nem hangsúlyozza azt, hogy a feltételek az x tengely mentén fejezik ki az egyensúlyt. Az előjelek a mérőirányok és koordinátairányok felvételéből adódnak.

F_1 irány a 4.41. ábrán:

$$F'_{B1} + F'_{L2} \cdot \cos(\varphi_{L2}) + F'_{S2} \cdot \sin(\varphi_{S2}) + F'_{L3} \cdot \cos(\varphi_{L3}) + F'_{S3} \cdot \sin(\varphi_{S3}) - F'_{B4} = 0. \quad (4.132a)$$

F_2 irány a 4.41. ábrán:

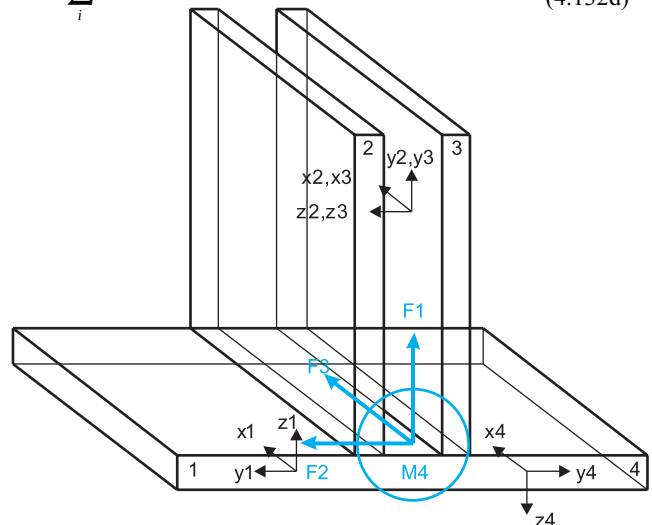
$$F'_{L1} \cdot \cos(\varphi_{L1}) + F'_{S1} \cdot \sin(\varphi_{S1}) + F'_{B2} + F'_{B3} - F'_{L4} \cdot \cos(\varphi_{L4}) - F'_{S4} \cdot \sin(\varphi_{S4}) = 0. \quad (4.132b)$$

F_3 irány a 4.41. ábrán:

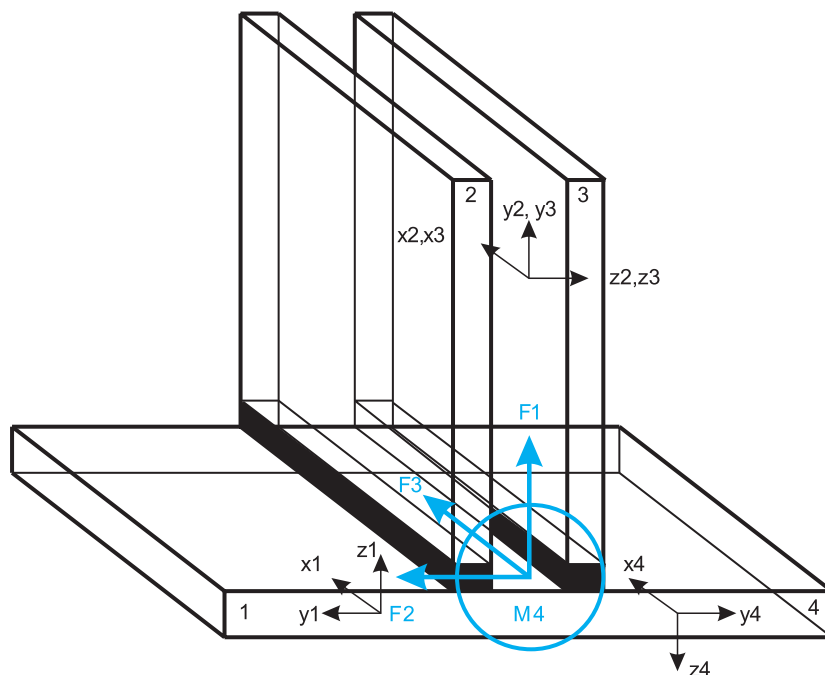
$$\sum_i [F'_{Li} \cdot \sin(\varphi_{Li}) + F'_{Si} \cdot \cos(\varphi_{Si})] = 0. \quad (4.132c)$$

M_4 jelű irány a 4.41. ábrán:

$$\sum_i M'_{xi} = 0. \quad (4.132d)$$



4.41. ábra. Egyensúlyok kialakulása a szerkezeti csomópontban merev kapcsolatokhoz



4.42. ábra. Elrendezés Π alakú szerkezeti csomópont rezgésgátlásának meghatározásához, ha a csomópont elemei között rugalmas kapcsolat van

A rezgésebbességek és a fajlagos erők, ill. a szögsebesség és a nyomaték közötti kapcsolatok a (3.175)–(3.178) összefüggések alapján határozhatók meg.

4.11.3. Peremfeltételek rugalmas elválasztórétegek alkalmazásakor [4.16], [4.17]

Rugalmas elválasztórétegek a példaként kiválasztott Π alakú csomópontba elvileg mind az 1. és 4. elem közé, mind a Π bármelyik szára és a hosszági elemek közé elhelyezhető. Gyakorlati okok miatt az utóbbi megoldásnak sokkal nagyobb a realitása, ezért az elemzés erre irányul. A keletkezett elrendezés a 4.42. ábrán látható.

A két peremfeltétel-csoport – folytonossági és egyensúlyi feltételcsoport – közül az egyensúlyi egyenletek nem változnak. A rugalmas réteg sajátosságai miatt a vizsgált elrendezésben a csomópont 2. elemére minden megfelelő irányban azonos nagyságú erő hat, mint a rugalmas rétegre. Azonban a folytonossági egyenletek módosulnak, kissé pontatlanul, de szemléletesen fogalmazva a rugalmas réteg részben felveszi a két elem közötti deformációt.

Az 1. és 2. elem közötti rugalmas réteg nyomó deformációjából eredő rezgésebbesség v_{nyo1} , iránya x_2 . A nyíró irányú deformációból eredő rezgésebbesség v_{nyi1} , iránya x_1 , ill. y . A szögdeformáció x irányú, az ehhez tartozó szögsebesség w_1 . A rugalmas réteg deformációinak felírásakor elegendő csak a helyi hatásokat figyelembe venni, e közelítésben nem szükséges a rugalmas lemezben kialakuló hullámterjedéssel számolni – azonos kiindulási feltételt alkalmazott az úszópadló modellezése is (l. a 4.9. alfejezetet).

A (4.131a) peremfeltétel így módosul:

$$v_{B1} = v_{L2} \cdot \cos(\varphi_{L2}) + v_{S2} \cdot \sin(\varphi_{S2}) + v_{nyo1}. \quad (4.133a)$$

A (4.131b) peremfeltétel módosított formája:

$$v_{L1} \cdot \cos(\varphi_{L1}) + v_{S1} \cdot \sin(\varphi_{S1}) = v_{B2} + v_{nyi1x}. \quad (4.133b)$$

A (4.131c) feltétel rugalmas réteget figyelembe vevő alakja:

$$v_{L1} \cdot \sin(\varphi_{L1}) + v_{S1} \cdot \cos(\varphi_{S1}) = v_{L2} \cdot \sin(\varphi_{L2}) + v_{S2} \cdot \cos(\varphi_{S2}) + v_{nyi1y}. \quad (4.133c)$$

A szögsebességek egyenlőségét kifejező (4.131d) feltétel módosított alakja:

$$\frac{\partial v_{B1}}{\partial y_1} = \frac{\partial v_{B2}}{\partial y_2} + w_1. \quad (4.133d)$$

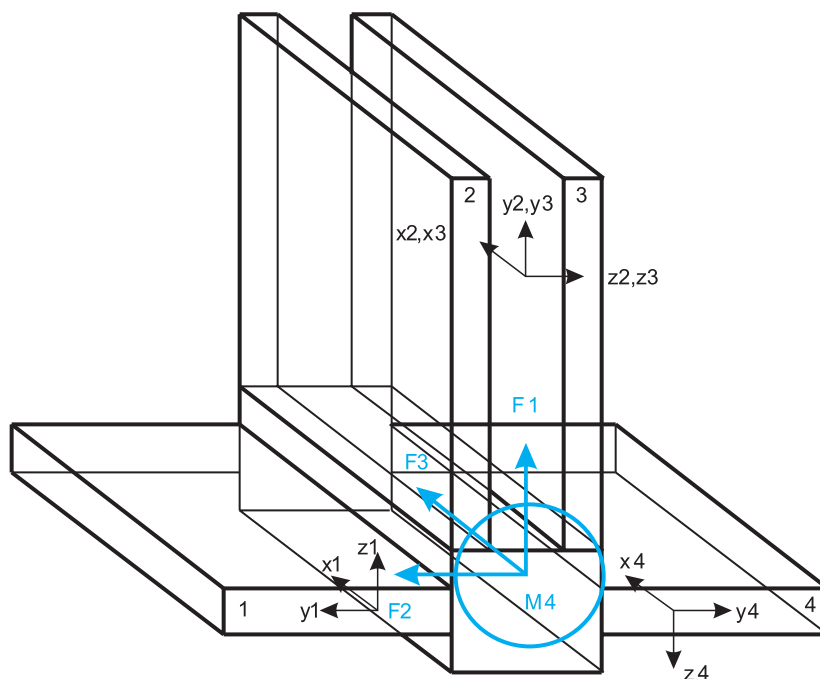
A rugalmas réteg viselkedését leíró egyenletek: a (3.90), (3.92) és (3.93). Ezek teremtik meg a kapcsolatot az elválasztórétegre ható erők és nyomaték, valamint a deformációk között.

4.11.4. Pillérkapcsolat peremfeltételei [4.16], [4.17]

A példaként kiválasztott Π alakú csomópont a valóságban gyakran pillérrel együtt valósul meg. T vagy X alakú csomópont is gyakran kapcsolódik a gyakorlatban pillérhez. A Π alakú csomóponttal létrejövő elrendezés a 4.43. ábrán látható.

A pillérben a csatolás során többfajta hullám keletkezik:

- az 1. elem y_1 irányú, a 2, 3 elem $-z_2, -z_3$ irányú, a 4. elem $-y_4$ irányú erőnek hatására hajlítóhullám jön létre, a terjedési iránya $+x$, a rezgés kitérés iránya $+y_1$;
- az 1. elem z_1 irányú, a 2, 3 elem y_2, y_3 irányú, a 4. elem $-z_4$ irányú erőnek hatására hajlítóhullám jön létre, a terjedési iránya $+x$, a rezgés kitérés iránya $+z_1$;
- az elemek x irányú erőhatásai következtében a pillérben longitudinális hullám keletkezik;



4.43. ábra. Elrendezés II alakú szerkezeti csomópont rezgésgátlásának meghatározásához, ha a csomópontban pillér található

- az elemek peremén kialakuló szögelfordulás a pillérben torziós hullámot kelt.

A pillér és az egyes lemezek között merev kapcsolat van, ezért a (4.131a)–(4.131d) peremfeltételek érvényesek a jelen esetben is.

Az egyensúlyi egyenletek a (4.134) egyenletsor szerint alakulnak. F'_{PB1} jelöli a pillérben ébredő, F_1 irányú, hajlítóhullámot keltő erőt, F'_{PB2} jelöli a pillérben ébredő F_2 irányú, hajlítóhullámot keltő erőt, F'_{PL3} jelöli a pillérben ébredő F_3 irányú, longitudinális hullámot keltő erőt, M'_{P4} pedig az y irányú, torziós hullámot keltő nyomatékot.

F_1 irány a 4.43. ábrán:

$$F'_{B1} + F'_{L2} \cdot \cos(\varphi_{L2}) + F'_{S2} \cdot \sin(\varphi_{S2}) + F'_{L3} \cdot \cos(\varphi_{L3}) + F'_{S3} \cdot \sin(\varphi_{S3}) - F'_{B4} + F'_{PB1} = 0. \quad (4.134a)$$

F_2 irány a 4.43. ábrán:

$$F'_{L1} \cdot \cos(\varphi_{L1}) + F'_{S1} \cdot \sin(\varphi_{S1}) + F'_{B2} + F'_{B3} - F'_{L4} \cdot \cos(\varphi_{L4}) - F'_{S4} \cdot \sin(\varphi_{S4}) + F'_{PB2} = 0. \quad (4.134b)$$

F_3 irány a 4.43. ábrán:

$$\sum_i [F'_{Li} \cdot \sin(\varphi_{Li}) + F'_{Si} \cdot \cos(\varphi_{Si})] + F'_{PL3} = 0. \quad (4.134c)$$

M_4 irány:

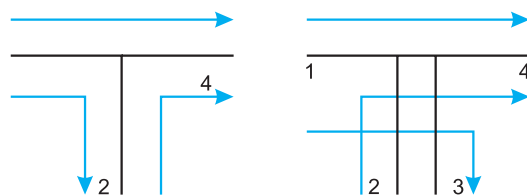
$$\sum_i M'_{xi} + M'_{P4} = 0. \quad (4.134d)$$

4.11.5. Példák II alakú csomópont tulajdonságaira

A T, X és L alakú csomópontok tulajdonságai a szakirodalomból ismertek, l. pl. összefoglaló jelleggel a [IV.2] és [IV.8] könyveket. A II alakú csomópont alapvetően a magyarországi épü-

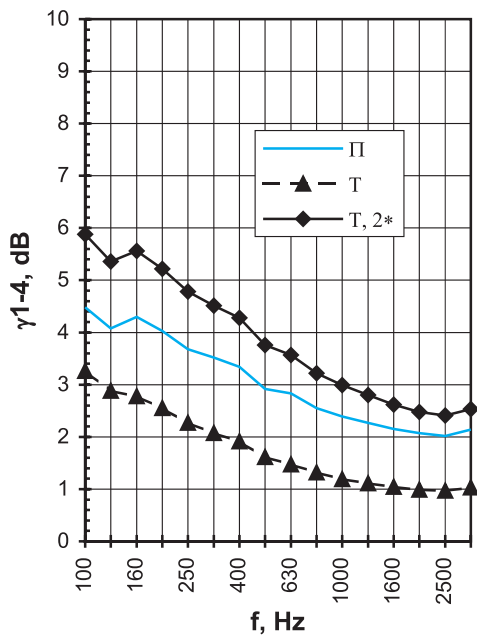
letszerkezeti kultúrához kapcsolódik, a környező országok gyakran alkalmazott épületszerkezetei között nem szerepelt. Újabban azonban német területen a gipszfalakkal készült rugalmas peremkapcsolatokkal kivitelezett kettős falak alkalmazására elég gyakran sor kerül, ezért a soron következő példák részben e szerkezeti csomópont tulajdonságaira koncentrálnak. A szerkezeti csomópontok rezgésgátlását számító program túlnyomóan a [4.16] OTKA kutatás keretében készült rendszer formájában. A példák azokat a tulajdonságokat mutatják be, amelyek alapján a szerkezeti csomópontokon keresztülvezető kerülőutas hangterjedések a helyszíni hangszigetelés meghatározása érdekében számíthatók, l. a 9.3. alfejezetet.

A szimmetrikus T és II alakú csomópont vázlata a 4.44. ábrán látható. Az egyes elemek indexe ezen az ábrán szerepel. A rezgésgátlások bemutatására szolgáló példákban az 1. és 4. elem 16 cm vastag vasbeton lemez (a testsűrűség 2200 kg/m^3 , a rugalmassági modulus $22\,000 \text{ MPa}$, a 2. és 3. elem gipsz alapanyagú lemez, testsűrűsége 1000 kg/m^3 , rugalmassági modulusa 7000 MPa).

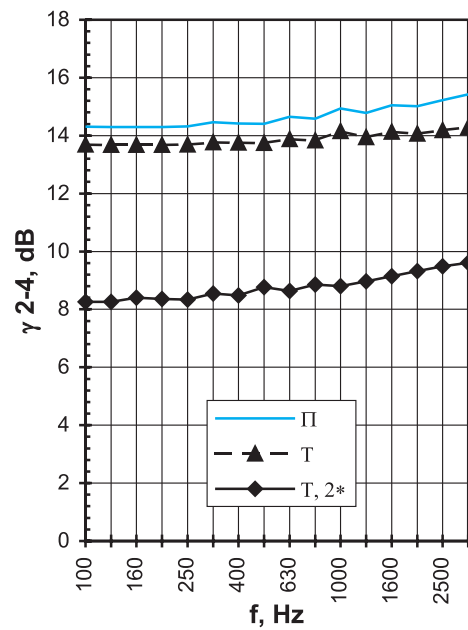


4.44. ábra. Hangterjedés T és II alakú csomópontokban

Az 1–4 terjedési irány számított rezgésgátlása a 4.45a ábrán látható. Megfigyelhető, hogy a példában a II alakú csomópont rezgésgátlása és rezgéssebességszint különbsége közelíthető a T alakú csomópont rezgésgátlásával, ill. rezgés-sebességszint-



a) T: 1–4,
illetve Π : 1–4 terjedési irány

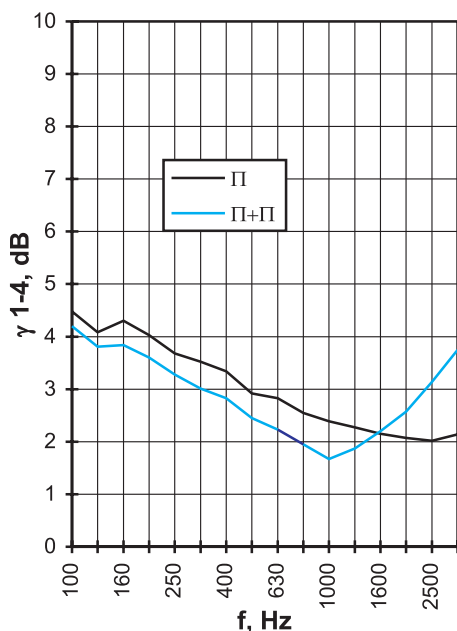


b) T: 2–4, illetve Π : 2–4 terjedési irány

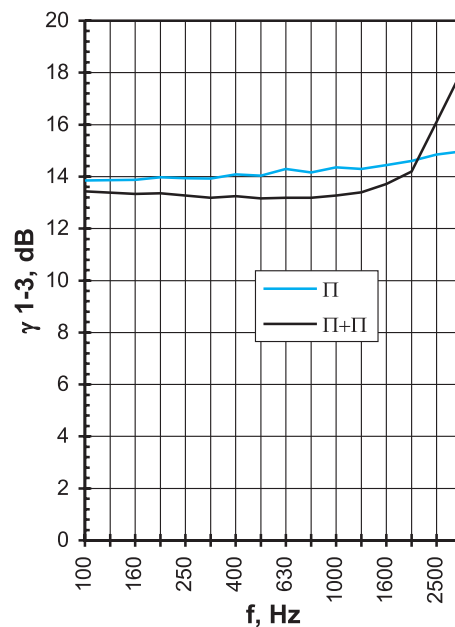
A Π alakú csomópont 1–3 terjedési iránya és T alakú csomópont 1–2 terjedési iránya között minőségileg azonos a kapcsolat

4.45. ábrásor. Hangterjedési irányok rezgésgátlásának összehasonlítása T és Π alakú csomópontokban

Az 1. és 4. elem 16 cm betonlemez ($\rho = 2200 \text{ kg/m}^3$, $E = 22\,000 \text{ MPa}$, a 2 és 3 elem gipszlemez, $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, $E = 7000 \text{ MPa}$). A $T, 2^*$ jelöli a T alakú csomópontot, amely szárának fajlagos tömege megegyezik a Π alakú csomópont két szárának együttes fajlagos tömegével



a) 1–4 hangátviteli irány

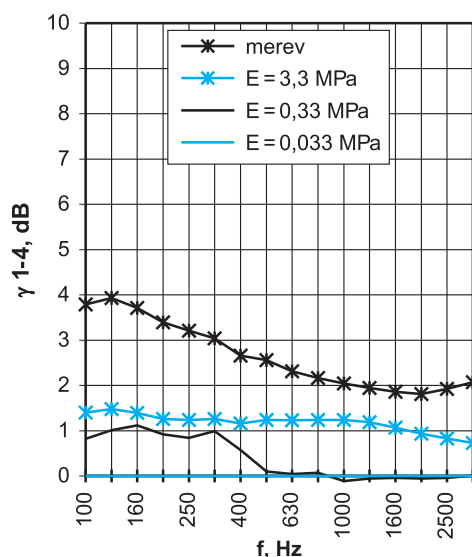


b) 1–3 hangátviteli irány

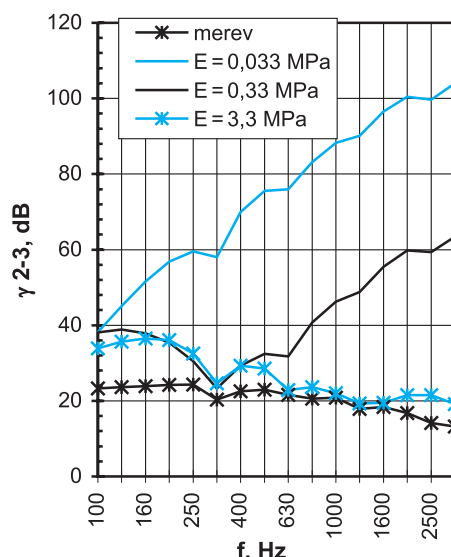
A 2–4 hangterjedési irányra minőségileg azonos eredmény jellemző

4.46. ábra. Hangterjedési irányok rezgésgátlása pilléres kapcsolat esetén

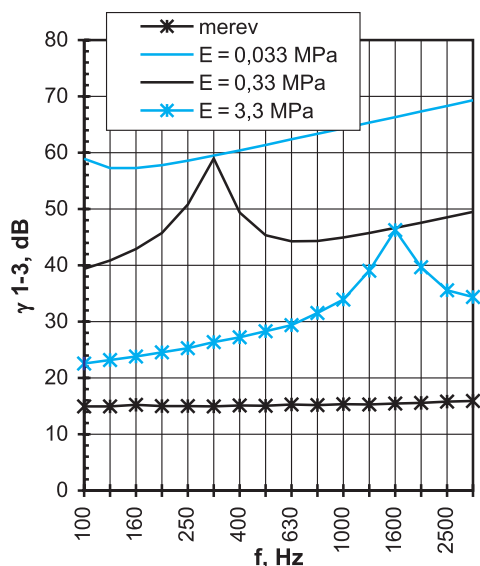
Az 1. és 4. elem 16 cm vasbeton lemez ($\rho = 2200 \text{ kg/m}^3$, $E = 22\,000 \text{ MPa}$, a 2 és 3 elem gipszlemez $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, $E = 7000 \text{ MPa}$, a pillér $20 \times 20 \text{ cm}$ keresztmetszetű vasbeton szerkezet); Π jelöli a Π alakú csomópontot, $\Pi + \Pi$ pedig a pilléres csomópontot



a) 1–4 terjedési irány



b) 2–3 terjedési irány



c) 1–3 terjedési irány

Az 1–3 és 2–4 terjedési irány rezgésgátlása a reciprocitás és szimmetria miatt közelítőleg megegyezik.

4.47. ábrásor. A Π alakú csomópont 2. és 3. eleme leválasztásának hatása a rezgésgátlásra.

A leválasztás rugalmas rétegek beiktatásával történik.

Az 1. és 4. elem 16 cm vasbeton lemez ($\rho = 2200 \text{ kg/m}^3$, $E = 22\,000 \text{ MPa}$), a 2 és 3 elem gipszlemez $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, $E = 7000 \text{ MPa}$; a rugalmas réteget a nyomó igénybevétellel szembeni dinamikai rugalmassági modulusa jellemzi

különbségével úgy, hogy a T szárának fajlagos tömege a Π kettős szárának (2. és 3. indexű elem) összes fajlagos tömegével egyezik meg. Ez általános szabályként is elfogadható.

A Π alakú csomópont 1–3 átviteli iránya a T alakú csomópont 1–2 hangátviteli irányával, a Π alakú csomópont 2–4 átviteli iránya a T alakú csomópont 2–4 hangátviteli irányával közelíthető. A fenti adatokkal végzett számítások eredményeit a 4.45b ábra mutatja. Természetesen a T alakú csomópont 2–1 és 2–4 elemei közötti rezgésgátlás a szimmetria miatt azonos lesz.

A 4.46. ábrásor a pilléres szerkezeti kapcsolat két példáját mutatja be. Látható, hogy kis hibával a pillér hatása elhanyagolható még ilyen vastag pillér esetében is, ha a pillér nem áll ki a falsíkból, akkor hatása még kevésbé mutatható ki.

A 4.47. ábrásor azt mutatja, hogy a Π alakú csomópont 2. és 3. ágának rugalmas közbülső réteggel megoldott leválasztása milyen hatással van az elemek közötti rezgésgátlásra. Megfigyelhető, hogy a rugalmas elválasztóréteg anyaga keménységének változtatása kettős hatással rendelkezik:

- nő a 2–3 terjedési út rezgésgátlása, ez hasznos;
- nő az 1–3 és 2–4 terjedési irányok rezgésgátlása, ez hasznos;
- csökken az 1–4 átviteli irány rezgésgátlása, ez kedvezőtlen.

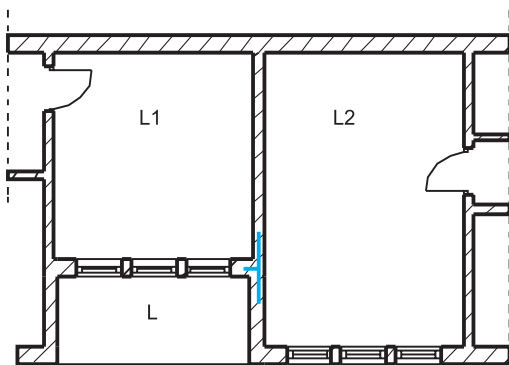
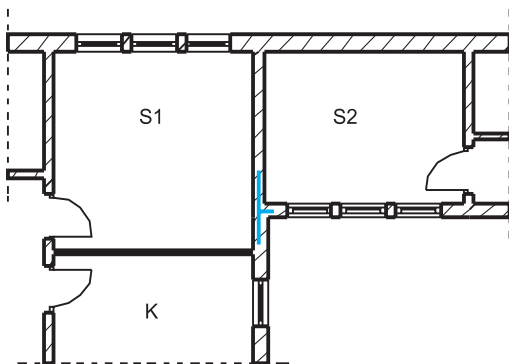
A kettős falak laboratóriumban mért léghanggátlása a 2–3 terjedési út hatását tartalmazza. Az eredményekből, amelyek részben hasznos, részben kedvezőtlen tulajdonságokat fejeznek ki, az az általános következtetés is levonható, hogy a helyszíni hangszigetelés megtervezése és megvalósítása sohasem korlátozódik a válaszfal szerkezetének kiválasztására.

4.11.6. Aszimmetrikus, T alakú csomópont megoldása [4.18]

A T alakú csomópont egy gyakorlatban elterjedt formája a rezgésgátlásának meghatározása a valóság, az építési gyakorlat elemzése során merült fel feladatként, erre e rész közöl megoldást és példákat. Az eredmények a 9.3. alfejezetben hasznosulnak. A 4.48. ábra két jellegzetes példát mutat arra, hogy az épületek mely részében alakulnak ki aszimmetrikus T csomópontok. A megnevezés a szakirodalomban régóta bevezetett szimmetrikus T csomóponttól eltérő felépítésre utal: a hagyományos T csomópont tetejének két eleme megegyezik egymással, az aszimmetrikus csomópontnak viszont a szára és a tetejének egyik oldala egyezik meg.

A rezgésebbesszint-különbség meghatározására a hagyományos út (helyszíni adatgyűjtés) alkalmazása nem járható, azonban a (4.130) összefüggések fizikai tartalma korrekt áthidaló megoldás lehetőségét adja.

A szerkezeti csomópont rezgésgátlása függ a csomópont

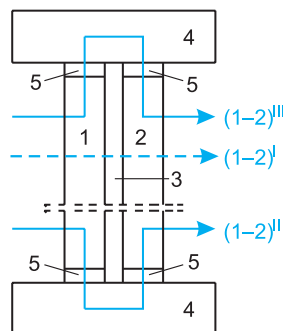


4.48. ábra. Példák aszimmetrikus T alakú csomópont előfordulására épületekben

S1, S2, L1, L2: szobák; K: konyha; L: erkély;
Az aszimmetrikus T csomópont a homlokzatnál keletkezik síkváltás esetén

4.11.7. Merev peremkapcsolatokkal kivitelezett kettős falak léghanggátlása kerülőutak nélküli laboratóriumban

A hagyományos kettős falak két, általában 6–12 cm vastag falazólapból készült falrétgeből és a közöttük levő légrésből állnak. A légrésben általában szál- szigetelőanyag-kitöltés található. A falrétégek a szélek mentén a falat határoló épületszerkezetek- hez habarcsréteggel csatlakoznak. Két, egymással szemközti peremcsatlakozás vázlata látható a 4.49. ábrán.



4.49. ábra. Kéthéjű falazat metszete és a kialakuló hangterjedési utak

1 és 2 a kéthéjű falazat rétegei; 3 légrés, benne lazán elhelyezett szál- szigetelőanyag-kitöltés; 4 laborszerkezet vagy helyszíni körülmények között átmenő szerkezetek (fal, földem); 5 habarcságy

formájától. Ugyanez a függés a rezgésebbességszint-különbségnél is megjelenik. γ_{ij} és D_{vij} különbsége azonban csak anyag-jellemzőktől és méretektől függ, tehát a csomópont formájától nem. Ezért az aszimmetrikus T alakú csomópont D_{vij} adatait a következő lépésekben lehet meghatározni:

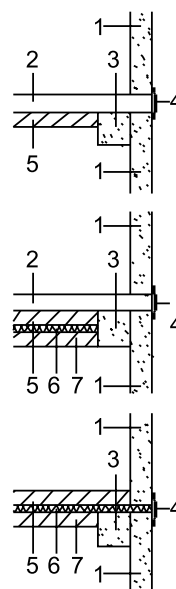
I. próbaszámítások segítségével meg kell határozni $\gamma_{ij} - D_{vij}$ értékét az ismert tulajdonságú szimmetrikus T alakú csomópontokra; γ_{ij} értékét számítani kell; D_{vij} értékét valamelyik elfogadott, a fajlagos tömegek aránya alapján megadott közelítés alapján kell meghatározni; a próbaszámításokban a reális anyag- és szerkezeti kombinációkra ki kell térni (beton–beton; gipsz alapanyagú elem–beton alapanyagú elem, kerámia- és beton alapanyagú elemek stb.);

II. az eredményekre regressziós közelítést kell illeszteni, amely $\gamma_{ij} - D_{vij}$ értékét az elemek fajlagos tömegei arányában fejezi ki;

III. próbaszámítások segítségével meg kell határozni az aszimmetrikus T csomópont rezgésgátlását különböző valóságos anyag- és elemkombinációkra, a számított eredményeket a csomópont elemei fajlagos tömegeinek arányával regressziós módszerrel kell közelíteni;

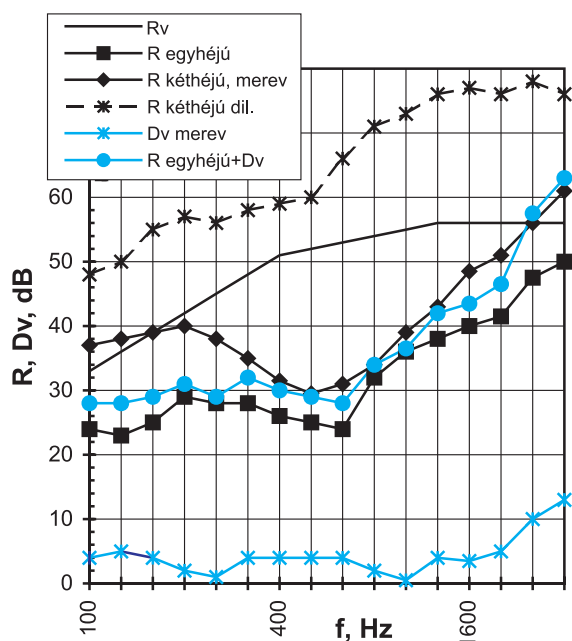
IV. az I–III. lépések eredményét egyesítve az aszimmetrikus T alakú szerkezeti csomópont D_{vij} értékei a csomópont elemei fajlagos tömegének arányában kifejezhetők.

Az eredmények, azaz a különböző hangátviteli irányokra jellemző rezgésebbességszint-különbségek a 9.3. alfejezetben találhatók.



4.50. ábra. Merev peremkapcsolatokkal kivitelezett kéthéjű falazat léghanggátlása, kísérleti beépítés csomópontja

1 laborszerkezet; 2 a két mérőhelyiséget elválasztó dilatáció; 3 25×25 cm méretű téglapillér; 4 rés takarás; 5, 7 gipszpernye alapanyagú 8 cm vastag válaszfal; 6 légrés, benne szál- szigetelőanyag, a légrés vastagsága 9 cm



4.51. ábra. Merev peremkapcsolatokkal kivitelezett kéthéjú falazat léghanggátlása, kísérleti eredmények

R_v : vonatkoztatási görbe; R egyhéjú: 8 cm vastag gipszpernye alapanyagú válaszfallapból készült egyhéjú falazat – jele 5 – léghanggátlása ($m'' = 80 \text{ kg/m}^2$), 4.50. felső ábra; R kéthéjú merev: 8–9–8 cm rétegrendű kéthéjú falazat – jele 5, 6, 7 – léghanggátlása, a falrétegek fajlagos tömege $m_1'' = m_2'' = 80 \text{ kg/m}^2$, a légrésben szálas szigetelőanyag kitöltés található, 4.50. középső ábra; a két falréteg között a peremek mentén az átmenő laborszerkezetek merev kapcsolatot alkotnak; R kéthéjú, dil.: a laboratóriumi építményen végigfutó dilatáció – jele 2 – két oldalára épített kettős fal – jele 5, 6, 7 – léghanggátlása, a falazat rétegrendje azonos az előző példa rétegrendjével, 4.50. alsó ábra; D_v merev: a kéthéjú szerkezet két falrétege közötti átlagos rezgésebbességszint-különbség; R egyhéjú + D_v : az összefüggés szerint számított léghanggátlási szám

A szerkezet kerülőutak nélküli laboratóriumi beépítésben kialakuló léghanggátlását 5 hangterjedési út eredője határozza meg, ezek szintén megtalálhatók a 4.49. ábrán. A szerkezeti csomópontok elemeinek indexes jelölését felhasználva az $(1-2)^I$ jelű hangterjedési út a légrésen vezet keresztül, ez az ideális kéthéjú szerkezet jellemzője. A $(1-2)^{II} \dots (1-2)^V$ hangátviteli utak a peremcsatlakozáson keresztül záródnak, mind a négy szél mentén egy-egy. Helyszíni körülmények között e hangátviteli utak szintén megfigyelhetők, de a Π , kettős Π alakú csomópontokra jellemző további hangutak is megjelennek.

Mind kísérleti, mind elméleti úton régóta igazolt, hogy a felsorolt hangátviteli utak közül az $(1-2)^I$ -en terjedő akusztikai teljesítmény elhanyagolhatóan kicsi a többihez képest. Ellenkező irányból kifejezve az $(1-2)^I$ hangátviteli út léghanggátlása sokkal nagyobb, mint a többié. Ezt az állítást a 4.50. ábrán látható kísérletsorozat 4.51. ábrán bemutatott eredményei szemléltetik.

Az egyhéjú fal léghanggátlásához ($R_{\text{egyhéjú}}$) képest a kéthéjú, merev peremkapcsolatokkal kivitelezett szerkezet ($R_{\text{kéthéjú, merev}}$) nem eredményezett túlzottan nagy mértékű javulást. Ez a javulás – különösen a határfrekvencia, 400 Hz felett – jól közelíthető a következő képlettel, amelyben a két falháj közötti átlagos, mért rezgésebbességszint-különbség, D_{v12} szerepel:

$$R_{\text{kéthéjú, merev}} \approx R_{\text{egyhéjú}} + D_{v12}. \quad (4.135)$$

A határfrekvencia alatt az egyhéjú és a kéthéjú szerkezet sugárzási foka közötti különbség okozza a nagyobb eltérést. Az egyhéjú szerkezetet ugyanis léghanggerjesztés, a kéthéjút azonban testhanggerjesztés éri. A kéthéjú merev peremkapcsolatokkal kivitelezett falszerkezet léghanggátlása nem mutat karakterisztikus kéthéjú jelleget, egyhéjú szerkezetként közelíthető, melynek fajlagos tömege a két háj fajlagos tömegének összege. A súlyozott léghanggátlási számokra adódik:

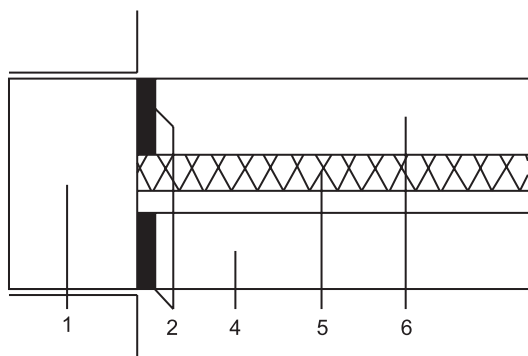
$$R_{w, \text{kéthéjú, merev}} \approx R_{w, \text{egyhéjú}} (m_1'' + m_2''). \quad (4.136)$$

A két háj közötti szerkezeti kapcsolatok megszüntetésével csak az $(1-2)^I$ hangterjedési út marad fenn elvileg, és ez jelentős mértékű hanggátlás növekedést eredményez $R_{\text{kéthéjú, merev}}$ -hez képest. A hanggátlásnövekedés olyan nagy, hogy biztonsággal állítható: a kéthéjú, merev kapcsolattal kivitelezett falazatok hanggátlásában az $(1-2)^{II} \dots (1-2)^V$ átviteli utak lesznek a meghatározók. Ennek többek között az a következménye, hogy a légrésben szokásosan elhelyezett szálas szigetelőanyagú légréskitöltésnek nincs lényeges szerepe a szerkezet léghanggátlásában.

4.11.8. Rugalmas peremkapcsolatokkal kivitelezett kettős falak léghanggátlása kerülőutak nélküli laboratóriumban

A kéthéjú falak rétegei rugalmas lemezek közbeiktatásával elválaszthatók a héjak közötti kapcsolatokat létrehozó laborszerkezetektől. A keletkező peremkapcsolat pilléres Π kapcsolathoz hasonlít, a laboratórium felépítése miatt azonban a Π alakú csomópont 1. és 4. eleme hiányzik. A laboratóriumi beépítés – háromrészes laboratórium, ahol a vizsgálandó szerkezetet vasbeton keretbe építik – során a peremek mentén keletkező szerkezeti csomópont vázlata a 4.52. ábrán látható.

A szerkezet jellemzésére, azaz a rugalmas elválasztórég hatásának számszerűsítésére a két falháj közötti rezgésebbességszint-különbség, D_{v12} értékét célszerű felhasználni. A számítás lépései:

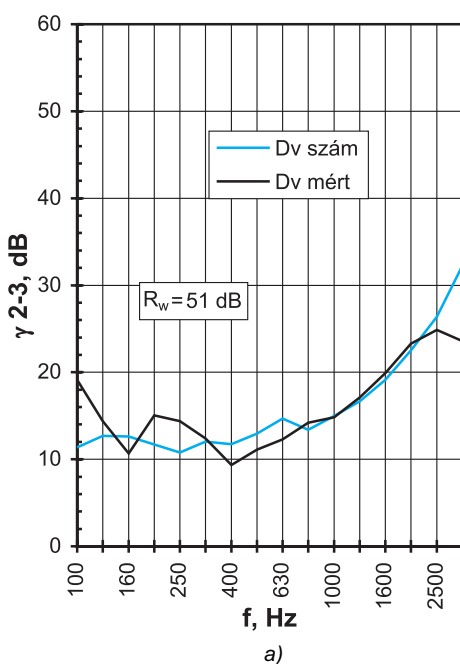


4.52. ábra. Rugalmas peremkapcsolattal kivitelezett kéthéjű fal laboratóriumi beépítésének szerkezeti csomópontja

1: laborszerkezet; 2: rugalmas elválasztóréteg;

4, 6: gipsz alapanyagú falazólapok; 5: légrés, benne szálas szigetelőanyag-kitöltés

- a csomópontra a korábbiak alapján meg kell határozni a $\gamma_{12}^{II} \dots \gamma_{12}^V$ rezgégátadásokat a frekvencia függvényében; ez azt jelenti, hogy mind a négy falperemre ki kell számítani a rezgégátadást;
- a (4.130b) képlet alkalmazásával ki kell számítani a vizsgált peremhez tartozó $D_{v12}^{II} \dots D_{v12}^V$ rezgésebbességszint-különbséget;



A 2. és 3. rugalmas elválasztóréteg fajlagos dinamikai merevsége nyomó igénybevételre az alsó vízszintes helyzetben $s'' \approx 1270 \text{ MN/m}^3$, a többi perem mentén $s'' \approx 250 \text{ MN/m}^3$ az elhelyezésből adódó terhelés hatása alatt; R_w : a szerkezet laboratóriumban mért súlyozott léghanggátlási száma, mintegy 3–5 dB-lel nagyobb, mint az azonos rétegrendű, merev peremkapcsolatokkal kivitelezett szerkezet R_w értéke

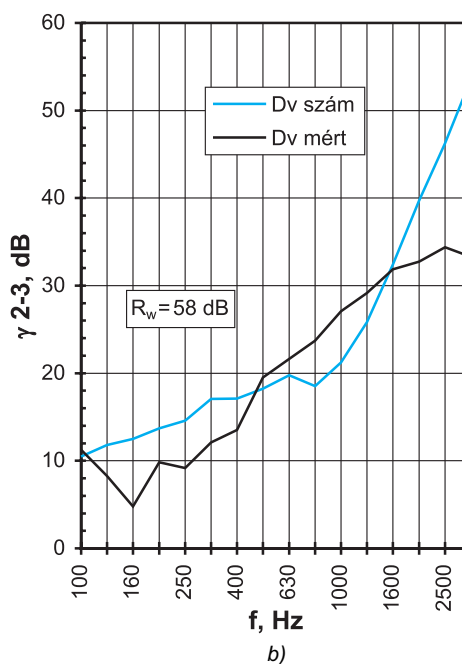
- a (4.102) képlettel az eredő D_{v12} érték számítható ki:

$$D_{v12} = 10 \cdot \lg \left(10^{-0,1 \cdot D_{v12}^{II}} + 10^{-0,1 \cdot D_{v12}^{III}} + \dots \right) \quad (4.137)$$

Mindezek szemléltetésére két példa található a 4.53a és 4.53b ábrákon. Mindkét példa rétegrendje azonos, az eltérés a peremkapcsolatok dinamikai merevségében van. Az adatmegadás a nyomó igénybevétel hatása alatt kialakuló fajlagos dinamikai merevséget tartalmazza, de a számításokhoz a 4.10.3. és a 3.5. alfejezetnek megfelelően a fajlagos nyírási modulus is figyelembe kell venni.

A közölt eredményekből látható, hogy a rugalmas peremkapcsolatok a $D_{v12}^{II} \dots D_{v12}^V$ rezgésebbességszint-különbségek hatékony növelése révén érdemben és – jó méretezés esetén – hatékonyan növelik a szerkezet léghanggátlási számát.

Fel kell azonban arra hívni a figyelmet, hogy ilyen jellegű szerkezet helyszíni alkalmazása mind akusztikai, mind szerkezeti szempontból nagyon pontos tervezést és a kivitelezés szigorú ellenőrzését teszi szükségessé.



A 2. és 3. rugalmas elválasztóréteg fajlagos dinamikai merevsége nyomó igénybevételre az alsó vízszintes helyzetben $s'' \approx 275 \text{ MN/m}^3$, a többi perem mentén $s'' \approx 50 \text{ MN/m}^3$ az elhelyezésből adódó terhelés hatása alatt; R_w : a szerkezet laboratóriumban mért súlyozott léghanggátlási száma, mintegy 10–12 dB-lel nagyobb, mint az azonos rétegrendű, merev peremkapcsolatokkal kivitelezett szerkezet R_w értéke

4.53. ábrásor. Rugalmas peremkapcsolattal kivitelezett kéthéjű fal hangszigetelési jellemzői laboratóriumi beépítésben

A fal peremkapcsolatára jellemző szerkezeti csomópont a 4.52. ábrán látható. A 4–5–6 rétegek a következők: 4: ALBA gipsz alapanyagú falazólap, $\rho = 1260 \text{ kg/m}^3$, vastagság = 10 cm; 5: 5 cm légrés, benne ISOVER TF50 üveggyapot fűl; 6: ALBA gipsz alapanyagú falazólap, $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, vastagság = 8 cm

4.12. Összetett szerkezetek eredő léghangszigetelésének meghatározása

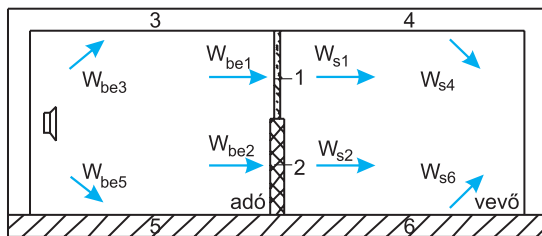
Egy zaj ellen védendő helyiségbe különböző határoló szerkezeteken és hangátviteli utakon keresztül jut be akusztikai teljesítmény. E teljesítmény-összetevőkből a helyiségre jellemző akusztikai sajátosságoknak megfelelően alakul ki átlagos hangnyomásszint. A hangforrások tartalmazó helyiség vagy terület, és a zaj ellen védendő helyiség közötti kapcsolatot a két helyiség vagy terület közötti eredő hangszigetelés jellemzi. Az eredő hangszigetelés lényegében az akusztikai teljesítmények viszonya: valamilyen felbontásban a terhelési oldalról érkező akusztikai teljesítmények és a zaj ellen védendő helyiségbe lesugárzott akusztikai teljesítmények aránya. Általánosan két helyiség közötti eredő hangszigetelést a 4.54a ábra, külső tér és helyiség közötti hangszigetelést a 4.54b ábra szemlélteti.

Mindkét ábrán W_{si} jelöli az i sorszámú határoló szerkezet által lesugárzott akusztikai teljesítményt, W_{bei} pedig a az i -edik szerkezet felületére beeső akusztikai teljesítményt. A két helyiséget elválasztó összetett szerkezetre (4.54a ábra) vagy a homlokzati szerkezetre (4.54b ábra) az (1+2) jelölés utal.

A hangszigetelés teljesítményalapú megfogalmazására több lehetőség adódik, és az épületakusztikai gyakorlat azonos kiindulásból több lehetőséget alkalmaz. A hazai gyakorlatban általános a léghanggátlási szám alkalmazása, amennyiben termék- vagy szerkezetjellemző más akusztikai mennyiség, a tervezés során azt is léghanggátlási számmá kell átszámítani.

A 4.54a ábra két szomszédos helyiség vázlatos kapcsolatát mutatja. Az 5. fejezetnek megfelelően pl. az 1. jelű épületszerkezet kerülőutak nélküli léghanggátlási száma fogalmi meghatározás szerint a következő:

$$R_1 = 10 \cdot \lg \left(\frac{W_{be1}}{W_{s1}} \right). \quad (4.138)$$



a) Két helyiség közötti hangszigetelés

Az 1. és 2. összetett szerkezet $R_{(1+2)}$, e eredő léghanggátlási számának értelmezését a (4.139) képlet fejezi ki, $W_{be,(1+2)}$ és $W_{s,(1+2)}$ a jelölt két szerkezet felületére beeső, ill. az általuk lesugárzott összes akusztikai teljesítményt jelenti:

$$\begin{aligned} R_{(1+2),e} &= 10 \cdot \lg \left(\frac{W_{be,(1+2)}}{W_{s,(1+2)}} \right) = \\ &= 10 \cdot \lg \left(\frac{W_{be1} + W_{be2}}{W_{s1} + W_{s2}} \right). \end{aligned} \quad (4.139)$$

Az eredő hanggátlást az összetevők hanggátlása definíciójának felhasználásával meg lehet határozni, ehhez csupán a következő kiegészítés szükséges: a határoló szerkezetek felületére beeső akusztikai teljesítmény a diffúz hangtér mint közelítés miatt a határoló szerkezetek felülete mentén egyenletes eloszlású, nagysága arányos a felület nagyságával:

$$W_{be1} = W_{be,1+2} \cdot \frac{S_1}{S_1 + S_2}. \quad (4.140)$$

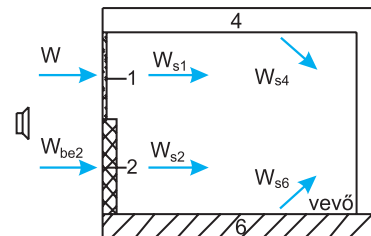
Így $R_{(1+2),e}$ értéke:

$$R_{(1+2),e} = 10 \cdot \lg \left(\frac{S_1 + S_2}{\sum_{i=1,2} S_i \cdot 10^{-0,1 \cdot R_i}} \right). \quad (4.141)$$

Ilyen jellegű eredő meghatározásának feladata pl. irodai helyiség vagy tanterem és folyosó közötti, több szerkezetből álló válaszfal méretezése során merül fel.

Amennyiben homlokzati szerkezetek eredő, kerülőutak nélküli léghanggátlását kell kiszámítani, amely feladathoz a 4.54b ábra tartozik, az eljárás azonos eredményre vezet, de akkor a (4.140) képletben az egyes akusztikai teljesítmények nem a diffúz hangtérből, hanem síkhullámú térből érkeznek a határoló szerkezet felületére.

A két helyiség közötti R' helyszíni léghanggátlás szintén eredő léghanggátlás, azonban értelmezése – a diffúz téri közelítés alapján – eltér egy kissé az



b) Külső tér és helyiség közötti hangszigetelés

4.54. ábrásor. Az eredő hangszigetelés szemléltetése

W_{si} az i indexű szerkezet által lesugárzott akusztikai teljesítmény, W_{bei} az i sorszámú szerkezet felületére beeső akusztikai teljesítményt jelenti

előzőektől. Az eltérés oka a helyszíni léghanggátlási szám „történelmi fejlődés során kialakult” definíciója, amelynek a (4.142) képlet szerinti definíciójában a szereplő mennyiségek megfelelnek a 4.54a ábra jelöléseinek:

$$R' = 10 \cdot \lg \left(\frac{W_{be,(1+2)}}{\sum_i W_{si}} \right). \quad (4.142)$$

Az egyes hangterjedési utak léghanggátlására két-féle definíció létezik. Az egyik definíciót a 9.3., a másik a 9.4. alfejezet méretezési módszere alkalmazza. Az előbbit csak ebben a részben *, az utóbbit ** jelölés különbözteti meg. A hangterjedési utak léghanggátlásának két indexe van, az egyik annak a szerkezetnek a sorszáma, amelyik a gerjesztést kapja, ezt i jelöli, a másik pedig azé, amelyik lesugározza az akusztikai teljesítményt, ennek jele j :

$$R_{i,j}^* = 10 \cdot \lg \left(\frac{W_{be,i}}{W_{s,j}} \right); \quad (4.143)$$

$$R_{(1+2),j}^{**} = 10 \cdot \lg \left(\frac{W_{be,(1+2)}}{W_{s,j}} \right). \quad (4.144)$$

A (4.143) definíció tehát azt jelenti, hogy a hangterjedési út léghanggátlási számának meghatározása során a terhelést az i -ik szerkezet felületére beeső akusztikai teljesítmény nagyságával jellemzik. A (4.144) definíciót ezzel szemben úgy kell értelmezni, hogy a viszonyítási alap a két szomszédos helyiséget elválasztó szerkezet felületére beeső teljesítmény, a lesugárzott teljesítmény azonban változatlanul az i indexű szerkezetet terheli. Az elmondottakkal azonos megfontolások és hasonló, elemi matematikai műveletek alapján lehet a két módon meghatározott eredő léghanggátlás, $R_{eredő}$ képletéhez jutni, amelyek egyébként számszerűen azonos eredményt adnak. A két képlet között ismét a *, ill. ** jelölések tesznek különbséget. A k index a hangterjedési utak száma:

$$R_{eredő}^* = 10 \cdot \lg \left(\frac{S_{1+2}}{\sum_k S_i \cdot 10^{-0,1 \cdot R_{ij}^*}} \right); \quad (4.145)$$

$$R_{eredő}^{**} = 10 \cdot \lg \left(\frac{1}{\sum_k 10^{-0,1 \cdot R_{(1+2),j}^{**}}} \right). \quad (4.146)$$

4.13. Hangelnyelő szerkezetek működésének modellezése

A hangelnyelő szerkezetek közül a leggyakrabban előforduló szerkezeteket tekintjük. Felépítésük a gyakorlat szerint kétféle lehet:

- I. felületképzéssel ellátott szálás szigetelőanyag lemez; a felületképzés porózus, légáteresztő vagy tömör, nem légáteresztő lehet; a szálás szigetelőanyag lemez mögött légrés található;
- II. perforált, lemez jellegű szerkezet, amely mögött szálás szigetelőanyag lemez és légrés van.

A modellezés során a szerkezet hangelnyelési tényezőjét kell meghatározni a szerkezet összetevői és a frekvencia függvényében.

Az egyes szerkezeti elemek első közelítésben az alábbi módon viselkednek:

- a szálás szigetelőanyag nyílt cellás, merev vázas, porózus anyag, hatását alapvetően a fajlagos áramlási ellenállása, tehát a belső súrlódás miatt fejt ki;
- a légrés a kisfrekvenciás tartományban rugóként működik, a frekvencia növekedtével a légrésben a terjedés irányában hullámterjedés jelensége játszódik le;
- a kis fajlagos tömegű tömör felületi rétegek tömegként működnek;
- a perforálásokban levő levegő tömegként működik.

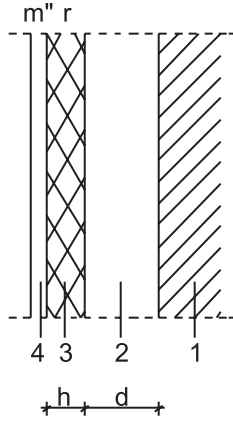
[IV.1], [IV.2], [IV.5]

A részletesebb vizsgálathoz alkalmazott modellezési módszer szinte már klasszikusnak számít, de a tapasztalatok szerint ezeket a közelítéseket a hangelnyelő burkolatok általánossá válása idején széles körben alkalmazták fejlesztési eszközként. Többi között ezért is érdemes visszatérni hozzájuk.

Az egyszerűség kedvéért a hullámterjedés iránya merőleges a vizsgálandó szerkezet felületének síkjára. A hullámterjedés síkhullámú jellegű, a hangvisszaverődés a geometriai visszaverődés sajátosságai szerint játszódik le. A merőleges beesés miatt az eredmények nem alkalmazhatók a teremakusztikai, zajcsökkentési tervezés során, azonban a hangelnyelés fontos tendenciáit, jellegzetességeit nagyon tisztán mutatják.

A vizsgálandó elrendezés az I. feladatban a 4.55. ábrán látható. A légrés vastagsága d , a szálás szigetelőanyag vastagsága h , fajlagos áramlási ellenállása r , porozitása σ , szerkezeti tényezője θ . A porozitás a szigetelőanyagban található, a külső térrel kapcsolatban levő levegő térfogat és a teljes anyag-térfogat hányadosa. A gyakorlatban alkalmazott szálás szigetelőanyagok porozitása általában 0,9 felett van, ami azt jelenti, hogy ezen anyagok több, mint 90%-a levegő. A szerkezeti tényező az anyagban levő levegő térfogat és a hangterjedésben szerepet játszó levegő térfogat aránya. A korábbi fejezetekkel összhangban ρ_L a levegő sűrűsége, c a hang terjedési sebessége.

Ha a külső réteg porózus, légáteresztő, az áttekinthetőség



4.55. ábra. Hangelnyelő szerkezet elrendezési vázlata

1 alapszerkezet, merev, hangvisszaverő;
2 légrés, vastagsága d ; 3 szálás szigetelőanyag, vastagsága h ,
fajlagos áramlási ellenállása r ; 4 burkolati réteg, ha légtömör,
fajlagos tömege m''

érdekében áramlási ellenállása legyen sokkal kisebb, mint a szálás szigetelőanyag lemezé. Ha a felületi bevonat légtömör, akkor fajlagos tömege m'' . A levegőben terjedő hang k hullámszámát a (2.44), a karakterisztikus z_0 hullámimpedanciát a (2.55), a reflexiós tényező értelmezését, $r(0)$ -t a (2.65) képlet fejezi ki. A reflexiós tényező kifejezésében a zárójelben levő 0 arra utal, hogy a vizsgálat és számítások a merőleges beesésre korlátozódnak.

A légrés fajlagos Z_l bemeneti impedanciáját a (4.117) képlet fejezi ki. A bemeneti impedancia a légrés síkjára merőleges terjedési irányban a légrés vastagságának megfelelő távolságban a p hangnyomás és a v részecskesebesség hányadosa. A légrés mögötti fal ideálisan merev, reflexiós tényezője 1:

$$Z_l = -i \cdot z_0 \cdot \operatorname{ctg}(k \cdot d). \quad (4.117)$$

A bemeneti impedancia közelíthető a levegőréteg mint rugó impedanciájával akkor, ha a légrés vastagsága sokkal kisebb, mint a hullámhossz.

A szálás szigetelőanyagban a hullámterjedés γ_s terjedési tényezőjét a (4.118) összefüggés, a Z_s hullámimpedanciát a (4.119) összefüggés adja:

$$\gamma_s = i \cdot k \cdot \sqrt{\theta} \cdot \sqrt{1 - \frac{i \cdot \sigma \cdot r}{\rho_L \cdot \theta}}; \quad (4.118)$$

$$Z_s = z_0 \cdot \frac{\sqrt{\theta}}{\sigma} \cdot \sqrt{1 - \frac{i \cdot \sigma \cdot r}{\rho_L \cdot \theta}}. \quad (4.119)$$

A bemeneti impedancia értékét a hullámimpedanciák egymás után kapcsolására vonatkozó összefüggés alapján lehet meghatározni, ez már sem soros, sem párhuzamos kapcsolás a hullámterjedés miatt:

$$Z_{be} = Z_s \cdot \frac{Z_l \cdot \operatorname{cth}(\gamma_s \cdot h) + Z_s}{Z_l + Z_s \cdot \operatorname{cth}(\gamma_s \cdot h)}. \quad (4.120)$$

Ha a szigetelőanyag-réteget légtömör, tömeggel rendelkező burkolat takarja, akkor a Z_{be} bemeneti impedancia a tömeg által okozott impedanciával módosul a (4.121) képlet szerint, egyébként a bemeneti impedancia a szigetelőanyag+légrés összetett szerkezet Z_{be} bemeneti impedanciája lesz:

$$Z_{be} = Z_{be} + i \cdot \omega \cdot m''. \quad (4.121)$$

Az $r(0)$ reflexiós tényezőt a (4.122), az $\alpha(0)$ hangelnyelési tényezőt a (4.123) képlet adja meg:

$$r(0) = \frac{Z_{be} - z_0}{Z_{be} + z_0}; \quad (4.122)$$

$$\alpha(0) = 1 - |r(0)|^2. \quad (4.123)$$

A fenti összefüggéssor alkalmazásával a merőleges beeséshez tartozó hangelnyelési tényező-frekvencia függvények számíthatók ki. A valóságos eredmények ettől már csak a ferdeirányú beesés miatt is természetesen eltérnek. Egyes jelenségek sokkal élesebben jelennek meg, mint a ferdeirányú beesésnél tapasztalható. Azonban a közelítések – a tapasztalatok szerint – alkalmasak tendencia jellegű megállapításokra, a szerkezetfejlesztés feladatainak megoldására és anyagok, szerkezeti részek hatásának modellezésére.

A tendenciák szemléltetésére reális fizikai és műszaki adatokkal végzett próbaszámítások eredményeit mutatják be a soron következő ábrák.

A 4.56a ábrán $20\,000 \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}^4$ fajlagos áramlási ellenállású, változó vastagságú szálás szigetelőanyag hangelnyelési tényezője látható a frekvencia függvényében, ha a légrés 0 cm. A légrés mögött merev fal található. Az eredményekből megfigyelhető, hogy a hatékony hangelnyelés eléréséhez feltétel az, hogy a merev faltól számítva a szigetelőanyag külső felületének távolsága legalább a hullámhossz negyede legyen. Ez a megállapítás összhangban van a 2.2.4., 2.2.5. részekben ismertetettekkel.

A 4.56b ábra különböző fajlagos áramlási ellenállású, 4 cm vastag szigetelőanyag-rétegek hangelnyelési tényezőjének számított értékét mutatja, a légrés szintén 0 cm. Részben ebből, részben az előző ábrából figyelhető meg, hogy a hangelnyelés szempontjából a lemez áramlási ellenállásának optimális értéke van, melyet a következő összefüggés fejez ki:

$$r \cdot d \approx 2 \cdot z_0. \quad (4.124)$$

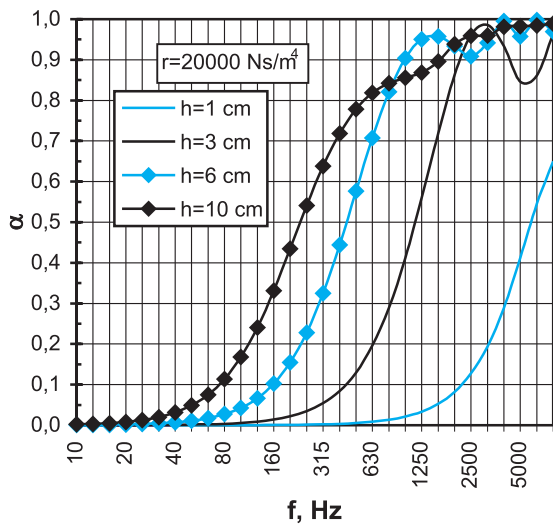
A 4.56c ábra a légrés vastagságának hatását szemlélteti. A számpéldában szigetelőanyag-réteg vastagsága és áramlási ellenállása az optimális értéket adja. Látható, hogy a légrés növekedtével a kisfrekvenciák irányába nő a hangelnyelés hatékony tartománya. A hatékonyság feltétele:

$$(d + h) > \frac{\lambda}{4}. \quad (4.125)$$

Megfigyelhető még, hogy a hangelnyelési tényező értékében éles minimum alakul ki. Ez azon a frekvencián jön létre, amelyhez tartozó hullámhossz a légrés vastagságának fele. A valóságban ilyen éles minimum nem alakul ki, mert a beesési szög 0° – 90° között változik, és így a méretfeltétel nem egy frekvenciára korlátozódik.

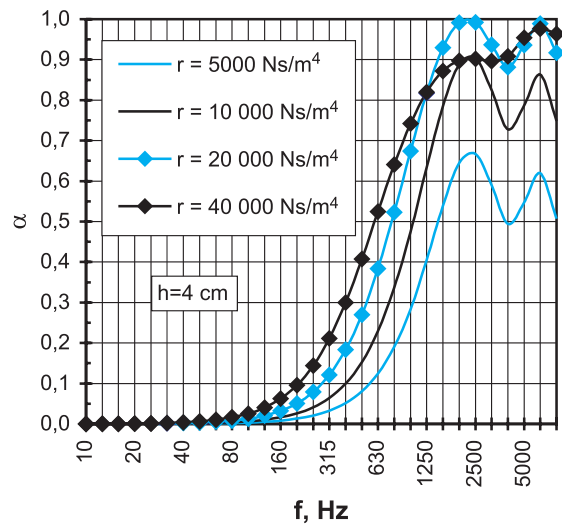
A 4.56d ábra a szigetelőanyagra terített, légtömör fedőréteg fajlagos tömegének hatását mutatja a hangelnyelési tényezőre. Ilyen jellegű fedőrétegre többek között akkor lehet szükség a gyakorlatban, ha a szigetelőanyag-réteget nedvesség ellen kell védeni. Az eredményekből megfigyelhető, hogy a tömegként működő takaróréteg lerontja a nagyobb frekvenciás hangelnyelést, a széles sávú hangelnyelő szerkezetből egyre inkább rezonátor keletkezik.

Ha a hangelnyelő szerkezet helyiség felőli, legkülső rétege perforált lemez a 4.57. ábrán látható vázlat szerint, akkor a v



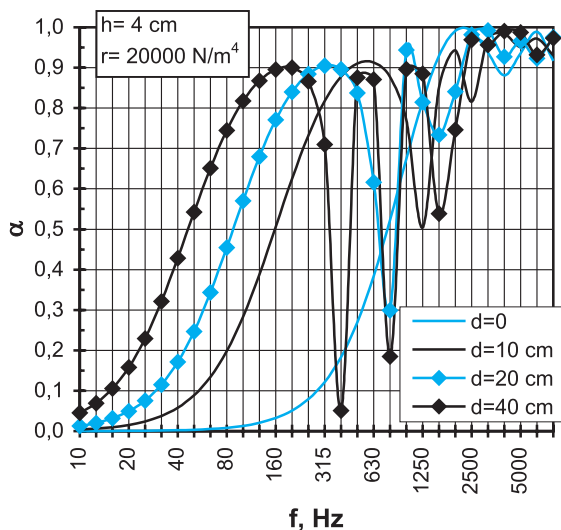
4.56a ábra. A szálás szigetelőanyag réteg vastagságának hatása a hangelnyelési tényezőre

A szigetelőanyag réteg fajlagos áramlási ellenállása $r = 20000 \text{ Ns/m}^4$; a légrés $d = 0 \text{ cm}$



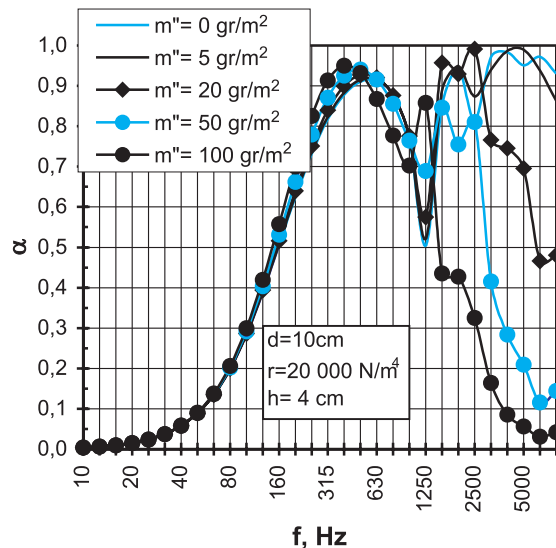
4.56b ábra. A szálás szigetelőanyag réteg fajlagos áramlási ellenállásának hatása a hangelnyelési tényezőre

A szigetelőanyag réteg vastagsága $h = 4 \text{ cm}$, a légrés $d = 0 \text{ cm}$



4.56c ábra. A szálás szigetelőanyag réteg mögötti légrés hatása a hangelnyelési tényezőre

A szigetelőanyag réteg vastagsága $h = 4 \text{ cm}$, fajlagos áramlási ellenállása $r = 20000 \text{ Ns/m}^4$



4.56d ábra. A légtömör fedőréteg réteg m'' fajlagos tömegének hatása a hangelnyelési tényező értékére

A szigetelőanyag réteg vastagsága $h = 4 \text{ cm}$, fajlagos áramlási ellenállása $r = 20000 \text{ Ns/m}^4$, a légrés $d = 10 \text{ cm}$

lemezvastagság, a perforáció mérete (kör alakú lyukaknál az r_l sugár) és a perforáció felületi aránya a teljes szerkezet felületéhez képest, e szabad paraméterek. A perforáció tömegként működik, a fajlagos tömeg, m''_p nagyságát a (4.126) képlet adja kör alakú perforációra:

$$m''_p \approx \frac{v \cdot \rho_L}{\varepsilon} + \frac{\rho_L \cdot r_l \cdot 1,6}{\varepsilon} \cdot \left(1 - 1,47 \cdot \varepsilon^{\frac{1}{2}} + 0,47 \cdot \varepsilon^{\frac{3}{2}} \right). \quad (4.126)$$

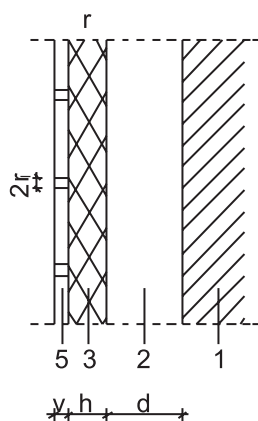
A lemez fajlagos tömege m''_p , az eredő fajlagos tömeget a (4.127) összefüggés fejezi ki.

$$m''_e = \frac{m''_p \cdot m''_l}{m''_p + m''_l}. \quad (4.127)$$

Az eredő tömeget kell a (4.121) képletben m'' helyére helyettesíteni. A lemez fajlagos tömege általában sokkal nagyobb, mint a perforációban levő levegő fajlagos tömege, ezért elhanyagolható.

A tendenciákat a 4.58. ábra szemlélteti. Látható, hogy a széles sávú hangelnyelő szerkezet helyett ismét rezonátor jellegű, tehát egy frekvenciatartományban hatásos hangelnyelő szerkezet keletkezik. A maximális hangelnyelés helyét a lyukak sugarával és a perforáció felületi arányával finoman lehet állítani. Többféle méretű és egyenetlen eloszlású perforációval az igények szerinti hangelnyelés állítható be.

A szálás szigetelőanyag hangelnyelés szempontjából optimális d vastagságát és optimális r fajlagos áramlási ellenállá-

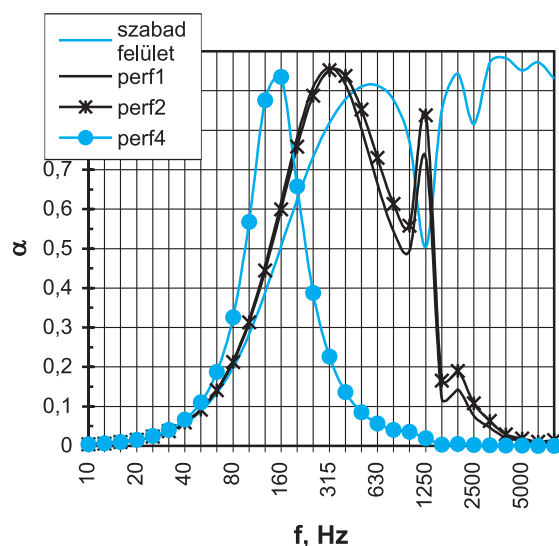


4.57. ábra. Perforált lemezzel borított hangelnyelő szerkezet vázlata

sát a (4.124) összefüggéssel lehet meghatározni, z_0 a levegő karakterisztikus hullámellenállása.

A hangelnyelő szerkezet attól a frekvenciától hatásos, amelyhez tartozó λ hullámhossz, a d légrésméret és a szigetelőanyag h vastagsága között a (4.125) összefüggés áll fenn.

Ha a szerkezet helyiség felé néző oldalán a legkülső réteg légtömör fólia vagy lemez, akkor az tömegként működik. A keletkező összetett szerkezet rezonátor jellegű, tehát egy frekvenciasávban lesz hatékony hangelnyelő. A perforált burkolatok szintén tömegként modellezhetők, s rezonátor jellegű szerkezetet eredményeznek. A lemez vagy fólia fajlagos tömege, illetve a perforáció adatai segítségével lehet a hatékony hangelnyelés frekvenciatartományát finoman a kívánt helyre hangolni.



4.58. ábra. A perforált külső burkolat hatása a hangelnyelési tényező értékére

A szigetelőanyag réteg vastagsága $h = 4$ cm, fajlagos áramlási ellenállása $r = 20000$ Ns/m⁴, a légrés $d = 10$ cm.

perf1: a perforált lemez vastagsága 12,5 mm, a lyukak kerek, 5 mm átmérőjűek, a perforálás felületi aránya 10%;

perf2: a perforált lemez vastagsága 12,5 mm, a lyukak kerek, 2 mm átmérőjűek, a perforálás felületi aránya 10%;

perf3: a perforált lemez vastagsága 12,5 mm, a lyukak kerek, 5 mm átmérőjűek, a perforálás felületi aránya 2%

5.

ÉPÍTÉSI TERMÉKEK AKUSZTIKAI JELLEMZŐI

5.1. A termék- és szerkezetjellemzők meghatározásának célja

Az építési termékek (épületekben felhasznált anyagok, szerkezetek, berendezések) akusztikai minőséget kifejező különböző termékjellemzők bevezetésének, meghatározásának sokféle célja, alkalmazásának pedig több felhasználási területe van:

- a termékek összehasonlítása akusztikai minőségük, teljesítőképességük alapján;
- a termékek kiválasztása egy meghatározott alkalmazási esetre az akusztikai minőséget kifejező mennyiség számértéke szerint;
- a laboratóriumban mérhető és a helyszíni körülmények között kialakuló akusztikai tulajdonság közötti számszerű, fizikai kapcsolat kifejezése;
- az épület – helyszín – akusztikai minőségének (teljesítő képességének) meghatározása, tehát az akusztikai tervezés, a termékek akusztikai minősége vagy e minőséget kifejező fontos fizikai paraméter alapján.

Valamennyi cél elérése érdekében olyan termékjellemzőket helyes definiálni és alkalmazni, amelyek egyértelműen mérhetők, a mérésre lehetőleg szabványos, de mindenképpen általánosan elfogadott, ismert pontosságú mérési módszer áll rendelkezésre, és a termékjellemző mérése összefügg a jelenség fizikai tartalmával.

Az építési termékek akusztikai jellemzői többségükben a frekvencia függvényei. A hangszigetelési jellemzőket hagyományosan 100–3150 Hz-ig vizsgálják, ill. adják meg, de az utóbbi évtizedben határozottan megfigyelhető tendencia, hogy a mérési tartomány mind a kisfrekvenciák, mind a nagyfrekvenciák irányában kitolódik. A termékjellemző frekvenciafüggvénye mellé még egy ún. egyadatos mennyiség és társul, amely az egyszerű összehasonlítást, szerkeztválasztást közvetlenül lehetővé teszi, pl. azt kell kiválasztani, ami nagyobb vagy kisebb, mint egy határérték.

Más esetekben a termékjellemző egyetlen adat.

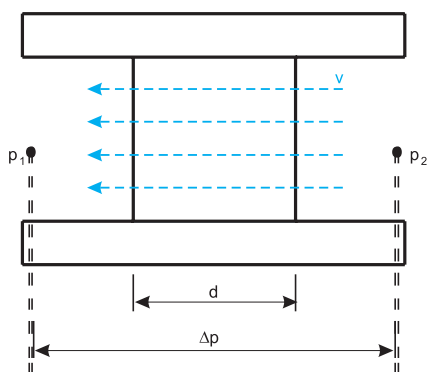
A hangterjedési utakat, vizsgálati elrendezéseket elvi ábrák szemléltetik, ezért számos olyan részletet nem tartalmaznak, amelyek a vizsgálat elve szempontjából nem fontosak, bár a vizsgálati elrendezés működtetése, használata szempontjából nélkülözhetetlenek (pl. a hangszigetelés vizsgálati elrendezésében a mérőhelyiségekbe vezető ajtók elhelyezkedése).

A hangszigetelési jellemzők ismertetése során a kialakult elnevezések szerepelnek, az adóhelyiség tartalmazza a mesterséges hangforrást, a vevőhelyiségben pedig nincs hangforrás. A léghang forrást hangszóró sematikus ábrája szemlélteti, a fődém, padlóburkolat felületén működő testhang forrást, amelyet szabványos kopogógépnek hívnak, kaplácás vázlatos rajza jelzi.

Az ábrákon a hangterjedés, hangátvitel irányait nyilak jelölik. Ez az ábrázolás egyszerűen áttekinthető, a megértést segíti, azonban a hangterjedés módjáról, a rezgési folyamatokról, az egyes összetevők deformációjáról semmilyen információt nem ad.

5.2. Szálas szigetelőanyagok fajlagos áramlási ellenállása [II.24]

A szálas szigetelőanyag termékek – üveggyapot, bazaltgyapot lemezek, filcek stb. – nyílt pórusú anyagok, tehát az anyag belső terében levő levegő az anyag környezetével közvetlen kapcsolatban van. Az ilyen anyagok akusztikai célú alkalmazásának egyik csoportjában a terméket hangelnyelő szerkezetben vagy kéthéjús szerkezetben helyezik el. A hangelnyelő burkolatban légrést kitöltő anyagként szerepelhet pl. tömör vagy perforált kéreglemez mögött, vagy akár kasírozott formában, közvetlen térhatároló elemként is. A helyiség felől jövő vagy a zárt térben kialakuló hanghullám behatol a porózus anyagba, a levegőrészecskék rezgőmozgást végeznek, az elemi szálak felületén surlódnak, a hullám-



5.1. ábra. Szálas szigetelőanyagok áramlási ellenállásának értelmezése

terjedéssel szállított akusztika teljesítmény a súrlódás következtében hővé alakul, tehát a hullámterjedés felől nézve elnyelődik. Ennek a mechanizmusnak – a termék kiválasztást segítő – egyszerű közelítése az állandó vagy lassan változó légáram hatására kialakuló áramlási ellenállás értelmezése.

A szálas szigetelőanyag termékből kivágott minta két oldala között létrehozott állandó légnyomás különbség hatására az anyagon keresztül levegőáramlás alakul ki. E modellben az áramlás örvénymentes, lamináris, a minta felületén a nyomás egyenletes, a helytől független. A [II.24] szabvány szerint a kör vagy négyzet alakú mintát befogószerzősben helyezik el. A vizsgálati elrendezés elvi vázlatát az 5.1. ábrán látható.

A d vastagságú minta két oldala között létrehozott, N/m^2 -ben kifejezett Δp légnyomáskülönbség, és az ennek hatására létrejövő v légáramlási sebes-

ség hányadosa a minta R áramlási ellenállása, mértékegysége $N \cdot s/m^3$. Az egységnyi vastagságú minta áramlási ellenállása a fajlagos áramlási r ellenállás, mértékegysége $N \cdot s/m^4$. A definíciók tömören:

$$R = \frac{\Delta p}{v}; \quad (5.1)$$

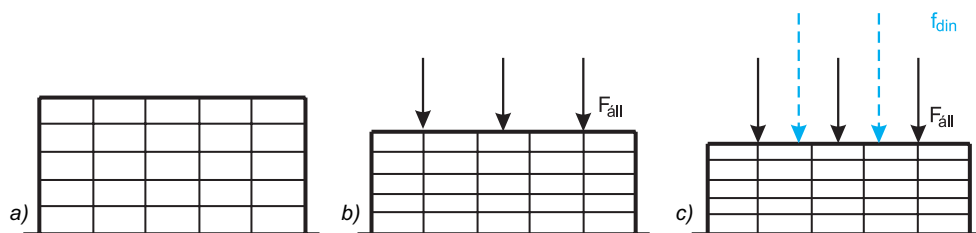
$$r = \frac{R}{d}. \quad (5.2)$$

További vizsgálati módszerek is vannak, elvi alapjaik azonban megegyeznek az itt ismertetettel.

5.3. Rugalmas lemezek dinamikai rugalmassági modulusai és veszteségi tényezői

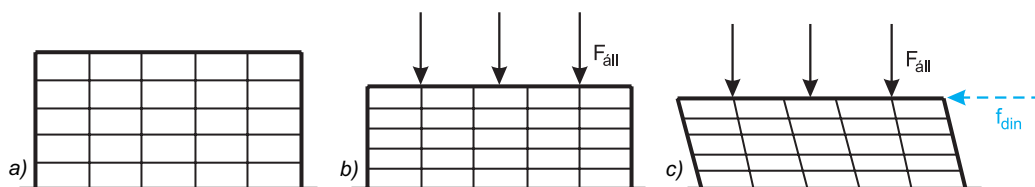
Épületszerkezetekben gyakran alkalmaznak a szerkezeti elemek elválasztására rugalmas lemezeket. Üzemi, használati állapotban kisebb-nagyobb állandó terhelés hat rájuk, a dinamikai hatás, a rezgésgerjesztés ehhez adódik. A dinamikai hatás nagysága az épületakusztikai méretezésekben mindig sokkal kisebb, mint az állandó terhelés. A rugalmas lemez lehetséges deformációi közül leggyakrabban a nyomó és nyíró igénybevétel hatására létrejövő deformációt kell figyelembe venni. A nyomó igénybevétel az 5.2., a nyíró igénybevétel a 5.3. ábrán látható.

Az 5.4. ábrán rugalmas lemezben nyomó igénybevétel hatására kialakuló feszültség–relatív méretváltozás összefüggésének lineáris szakasza látha-



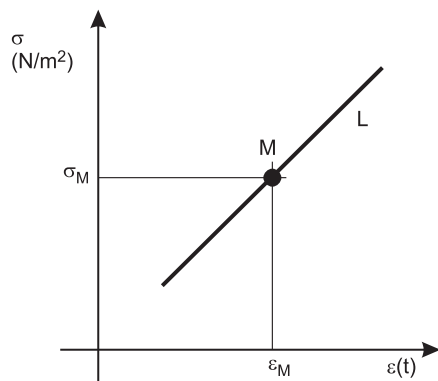
5.2. ábra. Rugalmas lemez deformációja dinamikus nyomó igénybevétel hatására

- a) rugalmas lemez nyugalmi helyzetben; b) rugalmas lemez deformációja nyomó igénybevételt létrehozó $F_{áll}$ állandó erő hatására; c) az állandó erő mellé f_{din} nyomóirányú dinamikus erőhatás adódik, a rugalmas lemez teljes deformációját e két hatás hozza létre

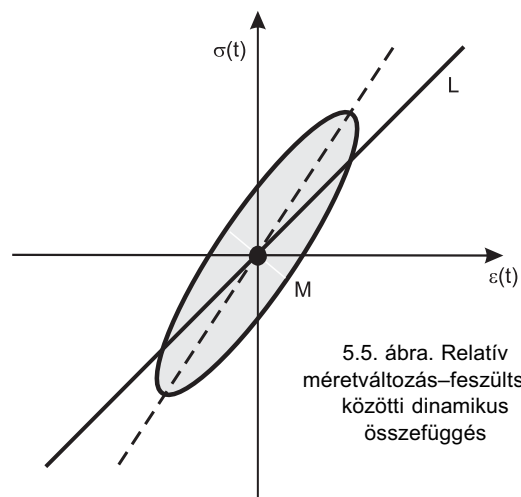


5.3. ábra. Rugalmas lemez deformációja dinamikus nyíró igénybevétel hatására

- a) rugalmas lemez nyugalmi helyzetben; b) rugalmas lemez deformációja nyomó igénybevételt létrehozó $F_{áll}$ állandó erő hatására; c) az állandó erő mellé f_{din} nyíróirányú dinamikus erőhatás adódik, a rugalmas lemez teljes deformációját e két hatás hozza létre



5.4. ábra. Relatív méretváltozás–feszültség közötti összefüggés állandó terhelés esetén



5.5. ábra. Relatív méretváltozás–feszültség közötti dinamikus összefüggés

tó. Az anyagban a külső terhelés hatására létrejövő σ feszültség (mértékegysége N/m^2 , azaz Pascal) és a terheletlen állapothoz képesti ε relatív méretváltozás adja az M munkapontot. E külső terheléshez adódik a dinamikai hatás, igénybevétel, emiatt az anyagban ébredő feszültség a munkaponti érték környezetében ingadozni fog. Hasonlóképpen ingadozik a relatív méretváltozás is.

A rugalmas lemezben a belső, viszkózus súrlódás, vagy a deformáció során lezajló relaxációs mechanizmus miatt az egydimenziós Hook-törvény dinamikai alakjában a méretváltozás és a feszültség között fáziseltérés alakul ki. Ezt a fáziseltérést az E_{din} dinamikai rugalmassági modulus valós értékéből és a η_E veszteségi tényezőtől kiindulva a E_{din} komplex alakokkal is kifejezhető az (5.3) összefüggés szerint. A veszteségi tényezőt szokás δ_E -vel is jelölni:

$$\underline{E}_{din} = E_{din} \cdot (1 + i \cdot \eta_E). \quad (5.3)$$

A dinamikus kapcsolatot leíró Hook-törvény felírható időfüggvényként, a relatív méretváltozás $\varepsilon(t)$ időfüggvénye és az anyagban ébredő feszültség $\sigma(t)$ időfüggvénye között az arányossági tényező E_{din} komplex dinamikai rugalmassági modulus az (5.4) képlet szerint. A kapcsolat azonban a relatív méretváltozás $\underline{\varepsilon}$ komplex amplitúdója és a belső feszültség $\underline{\sigma}$ komplex amplitúdója is kifejezhető, amint azt az (5.5) képlet mutatja:

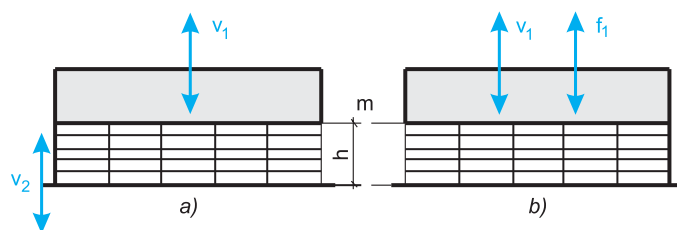
$$\sigma(t) = \text{Re}\{\underline{E}_{din} \cdot \varepsilon(t)\}; \quad (5.4)$$

$$\underline{\sigma} = \underline{E}_{din} \cdot \underline{\varepsilon} \quad (5.5)$$

Ha a rugalmas lemezen harmonikus rezgés alakú méretváltozást hozunk létre, a relatív méretváltozás–feszültség összefüggés a munkapont körül

ferde helyzetű ellipszis lesz (5.5. ábra). Az ellipszis területe egyenesen arányos mind a veszteségi tényezővel, mind pedig a dinamikai rugalmassági modulus valós részével. Minél nagyobb a veszteségi tényező értéke, annál szélesebb lesz az ellipszis. Egyidejűleg az ellipszis területe egyenlő az egy rezgési periódusban a veszteség miatt disszipált energiával is, ami a rugalmas lemez szempontjából energiaveszteség. A veszteségi tényezőre az energiamérleg alapján szemléletes magyarázat adható: a veszteségi tényező az egy rezgési periódusban disszipált energia és az e periódushoz tartozó reverzibilis mechanikai energia aránya.

A nyomó igénybevétel esetén tapasztalható dinamikai rugalmassági modulus vizsgálatára több szabványos módszer ismert. E módszerek közös jellemzője, hogy közvetett módszert alkalmaznak: tömegből és rugóból álló rezgőrendszert hoznak létre, amelynek rezonanciafrekvenciája a terhelő tömegtől és a rugó fajlagos dinamikai merevségétől függ, l. az (5.6) képletet. A rezonanciafrekvenciát többek között átviteli függvény vagy bemenő impedancia mérési eredményéből állapíthatjuk meg. A vizsgálati elrendezésekre a 5.6. ábrán láthatók példák. A mintán levő terhelő tömeg mindkét példában egyúttal a rugalmas lemez terhelését is létrehozza. Az átviteli függvény a rázóasztal v_2 rezgése sebességének és a terhelő tömeg v_1 rezgése sebességének hányadosa. A bemeneti impedancia vizsgálata során a rendszer gerjesztését a terhelő tömegre ható erőrezgés hozza létre, a bemeneti impedancia az f_1 gerjesztőerő és a terhelő tömeg v_1 rezgése sebességének hányadosa. Mind az átviteli függvénynek, mind a bemeneti impedanciának a rendszer sajátfrekvenciáján van rezonanciája. Az f_{rez} rezonanciafrekvencia a terhelés által létrehozott fajlagos m'' tömegtől és a rugalmas lemez nyomó igénybevétel



5.6. ábra. Nyomó igénybevétellel szembeni dinamikai rugalmassági modulus vizsgálati elrendezése

m a terhelést létrehozó és együttrezgő tömeg; v_1 a tömeg rezgése sebessége; f_1 a tömegre ható erő; h a vizsgálandó lemez terhelés alatti vastagsága; v_2 a rázóasztal lapjának rezgése sebessége

esetén kialakuló fajlagos dinamikai merevségétől, s'_{nyo} -tól függ. A terhelés miatt ezen módszerek valószínűs alkalmazásokhoz kapcsolódnak. Úszópadlóban alkalmazható rugalmas lemezek vizsgálatához a [II.23] szerint a terhelés 2 kN/m^2 -nek megfelelő 200 kg/m^2 fajlagos tömeg. Nincs mérés technikai akadálya annak, hogy a rezgőrendszer megvalósításához szükséges tömeg az úszópadló további gyakorlati alkalmazásainak megfelelően 500 kg/m^2 vagy 1000 kg/m^2 fajlagos terhelést hozzon létre. A fajlagos dinamikai merevség és az anyag dinamikai rugalmassági modulusa közötti kapcsolatot az (5.7) fejezi ki:

$$f_{rez} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{s'_{nyo}}{m''}}; \quad (5.6)$$

$$E_{din} = s'_{nyo} \cdot h. \quad (5.7)$$

A η veszteségi tényezőt legegyszerűbben a rezonanciafrekvencián mérhető lecsengési görbe alapján megállapítható T_{rev} utózengési időből szá-

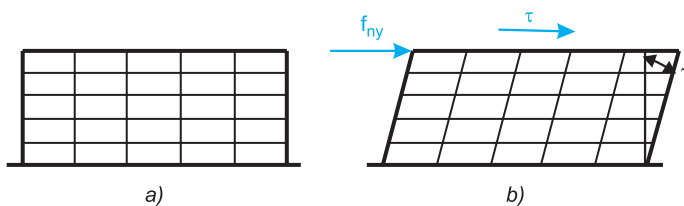
mítják ki az (5.8) összefüggéssel. A képletből tükröződik, hogy egy rendszerben minél nagyobb a belső veszteség, annál rövidebb ideig tart a lecsengési folyamat, tehát annál kisebb lesz az utózengési idő:

$$\eta = \frac{2,2}{f_{rez} \cdot T}. \quad (5.8)$$

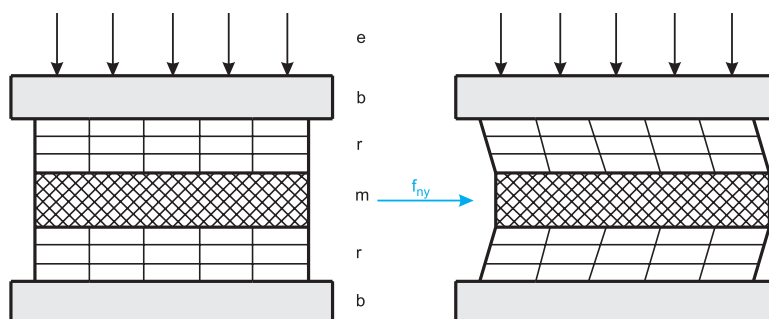
Nyíró igénybevétellel szemben mutatkozó rugalmassági modulus nyírási modulusnak nevezik, jele G , mértékegysége N/m^2 . Értelmezését az 5.7. ábra szemlélteti. A külső, $f_{nyíró}$ nyíróerő hatására az anyagban τ nyírófeszültség keletkezik, mértékegysége N/m^2 , a deformációt a γ szögelfordulás fejezi ki, mértékegysége rad. A nyíró igénybevételnek megfelelő Hook-törvényt a következő összefüggés mutatja veszteségmentes anyagra:

$$\tau = G \cdot \gamma. \quad (5.9)$$

Az anyag belső vesztesége az előbbiekkal azonos módon értelmezhető, a komplex nyírási modulus



5.7. ábra. A nyírófeszültség és a nyírási modulus értelmezése



5.8. ábra. Vizsgálati elrendezés rugalmas lemezek nyírási modulusának meghatározására

e előterhelést létrehozó erő; b befogószerszám; r vizsgálandó rugalmas lemez; m rezgő tömeg; f_{ny} a rugalmas lemez nyíródeformációját létrehozó, a rezgő tömegre ható erő

lus és veszteségi tényező jelentése megfelel az előzőknek.

A szakmai gyakorlatban több módszer is van a nyírási modulus vizsgálatára. Egy példát mutat az 5.8. ábra. A nyomóterhelést nyomógép hozza létre, a mintát két rétegben kell behelyezni. A rezgőrendszer tömege ez esetben csak „rezgő tömeg”, a terhelés létrehozásában szerepe csekély. A nyíróirányú erőrezgés ismét a tömegre hat, a rugalmas lemezek nyíródeformációt szenvednek. A rezgőrendszer rezonanciafrekvenciája az (5.10) összefüggés szerint alakul, a kétszeres szorzónak az az oka, hogy a rendszerben két rugó jellegű elem szerepel, amelyek $s'_{nyí}$ merevsége összeadódik. A nyírási modulus és a fajlagos dinamikai nyírási merevség közötti kapcsolatot a (5.11) összefüggés adja:

$$f_{rez} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot s'_{nyí}}{m''}}; \quad (5.10)$$

$$G_{din} = h \cdot s'_{nyí}. \quad (5.11)$$

A lemez jellegű szerkezeti részekben léghang- vagy testhanggerjesztés hatására kialakuló hajlítóhullám, ami a hajlítódeformáció terjedése térben és időben, az elemi cellák nyomó- és húzódeformációjából tevődik össze. Mind a húzó-, mind a nyomódeformáció a nyomó igénybevétellel szemben mutatkozó dinamikai rugalmassági modulusal van kapcsolatban. Közvetlenül nem mérhető, meghatározása a különböző peremfeltételek között kialakuló hullámterjedés sajátosságai alapján lehetséges.

5.4. Szerkezetek fajlagos tömege

A szerkezetek fajlagos tömege fontos jellemző, ennek alapján többek között becsülhető a falak, földemek léghanggátlási száma, az úszópadlók szabványos lépéshangnyomásszint csökkenése, a szerkezeti csomópontok rezgégátlási száma vagy rezgés-szint-különbsége stb. Az m'' fajlagos tömeg egységnyi felületű szerkezet tömege, mértékegysége kg/m^2 . Többretegű szerkezetek esetén az egyes rétegek fajlagos tömegéből számítható. Üreges szerkezetek esetén a tényleges anyagmennyiséget kell figyelembe venni.

Általánosságban egy szerkezeti réteg fajlagos tömegét az (5.12) összefüggés adja meg, ha ismert a h vastagsága és $\rho_{\text{átlag}}$ átlagos sűrűsége:

$$m'' = \rho_{\text{átlag}} \cdot h. \quad (5.12)$$

5.5. Épületszerkezetek határfrekvenciája [IV.6]

Épületszerkezetek lemez jellegű összetevőiben – falszerkezet, ablak üvegtáblája, szerelt fal kéreglemeze stb. – léghang- vagy testhanggerjesztés hatására hajlítóhullám alakul ki. A hajlítóhullám a hajlítási deformáció tovaterjedése térben és időben.

A hajlítóhullám c_B , m/s terjedési sebessége az f , Hz frekvenciától, valamint a lemez ρ , kg/m^3 átlagos sűrűségétől, h , m vastagságától, dinamikai rugalmassági modulusától az E_{din} , N/m^2 -től és a μ Poisson-számtól függ az (5.13) összefüggés szerint. (A terjedési sebesség jelében a B index a német vagy angol hajlító szóra utal.)

$$c_B = \sqrt{2 \cdot \pi \cdot f} \cdot \sqrt[4]{\frac{E \cdot h^2}{\rho \cdot (1 - \mu^2)}}. \quad (5.13)$$

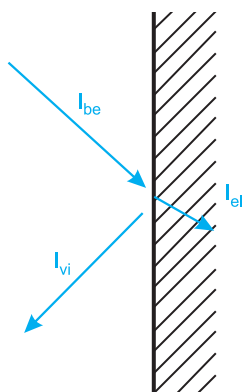
A lemez jellegű szerkezetek hangsugárzása – tehát az a tulajdonság, hogy a rezgőlemez milyen mértékben adja át teljesítményét a környező levegőnek – többi között attól függ, hogy a levegőben terjedő hang hullámhossza és a lemezben terjedő testhang – hajlítóhullám – hullámhossza hogyan viszonyul egymáshoz. Ha a hajlítóhullám hullámhossza rövidebb a léghang hullámhosszánál, akkor a sugárzás hatékonysága rossz, fordított esetben, tehát ha a hajlítóhullám hullámhossza nagyobb, mint a léghang hullámhossza, a sugárzás jó hatásfokú (1. részletesen a 4.3. alfejezetet). Ezért fontos a határhelyzet ismerete, azé a frekvenciáé, ahol a két hullámhossz megegyezik. E frekvenciát határfrekvenciának vagy koincidenciafrekvenciának nevezik, jele f_h , mértékegysége Hz:

$$f_h = \frac{c^2}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{1}{h} \sqrt{\frac{\rho \cdot (1 - \mu^2)}{E_{din}}}. \quad (5.14)$$

Az 1200 Hz feletti határfrekvenciájú szerkezeteket hajlékonyoknak, a 200 Hz alattiakat pedig merevnek tekintik. A legkedvezőtlenebb a 300–600 Hz határfrekvenciájú szerkezetek csoportja, ezek közepesen merevek.

5.6. Elemek hangelnyelési tényezője és egyenértékű hangelnyelési felülete [II.25]

Térhatároló szerkezetek felületére érkező hanghullám teljesítményt szállít. A hullám a szerkezet felületéről visszaverődik, tehát a szállított teljesítmény részben visszaverődik a térbe, részben – különbö-



5.9. ábra. Határolószerkezetek hangelnyelési tényezője

I_{be} a határolószerkezetre érkező hanghullám intenzitása;
 I_{vi} a visszavert hanghullám intenzitása; I_{el} az elnyelődő intenzitás

ző mechanizmusok során – behatol a szerkezetbe. A szerkezetbe bejutó hangteljesítmény a tér felől nézve elnyelődik.

Szerkezetek, elemek hangelnyelő, hangvisszaverő tulajdonsága többi között a hangelnyelési tényező fogalmával jellemezhető, l. az 5.9. ábrát és az (5.15)–(5.16) összefüggéseket.

A tér felől érkező hullám által szállított, egységni felületen áthaladó teljesítmény – intenzitás, I_{be} , Watt/m^2 , a visszavert hullám által szállított intenzitás, I_r , a határolószerkezetbe, elembe bejutó intenzitás pedig I_{el} . A teljesítménymegmaradás miatt:

$$I_{be} = I_r + I_{el}. \quad (5.15)$$

Az α hangelnyelési tényező meghatározása:

$$\alpha = \frac{I_{el}}{I_{be}}. \quad (5.16)$$

A hangelnyelési tényező elvileg 0–1 közötti értéket vehet fel, frekvenciafüggő, a határolószerkezet vagy -elem szerkezeti sajátosságaitól is függ. A hangvisszaverő elemek hangelnyelési tényezője kis értékű, 0,1 alatt van, a hangelnyelő szerkezetek, elemek hangelnyelési tényezője 0,8-nál nagyobb.

Kiterjedt szerkezetek és elemek hangelnyelési tulajdonságát az A , m^2 egyenértékű hangelnyelési felület jellemzi:

$$A = S \cdot \alpha; \quad (5.17)$$

ahol S a szerkezet, ill. elem felületének nagysága.

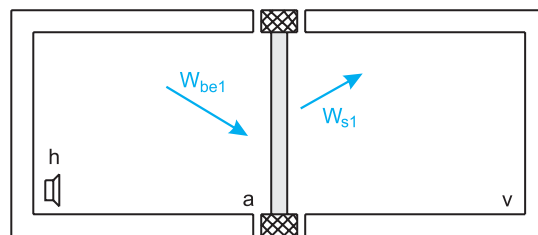
Mind a hangelnyelési tényező, mind az egyenértékű hangelnyelési felület frekvenciafüggő. Hagyományosan, a vizsgálati módszer miatt a 100 Hz–5000 Hz tercsávban, vagy a 125 Hz–4000 Hz oktávsvámban vizsgálják, de a nagyobb frekvenciák irá-

nyában minden további nélkül kiterjeszthető a vizsgálat. Miután frekvenciafüggő, szükséges az egyadatos mennyiség meghatározása is, ismertetése az 5.16. alfejezetben található.

5.7. Épületszerkezetek közvetlen léghanggátlási száma [II.11]

Falak, födémek, ablakok, ajtók, tetőszerkezetek és más szerkezetek léghangszigetelésére jellemző akusztikai mennyiség meghatározása érdekében olyan fogalmat és hozzá illeszkedő vizsgálati módszert vezettek be, amely alapvetően szerkezetjellemző, és a vizsgálóberendezés sajátosságai bizonyos határok között figyelembe vehetők. Az ismeretek fejlődése, valamint a jelenségek lehetőleg egyszerű leírása azt eredményezte, hogy a diffúz téri közelítéshez illeszkedő léghanggátlási szám vált általános termékjellemzővé.

A falak léghanggátlási számának meghatározására alkalmas elvi vizsgálati elrendezést az 5.10. ábra mutatja. A két, egymással vízszintesen szomszédos mérőhelyiséget – amelyek térfogata legalább 50 m^3 – legalább egy végigfutó dilatáció választja el egymástól. Az ábrán ettől eltérő, jobb megoldás szerepel: a két helyiség között, a vizsgálandó szerkezet rögzítésére – a gyakorlatban vasbetonból készült – keret található, amelyet a dilatációs hézag mindkét helyiségtől elválaszt. Ezért akusztikai teljesítmény csak a vizsgálandó szerkezeten keresztül jut egyik helyiségből a másikba. A valóságban ezt a körülményt többféle összetett szerkezeti megoldás hozza létre, az eredmény a laboratórium legnagyobb, mér-



5.10. ábra. Falak léghanggátlási számának értelmezése laboratóriumi körülmények között

h mesterséges hangforrás; a adóhelyiség, ahol a hangforrás található; v vevőhelyiség, ahol nincs hangforrás; W_{be1} a vizsgálandó épületszerkezet felületére beeső akusztikai teljesítmény; W_{s1} a vizsgálandó épületszerkezet által a vevő helyiségbe lesugárzott akusztikai teljesítmény

hető léghanggátlásában fejeződik ki.

Az egyik helyiségben, melyet hagyományosan adóhelyiségnek nevezünk, mesterséges hangforrás működik. A léghanggátlási szám R , a vizsgálandó, a két helyiséget elválasztó szerkezet felületére beeső

akusztikai teljesítmény W_{be1} és az elválasztószerkezet által a vevőhelyiségnek nevezett másik helyiségbe lesugárzott teljesítmény W_{s1} arányának tízszeres logaritmus, mértékegysége decibel (dB):

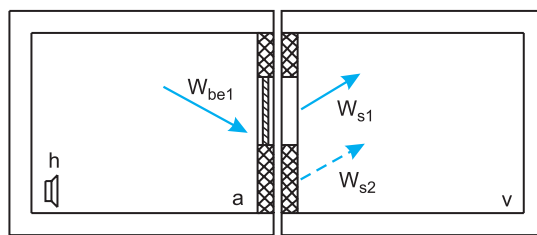
$$R = 10 \cdot \log \frac{W_{be1}}{W_{s1}}. \quad (5.18)$$

Frekvenciafüggő, a nagyobb számérték a jobb minőséget fejezi ki. Az elvi alsó határ 0 dB, ha a beeső és a lesugárzott teljesítmény megegyezik egymással. Az egyadatos mennyiségek értelmezése az 5.13. alfejezetben található.

Födémek léghangszigetelést kifejező akusztikai termékjellemzője szintén a léghanggátlási szám, értelmezése azonos a falakéval. A szerkezet beépítési síkja vízszintes, ez a laboratóriumi elrendezést módosítja, dilatációs hézag helyett az adó- és a vevőhelyiség között rugalmas elválasztások alkalmazandók.

Tetőszerkezetek léghangszigetelést kifejező akusztikai termékjellemzője szintén a léghanggátlási szám. A beépítésre vonatkozó szabályok nem alakultak ki, a már meglévő laboratóriumi elrendezések lehetőségei miatt a legcélszerűbb az, ha a laboratóriumi szerkezetbeépítés vízszintes síkban, tehát födémként történik. Az eredmények alkalmazhatósága szempontjából fontos körülmény a szellőzőcserepek beépítése: hőtani és páratechnikai okok miatt a tetőszerkezet rendszerének része a szellőzőcserepek alkalmazása; a szellőzőcserepek akusztikai szempontból szabad nyílások, amelyek a tömör tető léghanggátlását csökkentik.

Ablakok, ajtók léghangszigetelést kifejező termékjellemzője szintén a léghanggátlási szám. A szerkezetbeépítés elvi vázlata azért tér el a falakétól, mert az ablakok, ajtók mérete lényegesen kisebb, mint a két laborhelyiséget elválasztó felület (amely általában 8–16 m²). Ezért a két mérőhelyiség közé nagy hanggátlású kitöltő falat kell építeni, és ebben kell a vizsgálandó ablak, ajtó méreteinek és szerkezetének megfelelő nyílást kialakítani. A napjainkban általánosan alkalmazott hőszigetelő üvegezésű ablakokhoz egyenes falnyílás, míg például a kapcsolt gerébtokos ablakokhoz kávas nyílás tartozik. A vevőhelyiségbe a kitöltő fal is lesugároz akusztikai teljesítményt, ez okozza, hogy minden laboratórium működésének vannak felső és alsó korlátai. Az adott esetben az az igény, hogy az 5.11. ábrán W_{s2} -vel jelölt, a kitöltő fal által lesugárzott akusztikai teljesítmény lényegesen kisebb legyen, mint a vizsgálandó szerkezet által lesugárzott hangteljesítmény. Ha a két teljesítmény aránya 1/10-nél kisebb, akkor W_{s2} nem befolyásolja az



5.11. ábra. Ablakok, ajtók léghanggátlási számának értelmezése laboratóriumi körülmények között

Az 5.10. ábrán is látható jelölések megegyeznek; W_{s2} a két mérőhelyiséget elválasztó kitöltő fal által lesugárzott akusztikai teljesítmény, $W_{s1} \gg W_{s2}$

eredményt. A léghanggátlási szám meghatározásában a vizsgálandó szerkezetre beeső és az általa lesugárzott akusztikai teljesítmény szerepel, tehát az 5.11. ábra jelöléseivel W_{be1} és W_{s1} .

Az akusztikai teljesítmény hagyományos technikával közvetlenül nem mérhető. Ha a helyiségekben a hangtér diffúz jellegű, akkor a térbeli átlagos hangnyomás effektív értéke p_{eff} a térbeli átlagos intenzitás I , és a szerkezet S felületére beeső teljesítmény W_{be1} , vagy a szerkezet által lesugárzott teljesítmény W_{s1} között kölcsönös kapcsolat van, amit az (5.19) és (5.20) összefüggések mutatnak. A diffúz hangtérben a határolószerkezetek A eredő egyenértékű hangelnyelési felülete hozza létre az energiaegyensúly és az állandósult állapot kialakulásához szükséges veszteséget. Ezen két összefüggés felhasználásával a léghanggátlási szám mérhető akusztikai mennyiségek, az adótéri átlagos $L_{adó}$ hangnyomásszint, a vevőtéri $L_{vevő}$ átlagos hangnyomásszint, a vizsgálandó szerkezet S felülete és a vevőhelyiség A egyenértékű hangelnyelési felülete segítségével kifejezhető az (5.21) összefüggés szerint:

$$W_{be1} = \frac{p_{eff}^2}{\rho_L \cdot c} \cdot \frac{S}{4}; \quad (5.19)$$

$$W_{s1} = \frac{p_{eff}^2}{\rho_L \cdot c} \cdot \frac{A}{4}; \quad (5.20)$$

$$R = L_{adó} - L_{vevő} + 10 \cdot \lg \frac{S}{A_{vevő}}. \quad (5.21)$$

A léghanggátlási szám szigetelés jellegű akusztikai mennyiség, a jobb minőséget a nagyobb számérték fejezi ki. Függ a frekvenciától, hagyományosan a 100–3150 Hz frekvenciatartományban tercásvonként kell vizsgálni. Az utóbbi években a frekvenciatartományt kiterjesztik a kisfrekvenciák irányában (50 Hz-ig) és a nagyobb frekvenciák irányában (5000 Hz-ig). Megengedett az oktávsvonkénti vizsgálat is. A frekvenciafüggvényből egyadatos mennyiség képezhető (l. az 5.14. fejezetben).

5.8. Nehéz falak, födémek veszteségi tényezője [II.11], [IV.8]

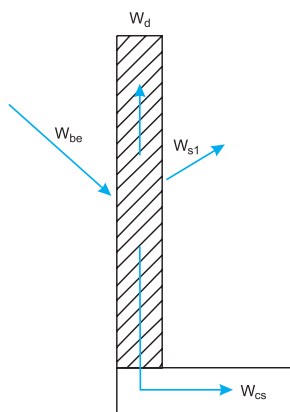
Nehéz falak, födémek – falazott, blokkos, előre gyártott, öntött – laboratóriumi körülményekre vonatkozó teljesítménymérlege szerint a léghanggerjesztés által bevitt akusztikai teljesítmény, W_{be1} részben lesugárzódik a vevőhelyiségbe, W_{s1} , részben a szerkezet anyaga által okozott veszteség miatt hővé alakul, W_d , részben pedig a szerkezetek közötti kapcsolat, csatolás miatt átjut a többi – laboratóriumi, ill. környező – épületszerkezetbe, W_{cs} . A csatolás révén a vizsgálandó szerkezetből távozó akusztikai teljesítményt értelmezhetjük úgy is, hogy az a peremek mentén elnyelődik. Ezt szemlélteti az 5.12. ábra is. A teljesítménymérleg a (5.22) összefüggés szerint alakul:

$$W_{be1} = W_{s1} + W_d + W_{cs}. \quad (5.22)$$

Ha az egymással kapcsolatban levő rezgőrendszerek között a csatolás nem szoros, tehát a gerjesztésre a gerjesztett rendszer nem hat vissza, a gerjesztett rendszerbe bevitt teljes teljesítmény a $\eta_{lát}$ látszólagos veszteségi tényező által kifejezett módon távozik e rendszerből, l. az (5.23) összefüggést. A veszteségi teljesítmény természetesen egyenesen arányos a szerkezet S felületével, m'' fajlagos tömegével, arányos az átlagos rezgése sebesség v_{eff} effektív értékének négyzetével, és függ az ω körfrekvenciától.

$$W_{be1} = \eta_{lát} \cdot \omega \cdot S \cdot m'' \cdot \bar{v}^2. \quad (5.23)$$

A látszólagos veszteségi tényezőt a teljesítménymérleg-egyenlet jobb oldalán szereplő összetevők



5.12. ábra. Teljesítménymérleg nehéz szerkezet laboratóriumi léghanggátlás-vizsgálata során

W_{be1} a vizsgálandó épületszerkezet felületére beeső akusztikai teljesítmény; W_{s1} a vizsgálandó épületszerkezet által a vevőhelyiségbe lesugárzott akusztikai teljesítmény; W_d a vizsgálandó szerkezet belső veszteségei miatt hővé alakuló, disszipálódó teljesítmény; W_{cs} a laboratóriumi beépítésben a vizsgálandó szerkezethez és az ezt befogadó laboratóriumi szerkezethez csatlakozó további épületszerkezetekbe távozó akusztikai teljesítmény

szerint η_{sug} sugárzási veszteségre, η_d belső veszteségre és η_{cs} csatolási veszteségre lehet bontani:

$$\eta_{lát} = \eta_d + \eta_{sug} + \eta_{cs}. \quad (5.24)$$

A nehéz szerkezetek léghanggátlási száma többi között veszteségi tényezőjüktől is függ, ebből a szempontból a csatolási veszteség a leginkább problematikus, mert ez a laboratórium ill. a helyszín sajátossága. E jelenség fontosságát kiemeli a körméről szóló [4.5] szakirodalom, amelyben az azonos homogén falszerkezet hanggátlásának a különböző laboratóriumokban elért mérési eredményeiről van szó.

A diffúz rezgési tér közelítésében a vizsgálati frekvenciasávokban sok, azonos sajátenergiájú rezonanciafrekvencia található, ezért a látszólagos veszteségi tényezőt a fal lecsengési idejéből frekvenciasávonként lehet meghatározni az (5.8) összefüggés szerint. A falat erőimpulzussal vagy rázóasztallal létrehozott folyamatos erővel kell rezgésbe hozni.

5.9. Elválasztó- és átmenő szerkezetek szabványos hangnyomásszint-különbsége

Az épületszerkezetek és -elemek egy részének felülete nem határozható meg egyértelműen. A szerkezet látszólagos felületméretei, ill. a hangterjedésben ténylegesen szerepet játszó részek méretei különbözőek (ablak-szellőzőelemek, légáteresztő nyílások, csőáttörés-lezárások stb.). Ilyen kisméretű, vagy bizonytalan méretű elemek léghangszigetelését a szabványos hangnyomásszint-különbség fejezi ki. Fizikai tartalma úgy is magyarázható, hogy a szerkezethez 10 m^2 névleges hangsugárzó felületet rendeltek, de úgy is, hogy az adó- és a vevőhelyiség között kialakuló hangnyomásszint-különbséget 10 m^2 egyenértékű hangelnyelési felületre korrigálják. A szabványos hangnyomásszint-különbséget D_n jelöli, mértékegysége decibel (dB):

$$D_n = L_{ad\acute{o}} - L_{vev\acute{o}} + 10 \cdot \lg \frac{10}{A_{vev\acute{o}}}. \quad (5.25)$$

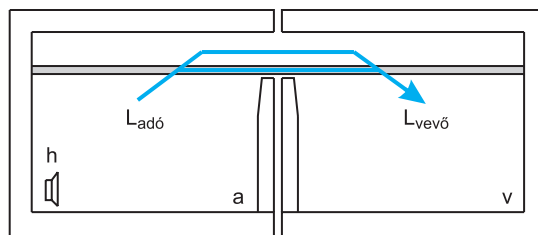
A jelölések ugyanazok, mint az (5.21) összefüggésben. A szabványos hangnyomásszint-különbség szintén frekvenciafüggő, az egyadatos mennyiség meghatározásáról az 5.14. alfejezetben lesz szó. A szabványos hangnyomásszint-különbség és a léghanggátlási szám kölcsönösen átszámíthatók:

$$R = D_n + 10 \cdot \lg \frac{S}{10}. \quad (5.26)$$

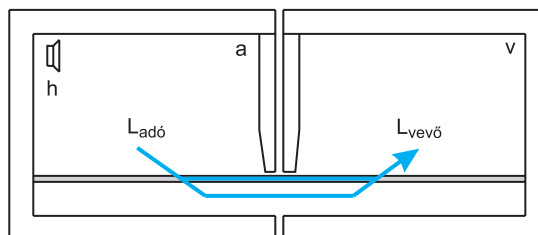
A kisméretű elemek szabványos hangnyomásszint-különbségének laboratóriumi meghatározása az ablakok léghanggátlásának meghatározásával azonos elven történik. A két helyiséget (adó- és vevő-) elválasztó, a vizsgálandó elemhez képest sokkal nagyobb hangszigetelésű kitöltő falban kell elhelyezni az elemeket. A megvalósítás többi között azért nehéz, mert ha a nagy hanggátlású kitöltő fal vastag, akkor az a hangtér felől leárnýékolhatja a vizsgálandó elemet. A helyszíni hangszigetelés számításához pontosabb eredményt ad, ha az elem helyét a kitöltő falban minőségileg a helyszíni körülményeknek megfelelően jelölik ki.

Kerülőutas hangterjedést létrehozó elemek (átmenő belső vagy homlokzati fal, álmennyezet, álpadló stb.) egy részében közvetett léghang- és közvetett testhangterjedés egyaránt kialakulhat. Ezt különösen szerelt szerkezetek elemzése során figyelhetjük meg. A tapasztalatok szerint az átmenőszerkezetben kialakuló közvetett hangterjedés a két helyiséget elválasztó szerkezet (válaszfal és födém) csatlakozásánál kialakuló szerkezeti csomópont részleteitől is erősen függ. Ezért az átmenőszerkezeteken keresztül vezető közvetett hangterjedés akusztikai minőségének – részben már nemzetközi és nemzeti szabványokban is megjelent, részben jelenleg kidolgozás alatt levő dokumentumokban található – kísérleti meghatározására a szerkezet fajtájától függően többféle laboratóriumi elrendezés alakult ki. A vizsgálat és a fogalmak azonos elméleti alapon, a diffúz hangtér és rezgési tér közelítésén alapulnak. A hangátvitelt általában a szabványos hangnyomás-szintkülönbséggel jellemzik, amelyet az (5.25) összefüggés határoz meg. A laboratóriumi helyiség és a szerkezetbeépítés méretei átlagos lakószoba vagy tanterem, vagy iroda méreteinek felelnek meg, így a közvetett hangterjedést befolyásoló helyszíni méretek hatása a laboratóriumi méretekből átszámítható. Az ábrákon a jellemző hangterjedési irányok is megfigyelhetők. A laboratóriumi elrendezések vázlatait az 5.13. ábra [II.17], az 5.14. ábra [II.19] és az 5.15. ábra [II.27] szemlélteti.

Mindhárom esetben a két mérőhelyiséget nagy hanggátlású elválasztószerkezet – fal vagy födém – választ el egymástól. A két helyiség szerkezeti értelemben egymástól független, nincs csatolva egymáshoz, amit például dilatációs hézagokkal, ill. rugalmas megtámasztásokkal lehet megvalósítani. Az álmennyezet feletti és az álpadló alatti tér méretei, ill. az e térben elhelyezhető további elemek a vizsgálandó szerkezet sajátosságaitól függenek. Átmenőfal beépítése során a nagy hanggátlású elválasztó-



5.13. ábra. Álmennyezet szabványos hangnyomásszint-különbségének értelmezése
 a , h , v jelentése azonos az 5.10. ábránál szereplő jelentéssel;
 $L_{adó}$ az adóhelyiség átlagos hangnyomásszintje,
 $L_{vevő}$ a vevőhelyiség átlagos hangnyomásszintje



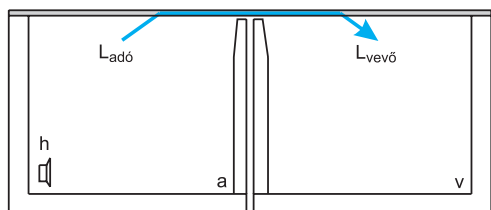
5.14. ábra. Álpadló szabványos hangnyomásszint-különbsége
A jelölések megegyeznek az 5.13. ábra jelöléseivel;

szerkezet – a valóságos kapcsolatok miatt – egyúttal e kapcsolatot is modellezi.

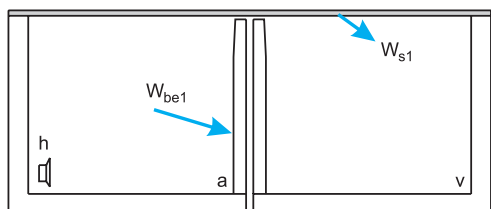
A szabványos hangnyomásszint-különbség szigetelés jellegű mennyiség, a jobb szigetelést, tehát a jobb minőséget a nagyobb számérték adja meg. Függ a frekvenciától, hagyományosan a 100–3150 Hz frekvenciatartományban tercsávonként kell vizsgálni. Az újabb szabványosítás, azaz pl. az ISO 140 és az ISO 717 szabványsorozat a frekvenciatartományt kiterjesztette mind a kisfrekvenciák (50 Hz-ig), mind a nagyfrekvenciák irányában (5000 Hz-ig). Megengedett az oktávskávonkénti vizsgálat is. A frekvenciafüggvényből egyadatos mennyiség képezhető, erről az 5.14. alfejezetben lesz szó.

5.10. Átmenőszerkezetek hosszirányú léghanggátlási száma [II.27]

Átmenőszerkezetek hosszirányú hangátvitelének jellemzésére az előzőekben ismertetett laboratóriumi elrendezéseken kívül más mennyiséget is alkalmaznak, ez az R_L hosszirányú léghanggátlási szám, mértékegysége decibel (dB). Szabványos méretezési módszerekben is szerepel, ezért indokolt, hogy ismertetéssük. Az elvi laboratóriumi elrendezés azonos az 5.15. ábrán láthatóval, a definíciót az 5.16. ábra és az (5.27) képlet fejezi ki. A W_{be1} beeső teljesítmény értelmezése első pillanatra szokatlan, nem a vizsgálandó, átmenőszerkezet felületére, hanem



5.15. ábra. Átmenőfal, -födém szabványos hangnyomásszint-különbsége
A jelölések megegyeznek az 5.13. ábra jelöléseivel



5.16. ábra. Átmenőfal, -födém hosszirányú léghanggátlási száma
 a , v mint a korábbi ábráknál; W_{be1} a két mérőhelyiséget elválasztó laboratóriumi szerkezetre beeső akusztikai teljesítmény; W_{s1} a vizsgálandó, átmenő szerkezet által a vevőhelyiségbe lesugárzott akusztikai teljesítmény

a laboratóriumhoz tartozó, az adó- és vevőhelyiséget elválasztó szerkezetre beeső teljesítményt jelenti. Ez a meghatározás a későbbiekben kissé egyszerűbb alakú összefüggésekre vezet. A vevőhelyiségbe átjutó W_{sL} teljesítményt az átmenőszerkezet sugározza le:

$$R_L = 10 \cdot \lg \frac{W_{be1}}{W_{sL}}. \quad (5.27)$$

Tekintettel arra, hogy a vizsgálati elrendezés – a laboratóriumi építmény – méretei ismertek, egy szerkezet hosszirányú léghanggátlási száma és szabványos hangnyomásszint-különbsége közvetlenül átszámítható egymásba:

$$D_n = R_L + 10 \cdot \lg \frac{10}{S_L}. \quad (5.28)$$

A tényleges vizsgálat során a diffúz hangtér közelítését alkalmazva a kiszámítás azonos lesz a közvetlen léghanggátlási számmal már ismertetett (5.21) összefüggéssel.

A hosszirányú léghanggátlási szám a szerkezetek közvetlen léghanggátlási számához hasonlóan szigetelés jellegű akusztikai mennyiség. Ez azt jelenti, hogy a jobb minőséget a nagyobb számérték tükrözi. Függ a frekvenciától, hagyományosan a 100–3150 Hz frekvenciatartományban tercsávonként kell vizsgálni. Újabban a frekvenciatartományt kiterjesztették mind a kisfrekvenciák (50 Hz-ig), mind a nagyfrekvenciák irányában (5000 Hz-ig).

Megengedett az oktávsvonkénti vizsgálat is. A frekvenciafüggvényből egyadatos mennyiség képezhető, erről l. az 5.14. fejezetet.

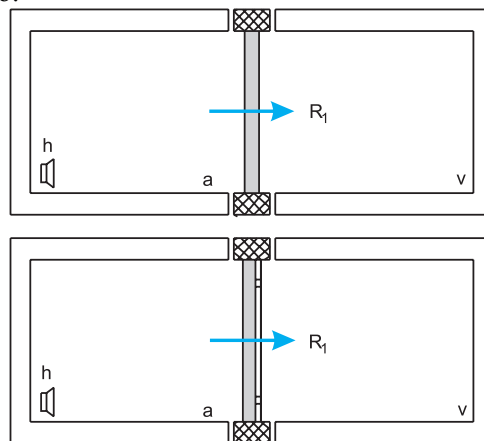
5.11. Burkolatok léghanggátlás-javítása

A kiegészítő szerkezetek, pl. a falburkolat, a szárazvakolat, az álmennyezet stb. javíthatják az alapszerkezet léghanggátlását. A viszonyítási alap az alapszerkezet léghanggátlása. Mind a gyakorlati tervezésben, mind a modellezésben további kiindulási feltétel, hogy a burkolat nem hat vissza az alapszerkezetre, nem befolyásolja annak akusztikai működését. E feltételek vezettek a fogalom – és vizsgálati módszer – megalkotásához.

Első lépésben meg kell határozni a viszonyítási alapszerkezet R_1 léghanggátlási számát. Az alapszerkezet a burkolathoz képest merev, nagy tömegű homogén, tömör falazat vagy födém, fajlagos tömege legalább 200 kg/m². Ezután a vizsgálandó burkolatot, a kiegészítő szerkezetet fel kell építeni az alapszerkezet egyik oldalára. A keletkezett összetett szerkezet léghanggátlási száma R_2 . A burkolat hatását a ΔR léghanggátlásiszám-javítás fejezi ki:

$$\Delta R = R_2 - R_1. \quad (5.29)$$

A vizsgálati elrendezés vázlata az 5.17. ábrán látható.



5.17. ábra. Burkolat léghanggátlás-javítása

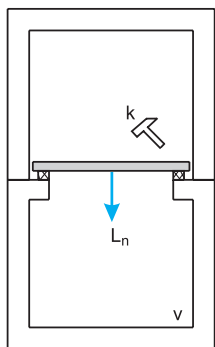
a , v , h a jelölések a korábbi ábrákkal azonosak;
 R_1 a burkolat nélküli laboratóriumi szerkezet léghanggátlási száma;
 R_2 a vizsgálandó burkolattal ellátott szerkezet léghanggátlási száma

A ΔR frekvenciafüggő, hiszen mind az alapszerkezet, mind a burkolattal ellátott összetett szerkezet léghanggátlási száma függ a frekvenciától. (Az egyadatos mennyiség értelmezéséről l. az 5.14. fejezetet.) A léghanggátlási szám javítása szigetelés jellegű mennyiség, a jobb minőséget a nagyobb számérték tükrözi.

5.12. Födémek szabványos lépéshangnyomásszintje [II.14]

Az épületek rendeltetésszerű használata során a födémeket érő másik akusztikai terhelés többi között a járkálástól, bútortologatástól származik, ez a lépéshangerterhelés. Ekkor a födém felületét erőimpulzusok érik, amelyek rezgésbe hozzák a szerkezetet. A rezgés az alsó helyiségben a hangsugárzás miatt léghangot kelt.

A jelenség modellezése, azaz a szerkezetvizsgálat során az erőimpulzusokat ún. kopogógép állítja elő. Ez mechanikus szerkezet egy sorban levő 5 db, egyenként 0,5 kg tömegű kalapácsból, amelyek 10 Hz ismétlődési frekvenciával 4 cm magasról szabadon esnek le a vizsgálandó szerkezet felületére. A működtetőmechanizmus a kalapács visszapattanását követően visszaemeli a kalapácsfejeket az alaphelyzetbe. A vevőhelyiségben a hangnyomás-szint részben a szerkezet lépéshang-szigetelésétől, részben a frekvenciától, részben a vevőhelyiség egyenértékű hangelnyelési felületétől függ. Ez utóbbi nem szerkezet jellemző, ezért a kopogógép működése során keletkező lépéshangnyomásszint-értékét korrigálni kell 10 m² egyenértékű hangelnyelési felületre. A vizsgálati elrendezésben, amely az 5.18. ábrán látható, meg kell oldani azt is, hogy csak az elválasztó szerkezet – jelen esetben a födém – sugározzon hangot az alsó helyiségbe, ennek érdekében a födém rugalmas megtámasztással rögzítik, és szükség esetén a vevőhelyiség falát hanggátlást javító falburkolattal látják el.



5.18. ábra. Födém szabványos lépéshangnyomásszintje
v vevőhelyiség; k kopogógép; L_n a vevőhelyiségben kialakuló szabványos lépéshangnyomásszint

A szabványos lépéshangnyomásszint:

$$L_n = L + 10 \cdot \lg \frac{A}{10}, \quad (5.30)$$

ahol L a lépéshangnyomásszint; A a vevőhelyiség egyenértékű hangelnyelési felülete. Az egyadatos mennyiségről az 5.15. alfejezetben lesz szó.

A szabványos lépéshangnyomásszint mint akusztikai mennyiség hangnyomásszint jellegű, tehát a jobb minőséget a kisebb számérték fejezi ki.

5.13. Padlóburkolatok szabványos lépéshangnyomásszintjének csökkenése [II.16]

A padlóburkolatok – ragasztott szőnyeg vagy pvc-burkolat, kőburkolat, úsztatott födém szerkezet stb. – a burkolattól függően megváltoztathatják az alapszerkezet, tehát a burkolatlan födém szabványos lépéshangnyomásszintjét. A viszonyítás alapja az alapszerkezet szabványos lépéshangnyomásszintje. Mind a gyakorlati tervezésben, mind a modellezésben további kiindulási feltétel az, hogy a burkolat nem hat vissza az alapszerkezetre, nem befolyásolja annak akusztikai működését. E feltételek vezettek a fogalom – és a vizsgálati módszer – megalkotásához.

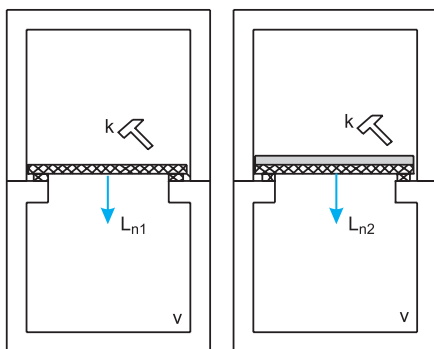
Első lépésben meg kell határozni a viszonyítási alapként felhasznált födém szabványos L_{n1} lépéshangnyomásszintjét. Az alapszerkezet a burkolathoz képest merev nagy tömegű homogén, tömör monolit vasbeton födém, vastagsága 14–16 cm. Ezután a vizsgálandó burkolatot kiegészítő szerkezetet kell felépíteni. A keletkezett összetett szerkezet szabványos lépéshangnyomásszintje: L_{n2} . A burkolat hatását a ΔL_n szabványos lépéshangnyomásszint-csökkenés fejezi ki:

$$\Delta L_n = L_{n1} - L_{n2}. \quad (5.31)$$

A szabványos lépéshangnyomásszint-csökkenés szigetelés jellegű akusztikai mennyiség, tehát a jobb minőséget, a jobb szigetelést a nagyobb számérték fejezi ki.

Az építési gyakorlatban sok országban alkalmazott könnyűszerkezetes vázas épületek födém szerkezetei kis fajlagos tömegűek, a kéreglemezek hajlékonyak. A padlóburkolatok befolyásolják az alapszerkezet működését, ezért a nehéz etalon födém alkalmazásával meghatározott szabványos lépéshangnyomásszint-csökkenés adatai ilyen esetekben a tervezéshez nem alkalmazhatók. Napjainkban folyik a vizsgálati módszer kiegészítése e probléma megoldásáról.

A nehéz, merev etalon födémre alapuló vizsgálati elrendezés vázlata az 5.19. ábrán látható. A vizsgálat elvének egy további lényeges eleme a burkolat felületének nagysága. Szőnyegpadló, pvc-burkolat vizsgálata során az etalon födémre elegendő több kisebb felületű mintát elhelyezni. A minták felületét



5.19. ábra. Padlóburkolat szabványos lépéshangnyomásszint-csökkenése

L_{n1} a burkolatlan földem szabványos lépéshangnyomásszintje;
 L_{n2} a burkolattal ellátott földem szabványos lépéshangnyomásszintje;

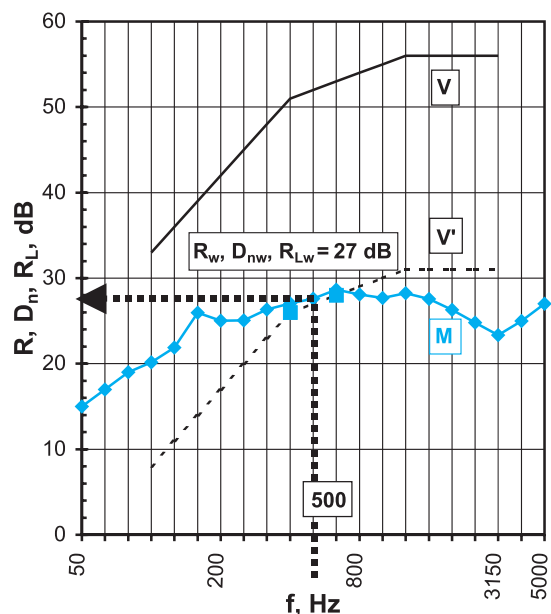
úgy kell megválasztani, hogy azokon a kopogógép elhelyezhető legyen. Úsztatott szerkezet, száraz esztrich vizsgálatok azonban a teljes etalon földem-felületre el kell készíteni a vizsgálandó burkolatot.

A ΔL_n frekvenciafüggő, hiszen mind az alapszerkezet, mind a burkolattal ellátott földem szabványos lépéshangnyomásszintje függ a frekvenciától. Az egyadatos mennyiség értelmezéséről az 5.15. alfejezetben lesz szó.

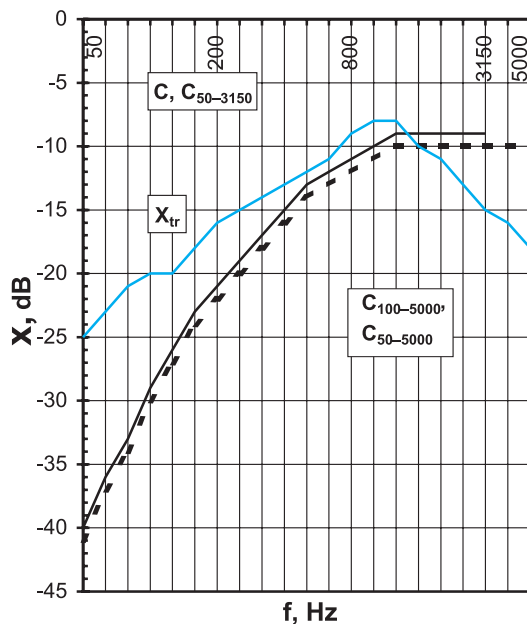
5.14. Egyadatos mennyiségek a léghangszigetelés értékelésére [II.20]

Az építési termékek (fal, földem, tető, ablak, ajtó, kisméretű elem, álmennyezet, álpadló, kerülőutas hangátvitelt létrehozó szerkezetek) léghangszigetelésére jellemző termékjellemző vagy az R léghanggátlási szám, vagy a szabványos D_n hangnyomásszint-különbség. A hosszirányú léghanggátlási szám, R_L korábban gyakran szerepelt, külföldi szabványokban ma is előfordul. Mindhárom frekvenciafüggő, ezért számos ok miatt szükség van egyadatos mennyiségre is. Az egyadatos mennyiség meghatározásának Európában elterjedt módja a 100–3150 Hz frekvenciasávban tercsávonként végzett vizsgálatok értékelését adja meg, az előbb említett mindhárom mennyiségre. Kialakulása a lakások közötti hangszigetelés megfelelő mértékéhez kapcsolódik, de ma már – újabban kiegészítésekkel – minden épületszerkezet esetében alkalmazzák. Az értékelés grafikus karakterű, matematikai tartalma görbe illesztés, de nem a szokásos feltételek szerint (5.20. ábra).

Az értékelés alapja az ún. vonatkoztatási görbe, amelyet az 5.20. ábrán a V folytonos vonal szemléltet. A görbe frekvenciafüggő értékeit nemzeti és



5.20. ábra. Épületszerkezetek léghangszigetelésének egyadatos mennyiségei



5.21. ábra. Színképilestítési tényezők

nemzetközi szabványok adják meg. Az M görbe egy épületszerkezet hangszigetelési jellemzője, ez mérési vagy számítási eredmény. Az egyadatos mennyiség meghatározása érdekében a vonatkoztatási görbét önmagával párhuzamosan úgy kell eltolni, hogy az eltolt vonatkoztatási görbe, jele V' legjobban illeszkedjen a mérési eredményhez. A legjobb illeszkedés feltételét az (5.32a) egyenlet fejezi ki, ahol δ_i^- a mérési eredmény és az eltolt vonatkoztatási görbe közötti kedvezőtlen értelmű eltérés az i -edik tercsávban az (5.32b) képlet szerint. Tekintet-

tel arra, hogy a szigetelés jellegű mennyiségeknél a rosszabb minőséget a kisebb számérték jelenti, a kedvezőtlen értelmű eltérés akkor keletkezik, ha a vizsgálati eredmény kisebb, mint az eltoltsági helyzeti vonatkoztatási görbe

$$1 \leq \frac{\sum_{i=1}^{16} \delta_i^-}{16} \leq 2; \quad (5.32a)$$

$$\delta_i^- = \begin{cases} R_{M,i} - R_{V,i} > 0; \text{ akkor } 0; \\ \text{egyébként } R_{V,i} - R_{M,i} \end{cases} \quad (5.32b)$$

A vonatkoztatási görbét 1 dB-es lépésekben kell eltolni az illeszkedési helyzet eléréséig. Az (5.32) szerinti feltételt nem egy esetben több görbe helyzet, tehát az eltolás többféle értéke is teljesíti, ilyenkor általában a legjobb minőséget kifejező helyzet adja a végeredményt. A végeredmény az eltoltsági vonatkoztatási görbe 500 Hz-es értéke. Léghanggátlási szám vizsgálata esetén súlyozott léghanggátlási számnak nevezik, jele R_w . Szabványos hangnyomásszint-különbség vizsgálat esetén az egyadatos mennyiséget súlyozott szabványos hangnyomásszint-különbségnek nevezik, jele D_{nw} . Ha az eredmény a hosszirányú léghanggátlási szám, az egyadatos mennyiség a súlyozott hosszirányú léghanggátlási szám, jele R_{Lw} . Mindháromnak decibel a mértékegysége.

A helyszíni hangszigetelés frekvenciafüggő eredményeinek (látszólagos léghanggátlási szám, R' , utószigetelési időre normalizált hangnyomásszint-különbség, D_{nT} , homlokzat látszólagos léghanggátlási száma, R'_{45} , R'_{tr} stb.) egyadatos mennyiségét szintén az előzők szerint értelmezzük.

Az újabb szabványokban vonatkoztatási görbét vezettek be az oktávsváros hangszigetelési eredmények értékelésére is. Az oktávsváros vonatkoztatási görbe értékei megegyeznek a tercsávós vonatkoztatási görbe azonos frekvenciájú értékeivel.

A vonatkoztatási görbét alkalmazó értékelési módnak több hiányossága van. A legfontosabb gyakorlati probléma alapja a következő. Elfogadva, hogy az épületek helyiségeiben kialakuló zaj zavaró hatását az A hangnyomásszint jellemzi, az értékelés során azt is figyelembe kell venni, hogy a zaj ellen védendő épületszerkezetet többféle, a szerkezet helyétől függő zaj terheli. A homlokzatra a közlekedési zaj által okozott terhelés a jellemző, de ez közúti közlekedéstől, légi és vasúti közlekedéstől, üzemi és építési tevékenységtől egyaránt származhat. Időbeli lefutásuk különböző, amit az A hangnyomásszint idő szerinti átlagolásával vagy a hang-

jelenségek szakaszolásával ellensúlyozhatunk. Frekvenciafüggésük szintén különbözik, ezt azonban a vonatkoztatási görbe nem veszi figyelembe. Tehát egy határolószerkezet a különböző jellegű terhelő zajokra eltérő mértékű védelmet eredményez. Egy más nézőpontú állítás is igaz: az azonos súlyozott léghanggátlási számú szerkezetek azonos terhelő zajjal szemben eltérő szigeteléssel rendelkeznek. Ha a vizsgálódás a belső határolószerkezetekre is kiterjed, amelyek többi között a lakás, irodai helyiség vagy tanterem rendeltetésszerű használata során keletkező használati zaj elleni védelmet teremtik meg, az azonos egyadatos mennyiséggel értékelt szerkezetek mind egymáshoz képest, mind az épületen kívüli zajokhoz képest lényegesen eltérő minőségű védelmet eredményeznek. A legjellegzetesebb eltérések a könnyűszerkezetes és a nehézszerkezetes falazatok között jelentkeznek.

A napjainkban a nemzetközi szabványokban tükröződő megoldást az ún. színeképillesztési tényezők bevezetése jelenti. Meghatározásuk a valóságos jelenségek nyomkövetésén alapul.

Az értékelendő épületszerkezet felületének és a vevőhelyiség egyenértékű hangfelnyelési felületének aránya legyen 1. A szerkezetet terhelő zaj sávhangnyomásszintje az i -edik frekvenciasávban L_{ri} , amelyet a relatív referencia-összetevőből (L'_{ri}) és a frekvencia-jelleggörbe állandó eltolását kifejező tagból, δ tesznek össze. Így az adóoldali terhelő sávhangnyomásszint az (5.33) összefüggés, a vevőoldali terhelő sávhangnyomásszint az (5.34) összefüggés szerint alakul. A mérési frekvenciák száma többféle lehet, ami a frekvenciatartomány kiterjesztésének eredménye:

$$L_{1i} = L'_{ri} + \delta; \quad (5.33)$$

$$L_{2i} = L'_{ri} + \delta - R_i. \quad (5.34)$$

A relatív spektrum A súlyozású értékeit az egyszerűség kedvéért X_i jelöli.

$$X_i = L'_{ri} + A_i. \quad (5.35)$$

Az adó oldali (1. index) és a vevő oldali (2. index) A hangnyomásszintet az (5.36) és (5.37) összefüggések fejezik ki.

$$L_{1A} = \delta + 10 \cdot \lg \left(\sum_i 10^{0,1 \cdot X_i} \right) \quad (5.36)$$

$$L_{2A} = \delta + 10 \cdot \lg \left(\sum_i 10^{0,1 \cdot (X_i - R_i)} \right) \quad (5.37)$$

Az adóoldali A hangnyomásszint és a szerkezet súlyozott léghanggátlási száma közötti különbség a vevőoldali A hangnyomásszintet adja meg egy C korrekciós tényező figyelembevételével. δ értéke elvileg tetszőlegesen felvehető, a [II.20] szabvány úgy állapítja meg, hogy az (5.36) összefüggésben szereplő összegzési tag értéke 0 legyen. Így a C értéke:

5.1. táblázat. Terhelő zajok, szinképpillesztési tényezők

Zajforrások, zajok	Szinképpillesztési tényező
Rendeltetésszerű lakáshasználat (társalgás, zenehallgatás, gyerekjáték stb.) Közepes és nagy sebességű vasúti közlekedés Közúti közlekedés autópályán, $v > 80$ km/h Sugárhajtásos repülőgép közelről Közepes és nagyfrekvenciás üzemi zaj	C rózsazaj
Közúti közlekedés Kis sebességű vasúti közlekedés Légcsavaros légi közlekedés Sugárhajtásos repülőgép távolról Diszkózene Kis- és közepes frekvenciás üzemi zaj	C_{tr} közúti közlekedési zaja

$$-10 \cdot \lg \left(\sum_i 10^{0,1 \cdot (X_i - R_i)} \right) - R_w = C. \quad (5.38)$$

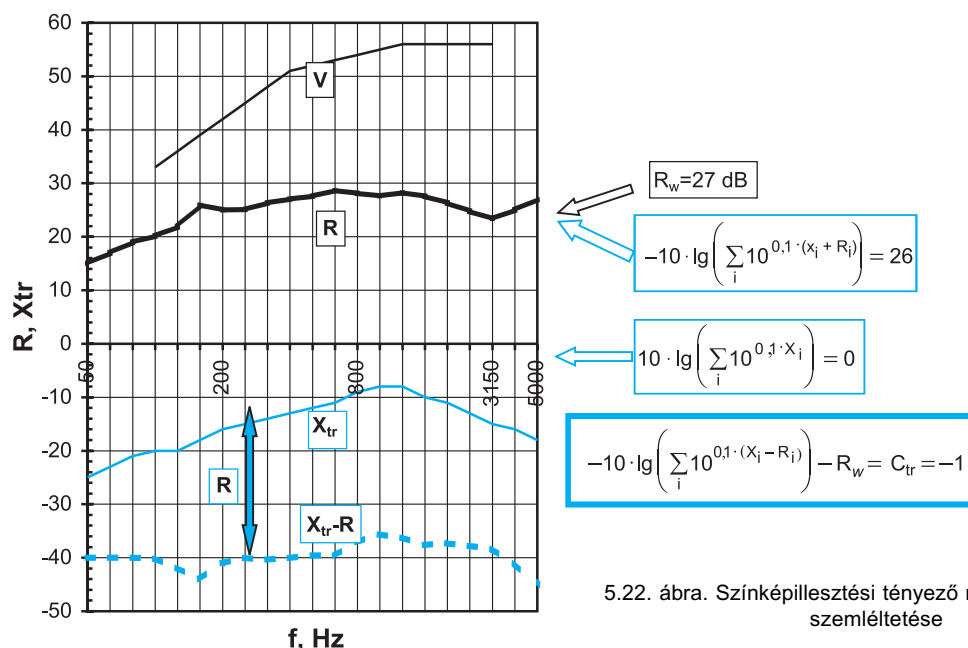
A C tényezőt szinképpillesztési tényezőnek nevezik, értéke részben attól függ, hogy a referenciaspektrum milyen jelenséghez kapcsolódik, részben pedig attól, hogy hány frekvenciasávot kell figyelembe venni. A már hivatkozott szabvány a sokféle külső és belső környezeti zajhoz kétféle referenciaspektrumot rendel, az A súlyozású rózsazajt és a közlekedési zajt. Az A súlyozású rózsazaj alkalmazásával keletkezik C , a közlekedési zaj alkalmazásával pedig C_{tr} . Az alapértékelésen kívül (100–3150 Hz tercsávokat átfogó tartomány) a rózsazajhoz két további frekvenciatartomány tartozik: az 50–3150 Hz és a 100–5000 Hz. Ezenkívül lehetséges az oktávsávú értékelés is. Így a korábbi nemzetközi és a jelenleg is érvényes

egyik magyar szabványban [II. 28] szereplő egyadatos értékelés helyett a léghangszigetelés súlyozott értékelése pl. léghanggátlási szám vizsgálat esetén a következő lesz: $R_w(C, C_{tr}) = 42(0; -4)$.

A kétféle spektrumot, tehát a kétféle szinképpillesztési tényezőt a különböző terhelő zajok, zajforrások függvényében az 5.1. táblázat szerint kell használni.

Amennyiben a mérés, számítás eredménye más hangszigetelési jellemző, termékjellemzőként pl. D_n , helyszíni eredményként pl. R' az eljárás azonos az előzőekkel.

A teljes értékelési folyamatot az 5.22. ábra mutatja egy konkrét számpéldán. A mérési eredmény az ábra R görbéje, amelynek súlyozott léghanggátlási száma $R_w = 27$ dB. A közlekedési zaj spektrumát alkalmazva az A súlyozású referenciaspektrum jele X_{tr} . A vizsgálati eredménnyel csökkentett



5.22. ábra. Szinképpillesztési tényező meghatározásának szemléltetése

görbe az X_{tr} -R. Mindhárom a frekvencia függvénye. Az összegzések az ábra szélén láthatók, a példában a C_{tr} szinképpillesztési tényező -1 .

Kiegészítő szerkezetek – álmennyezet, falburkolat stb. – léghangszigetelést javító hatására jellemző egyadatos mennyiség a ΔR_w súlyozott léghanggátlás-javulás:

$$\Delta R_w = R_{w2} - R_{w1}, \quad (5.39)$$

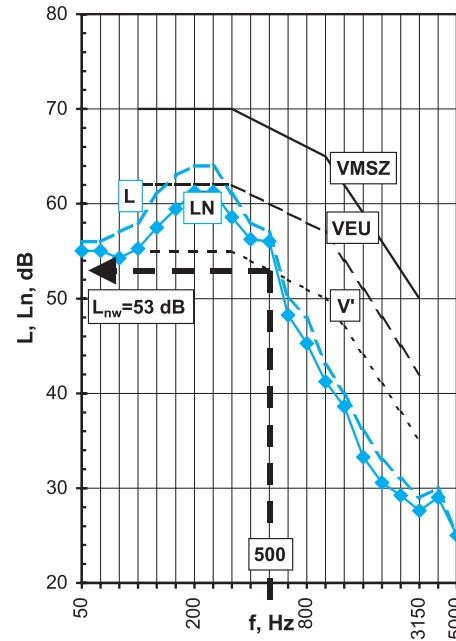
ahol R_{w2} a burkolattal ellátott alapszerkezet; R_{w1} a burkolatlan alapszerkezet súlyozott léghanggátlási száma.

5.15. Egyadatos mennyiségek a lépéshang-szigetelés értékelésére [II.21]

A burkolatlan és burkolt födémek lépéshang-szigetelését kifejező termékjellemző a szabványos L_n lépéshangnyomásszint. Frekvenciafüggő, ezért számos ok miatt szükség van egyadatos mennyiségre is. Az egyadatos mennyiség megadásának Európában elterjedt módja a 100–3150 Hz frekvenciasávban tercsávonként végzett vizsgálatok értékelését adja meg. Kialakulása a lakások közötti lépéshang-szigetelés megfelelő mértékéhez kapcsolódik, korábban csak az oktávsváos vizsgálatok értékelésére korlátozódott. Az értékelés kissé grafikus karakterű, matematikai tartalma görbe illesztés, de nem a szokásos feltételek szerint (5.23. ábra).

Az ábrán az LN görbe a szabványos lépéshangnyomásszint vizsgálati eredménye. Két vonatkoztatási görbe látható, a VMSZ a [II.28], a VEU pedig a [II.21]-ben van meghatározva, ezek egymással párhuzamosak, tehát frekvenciafüggésük azonos tendenciájú. Bármelyik vonatkoztatási görbét önmagával párhuzamosan, 1 dB-es lépésekben addig kell eltolni, míg a legjobban illeszkedik a vizsgálati eredményhez. A legjobb illeszkedési feltétel az (5.40) összefüggés, ahol δ_i^- az i -edik tercsávban kialakuló, a mérési eredmény és az eltoltt helyzetű vonatkoztatási görbe közötti kedvezőtlen értelmű eltérést jelenti. A szabványos lépéshangnyomásszint hangnyomásszint jellegű mennyiség, ahol a rossz-szabb minőséget a nagyobb számérték fejezi ki. Ezért az eltoltt helyzetű vonatkoztatási görbéhez képest a kedvezőtlen értelmű eltérés akkor keletkezik, ha a vizsgálati eredmény nagyobb számértékű.

$$1 \leq \frac{\sum_{i=1}^{16} \delta_i^-}{16} \leq 2. \quad (5.40)$$



5.23. ábra. Szabványos lépéshangnyomásszint, szinképpillesztési tényező

L lépéshangnyomásszint, LN szabványos lépéshangnyomásszint; $VMSZ$ az [II.28] szabvány szerinti vonatkoztatási görbe; VEU a [II.21] szabvány szerinti vonatkoztatási görbe; V^* az eltoltt helyzetű vonatkoztatási görbe

A végeredmény, azaz az értékelés az eltoltt helyzetű, V' vonatkoztatási görbe 500 Hz-es értéke, neve laboratóriumi vizsgálat esetén súlyozott szabványos lépéshangnyomásszint, L_{nw} , helyszíni vizsgálat esetén pedig súlyozott helyszíni szabványos lépéshangnyomásszint, L'_{nw} . Mértékegységük a dB. Amennyiben az (5.40) összefüggésben megadott feltételt több görbeeltolás teljesíti, a legkedvezőbb adatot, tehát a legkisebb L_{nw} számértéket kell eredményként megadni.

Ennek az értékelésnek is vannak nehézségei, különösen a vázas, könnyű födém szerkezetek esetében. Felmérések azt mutatták, hogy a helyiségeket használók értékeléséhez a kopogógép által keltett lépéshangnyomásszint nagysága (az 5.23. ábrán L) közelebb áll. Ezért e mérések értékelése is kiegészült egy szinképpillesztési tényező bevezetésével. A spektrumot azonban nem határozták meg előre, azt a ténylegesen mért lépéshangnyomásszint szolgáltatja. Az összesített benyomást a széles sávú hanghatás eredményezi, ezért a lépéshangnyomásszintet a vizsgálati frekvenciatartományra kell összegezni. Ennek alsó határa a szinképpillesztési tényező esetében 100 Hz vagy 50 Hz. A felső határ mindkét esetben 2500 Hz.

A szabványos lépéshangnyomásszint-vizsgálat értékeléséhez tartozó szinképpillesztési tényező ennek alapján:

$$C_{i,50-2500} = 10 \cdot \lg \left(\sum_{i=1}^{18} 10^{0,1 \cdot L_i} \right) - 15 - L_{nw}. \quad (5.41)$$

Ha csak 100–2500 Hz tartományban határozzák meg a színeképillesztési tényező értékét, akkor jele C_i , és az összegzés felső határa 15. A helyszíni vizsgálatok értékelése, tehát L'_{nw} és C_i -edik meghatározása azonos módon történik.

Padlóburkolatok egyadatos mennyisége a súlyozott szabványos lépéshangnyomásszint-csökkenés, ΔL_w , amelyet a burkolatlan födém L_{nw1} és a burkolattal ellátott födém L_{nw2} súlyozott szabványos lépéshangnyomásszintjeiből lehet meghatározni:

$$\Delta L_w = L_{nw1} - L_{nw2}. \quad (5.42)$$

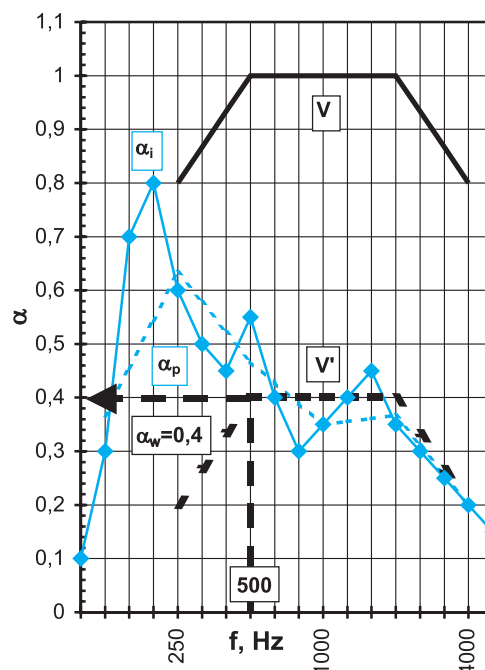
5.16. Egyadatos mennyiség a hangelnyelési tényező értékelésére [II.29]

Hangelnyelő szerkezetekre vonatkozó követelmények megállapítása, kifejezése, termékek kategorizálása céljából vezették be a hangelnyelő szerkezetek – álmennyezet, falburkolat, padlóburkolat stb. – frekvenciafüggő hangelnyelési tényezőjéből meghatározható értékelő jellegű, egyadatos mennyiségeket. A kiindulóadat a szerkezet 100–5000 Hz tartományban tercsávonként vagy a 125–4000 Hz frekvenciatartományban oktávsávonként meghatározott hangelnyelési tényezője. Az előbbi az 5.24. ábra α_i , az utóbbi pedig az α_p görbéje. Ha tercsávu adatok állnak rendelkezésre, az oktávsávu adatokat az egyes oktávsávokhoz tartozó, három tercsávu eredmény számtani közepeként kell kiszámítani. A vonatkoztatási görbe kiindulóhelyzetének jele **V**, a 250–2000 Hz tartományban értelmezik.

A vonatkoztatási görbét önmagával párhuzamosan, 0,05 lépésekben addig kell eltolni, amíg legjobban illeszkedik a vizsgálati eredményhez. Ennek feltételét az (5.43) összefüggés fejezi ki. Az eltolt helyzetű vonatkoztatási görbe és az oktávsávu vizsgálati eredmény közötti kedvezőtlen értelmű eltérések (δ_i) összegének 0,1-nél kisebbnek kell lennie. Kedvezőtlen értelmű az az eltérés, ahol a vizsgálati eredmény kisebb, mint az eltolt helyzetű vonatkoztatási görbe. Az összegzést minden oktávsávra el kell végezni:

$$0,1 \leq \sum_{i=1}^5 \delta_i^-. \quad (5.43)$$

Az eredmény az α_w súlyozott hangelnyelési tényező, amely az eltolt helyzetű vonatkoztatási görbe 500 Hz-es értéke, az ábrán 0,4.



5.24. ábra. Súlyozott hangelnyelési tényező értelmezése
V vonatkoztatási görbe a [II.29] szabvány szerint;
V* az eltolt helyzetű vonatkoztatási görbe;

A görbe menetét, tehát azt, hogy a szerkezet milyen frekvenciatartományban hatásos, további kiegészítő jelzéssel fejezhető ki:

- ha a vizsgálati eredmény a 250 Hz sávban haladja meg az eltolt vonatkoztatási görbét, **L** indexszel jelölik (kisfrekvenciás, low frequency hangelnyelő szerkezet);
- ha a vizsgálati eredmény az 500 és 1000 Hz-es sávban haladja meg az eltolt vonatkoztatási görbét, **M** indexszel jelölik (közepes frekvenciás, mid frequency hangelnyelő szerkezet);
- ha a vizsgálati eredmény a 2000 Hz-s sávban haladja meg az eltolt vonatkoztatási görbét, **H** indexszel jelölik (nagyfrekvenciás, high frequency hangelnyelő szerkezet).

A hivatkozott szabvány a súlyozott hangelnyelési tényező nagysága alapján minőségi kategorizálást, osztályba sorolást alkalmaz, amit az 5.2. táblázat foglal össze. Ez utóbbi jellemzőket is figye-

5.2. táblázat. Hangelnyelési osztályok határai

Hangelnyelési osztály	α_w
A	0,9 = <
B	0,8–0,85
C	0,6–0,75
D	0,3–0,55
E	0,15–0,25
besorolás nélkül	= <0,1

lembe véve az 5.24. ábra vizsgálati eredményének értékelése:

$$\alpha_w = 0,4(L); D.$$

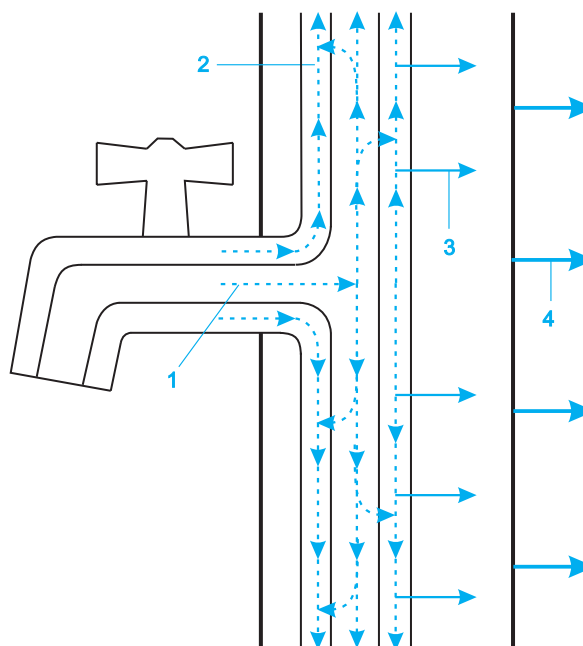
5.17. Vízellátási berendezések szerelvény-hangnyomásszintje és szerelvény A hangnyomásszintje [II.30], [II.31]

Az épületekben általában alkalmazott technikai berendezések közül közvetlen termékjellemzőt és vizsgálati módszert dolgoztak ki a vízellátási berendezések által keltett hang jellemzésére és értékelésére. A vizsgálati módszer meghatározása során alapvető nehézséget az jelentett, hogy e berendezések által keltett hang értékelésére nem abban a helyiségben van szükség, ahol a szerelvény működik, hanem az azzal szomszédos helyiségekben – jellemzően például lakás funkciójú helyiségek –, amelyek gyakran más lakásokhoz, lakóegységekhez tartoznak. A hangkeltés mechanizmusa a zaj ellen védendő helyiségek szempontjából egyértelműen a testhangkeltés családjába tartozik: a vízáramlás útjában levő folytonossági változások (cső-keresztmetszetváltozás, csőirányváltozás, elzáró- és szabályozószelep stb.) a vízben rezgéseket keltenek, a rezgés a folyadékban tovaterjed, ugyanakkor folyamatosan gerjeszti a cső falát, amely a csatlakozó épületszerkezeteket is rezgésbe hozza. A zaj ellen védendő helyiségekbe a rezgő épületszerkezetek sugározzák le a hangot. A folyamatot áttekintve nagyon sok, a szerelvénytől független paraméter is befolyásolja, hogy a védendő helyiségbe sugárzott akusztikai teljesítmény mekkora:

- a szerelvény akusztikai minősége;
- a szerelvény és a csőszakasz közötti kapcsolat;
- a cső méretei, a cső és az épületszerkezetek közötti kapcsolat;
- a folyadékáramlás sebessége és a folyadék nyomása;
- a hangot keltő épületszerkezet tömege, méretei.

A hangkeltés mechanizmusait az 5.25. ábra szemlélteti. Az említett összetett, soktényezős folyamat miatt meglehetősen nehéz olyan laboratóriumi elrendezést alkotni, amely e hatásokat úgy veszi figyelembe, hogy az eredmények a helyszíni körülményekre áttehetők legyenek, és a különböző laboratóriumok eredményeit is össze lehessen vetni.

Az összetett jelenségek olyan módszer kialakításához vezettek, amely a mérési eredményeket egy ún. etalonra normalizálja. A vizsgálatok során az etalon műszak jellemzőit, a vízáramlás sebességét

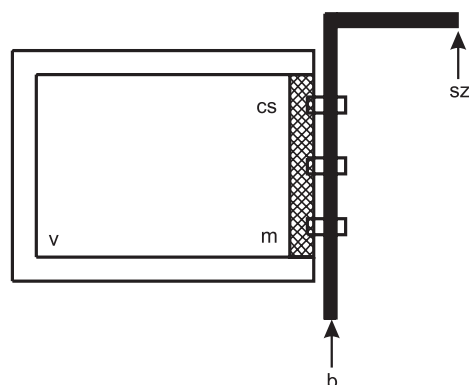


5.25. ábra. Vízellátási berendezések hangkeltésének mechanizmusa

- 1 a vízben terjedő hang (folyadékrezgés);
2 a csőfalban terjedő testhang (rezgés); 3 a csőfal által a falnak átadott rezgés; 4 a fal rezgése hangot kelt a helyiségben

és a víznyomást szabványosították, és így módon az etalonnal végzett mérésekkel elvileg a laboratóriumok közötti eltérések kiküszöbölhetők. A vizsgálati elrendezést az 5.26. ábra mutatja.

A mérőhelyiség, az ábrán *v*, mintegy 50–100 m³ térfogatú, utózungési ideje 1–2 s. A helyiség egyik falának (mérőfal) külső oldalára 4 merev csőbilincsel mérőcsövet (1"-os acélcső) rögzítettek. A mérőcsőben víz áramlik a vizsgálati körülmények szerinti áramlási mennyiséggel. A merev csőbilincs át-



5.26. ábra. Vízellátási berendezések szerelvény-hangnyomásszintjének vizsgálati elrendezése

- v* vevőhelyiség; *m* mérőfal, amelynek külső oldalára a mérőcsövet erősítik; *cs* a mérőcsövet a mérőfalhoz mereven rögzítő acél csőbilincs; *b* mérőcső (1"-os acélcső); *sz* a szerelvény, ill. az installációs etalon rögzítési helye

adja a csőfal rezgését a mérőfalnak, és az hangot sugároz le a mérőhelyiségbe. A mérőcsőre – a szükséges toldások után – először az etalont rögzítették.

A mérés menete:

- az ábrán az *sz* jelű helyre, a mérőcső végére fel-erősítik az installációs etalon, beállítják a 0,3 MPa víznyomást és a szükséges vízmennyiséget (térfogatsebességgel adják meg), megméri az installációs hangnyomásszintet oktávsávonként, jele L_{sn} , az n index az oktávsáv sorszáma;
- az installációs etalon helyére felszerelik a vizsgáló szerelvényt (szelep, keverőcsaptelep stb.), beállítják a folyadék térfogatsebességét és a nyomást, és megméri a szerelvény sávhangnyomásszintjét, L_n -et oktávsávonként;
- az installációs etalon névleges referenciaértékét a mérési szabvány [II.30] megadja, jele L_{srn} ;
- a szerelvény-hangnyomásszintet, L_{apn} oktávsávonként a következő összefüggés adja:

$$L_{apn} = L_n - (L_{sn} - L_{srn}) \quad (5.44)$$

A gyakorlatban jó minőségű szerelvények vizsgálata során mind L_n , mind L_{sn} értéke az alapzajjal korrigált érték;

- a szerelvény A hangnyomásszint, L_{ap} az oktávsáv-
os értékekből számítással határozható meg a (6.1) összefüggés szerint, L_{apn} oktávsávú értékeiből.

Az installációs etalon referenciaértékeit az 5.3. táblázat adja meg. Az értékek 0,3 MPa víznyomásra vonatkoznak.

5.3. táblázat. Installációs etalon referenciaértékei

f_s okt, Hz	125	250	500	1000	2000	4000	A
L_{srn} , dB	35	39	42	42	37	25	45

Az MSZ EN ISO 3822 szabványsorozat további lapjai a különféle szerelvények rögzítési módjait és a vizsgálat körülményeit határozzák meg.

A szerelvény zajkeltésére jellemző egyadatos mennyiség a szerelvény A hangnyomásszint. A [II. 33] szabvány az 5.4. táblázatban látható minőségi kategóriákat állapítja meg. Az akusztikai minőség alapján megállapított csoportba foglalás az alkalmazhatóság eseteinél játszik szerepet, l. a 9. fejezetet.

5.4. táblázat. Szerelvények minőségi kategóriái a szerelvény A hangnyomásszint alapján [II.33]

Minőségi csoport	L_{ap} , dB
I.	$= < 20$
II.	$= < 30$
III.	> 30

6.

AZ ÉPÍTETT KÖRNYEZET AKUSZTIKAI MINŐSÉGÉT KIFEJEZŐ FOGALMAK, MENNYISÉGEK

6.1. Az épített környezet akusztikai minőségét kifejező fogalmak, mennyiségek rendszere

Épületen kívül vagy belül tartózkodó, dolgozó, pihenő vagy alvó emberek a környezet akusztikai minőségéről hallás útján szerzett benyomásaik alapján tájékozódnak, formálnak véleményt. Tapasztalataik lakóépületek esetében például a következők lehetnek:

- a közlekedés okozta zaj nagyon hangos (vagy csendes) a lakásom előtt;
- a szomszédságban működő ipari vagy szolgáltatólétesítmény által okozott zaj nagyon hangos a lakásom előtt (vagy nem is hallható);
- este nagyon felhallatszik a lakásba a pincében működő vendéglő zaja (vagy csak kevésbé hallható);
- a szomszéd lakásból minden áthallatszik, a beszélgetés, a zene stb. (nem hallatszik át semmi);
- erősen hallani, ha a felső lakásban járkálnak (nem lehet hallani a járkálást);
- erősen áthallatszik a szomszéd lakásból, a felső lakásból, ha folyik a víz a fürdőszobában, a konyhában (nem lehet hallani a víz folyatásánakhangját);
- az első emeleti lakásban erősen hallani a földszinten levő transzformátorállomás, hőközpont, automata garázskapu működési zaját (vagy nem hallani e zajokat).

Oktatási épületben kialakuló benyomások részben hasonlóak lehetnek, de a funkcióból eredő eltéréseken túl új szempont is megjelenik:

- túl erősen áthallatszik a zaj a szomszéd tanteremből (nem hallatszik át);
- a tanáriba túlzottan behallatszik a folyosóról a hangoskodás (nem hallatszik be);
- a gyerekek a túl nagy zajban nem tudnak kellően figyelni (a csendes környezetben jobban képesek tanulni);
- nagyon visszhangos a tanterem, nem érteni jól a tanár szavait.

Irodai helyiségekben mindezekhez képest a munkatevékenységhez, a kórházakban a pihenéshez, gyógyuláshoz szükséges csend, ill. annak hiánya alakítja ki a véleményeket.

A felsorolt és egyéb benyomások a panasz vagy a megelégedettség kifejezői, látszólag nem alkalmasak sem a tervezés céljának meghatározására, sem pedig a minőség ellenőrzésére. Ugyanakkor határozott szempontokat jelentenek:

- a helyszín akusztikai minőségének jellemzésére olyan mennyiségeket kell bevezetni, amelyek az említett benyomásokkal kapcsolatba hozhatók, azokat visszatükrözik; e mennyiségekről lesz szó ebben a fejezetben;
- a helyszín akusztikai minőségét kifejező mennyiségek vizsgálatára olyan módszereket kell bevezetni, amelyek egyértelműen leírják a mérés módszerét, valamint mindazokat a körülményeket, amelyek az eredményt befolyásolják;
- a méretezési és a vizsgálati módszereknek egymáshoz illeszkedniük kell;
- az akusztikai minőségre vonatkozó követelmények szempontjairól mindezeket figyelembe kell venni.

Az épülettervezés feladatai szerint az épített környezet akusztikai minőségét többi között a 6.1. táblázatban adott mennyiségek írják le. Közülük Magyarországon némelyiket rendszeresen használják, egy-kettő azonban nem szerepel a gyakorlatban. Mivel az emberi reakciók szempontjából valamilyen zajjelenséget, folyamatot jól jellemeznek, ezért az áttekintés érdekében szerepelnek a táblázatban. Azokat az akusztikai mennyiségeket, amelyeket a hazai műszaki szabályozás követelményként alkalmaz, csillag jelöl.

Az áttekintésben a gyakrabban előforduló létesítményekkel kapcsolatos mennyiségek szerepelnek, ezért a könyv bevezetőjében ismertetett célkitűzéssel összhangban a ritkábban előforduló épület- és helyiségfunkciók (pl. hangversenytermek,

6.1. táblázat. Az épített környezet akusztikai minőségét kifejező mennyiségek

Értelmezés, akusztikai jelenség	Megnevezés	Jel, mértékegység	Hazai követelmény
Minden hangjelenség, ha az emberi hallás frekvenciafüggő érzékenységet is ki kell fejezni	A hangnyomásszint	L_A , dB	
Munkahelyen kialakuló zaj	megítélési A hangnyomásszint-megítélési szint	L_{AD} , dB L_{AM} , dB	*
Közúti közlekedés által okozott zaj épületen kívül, meghatározott épület vagy terület esetén	közúti közlekedésből származó mértékadó A hangnyomásszint	$L_{AM,kö}$, dB	
Vasúti közlekedés által okozott zaj épületen kívül, meghatározott épület vagy terület esetén	vasúti közlekedésből származó mértékadó A hangnyomásszint	$L_{AM,va}$, dB	
Légi közlekedés által okozott zaj épületen kívül, meghatározott épület vagy terület esetén, általános helyen, vagy kis repülőterek, heliportok környezetében	repülésből származó mértékadó A hangnyomásszint	$L_{AM,re}$, dB	
A közlekedés egészétől származó zaj épületen kívül, meghatározott épületek vagy terület esetében	közlekedés egészétől származó eredő mértékadó zajszint	$L_{AM,ek}$, dB	*
Építkezés okozta zaj a környező épületeken kívül	megítélési szint	L_{AM} , dB	*
Üzemi, szolgáltatólétesítmény által okozott zaj a környező épületen kívül	megítélési szint	L_{AM} , dB	*
Egyes zajesemények (pl. repülőgép vagy vasúti szerelvény elhaladása)	zajesemény zajeseményszintje	L_{AX} , dB	
Településen általában kialakuló közlekedési, üzemi, építkezéstől származó zaj, az épületen kívül, a zajállapot jellemzésére a teljes nap figyelembevétele alapján	napi megítélési szint	$L_{A,24h}$, dB L_{den} , dB	
Településen általában kialakuló közlekedési, üzemi, építkezéstől származó zaj, az épületen kívül, a zajállapot jellemzésére az éjszakai időszak figyelembevétele alapján	éjszakai megítélési szint	L_{night} , dB	
Helyiségekben kialakuló zaj, amely a közlekedéstől származik	megítélési szint	L_{AM} , dB	*
Helyiségekben kialakuló zaj, amely a rendeltetésszerűen működő technikai berendezésektől származik	megítélési szint	L_{AM} , dB	*
Helyiségekben kialakuló zaj, amely az épületen belüli ipari, szolgáltatótevékenységtől származik	megítélési szint	L_{AM} , dB	*
Környezeti és munkahelyi zaj legnagyobb értéke	csúcserő F , S vagy I időállandóval	L_{Amax} , dB	*
Környezeti és munkahelyi zaj statisztikai jellemzői	10 %-os szint 95 %-os szint	L_{10} , dB L_{95} , dB	
Vízszintesen vagy függőlegesen szomszédos helyiségek közötti léghangszigetelés	helyszíni súlyozott léghanggátlási szám	R'_w , dB	*
Függőlegesen, vízszintesen vagy átlósan szomszédos helyiségek, terek közötti lépéshang-szigetelés	helyszíni súlyozott szabványos lépéshangnyomásszint	L'_{nw} , dB	*
Homlokzati szerkezetek helyszíni léghangszigetelése	homlokzat-helyszíni súlyozott léghanggátlási szám	R'_{wtr} , R'_w , dB	*
Visszhangosság	utózenngési idő	T , s	

színházak, sportlétesítmények stb.) akusztikai minőségét jellemző speciális akusztikai mennyiségek kimaradtak.

6.2. Az $A L_A$ hangnyomásszint [II.1], [II.2]

Az emberi hallás folyamatát és annak sajátosságait sok kutató sok szempontból vizsgálta. A hallás folyamata összetett többszörös jelátalakítást és többszintű jelfeldolgozást tartalmaz, hiszen például:

- a levegőben érkező hang a dobhártya közvetítésével szilárd, de rugalmasan kapcsolt elemek rezgésévé alakul át – a hallócsontok rezgése a középfülben;
- a hallócsontok rezgése a belső fülben, a csiga alakú szervben folyadékban terjedő rezgéssé alakul, ahol kétszeres jelátalakítás történik, hiszen
 - jelenlegi ismeretek szerint a különböző frekvenciájú jelösszetevők érzékelése a csiga alakú szerv eltérő helyein – eltérő tulajdonságú érzékelősejteken – történik, tehát ez frekvenciátávolság transzformáció;
 - az „erősebb” hangoknak megfelelő nagyobb amplitúdójú folyadékrezgés az amplitúdó függvényében gyakrabban ingerli az érzékelősejteket, ami jel nagyság–frekvencia transzformációt jelent;
- a hallás folyamata előbb az idegi alközpontokban, majd az agyban lezajló összetett ingerfeldolgozással zárul.

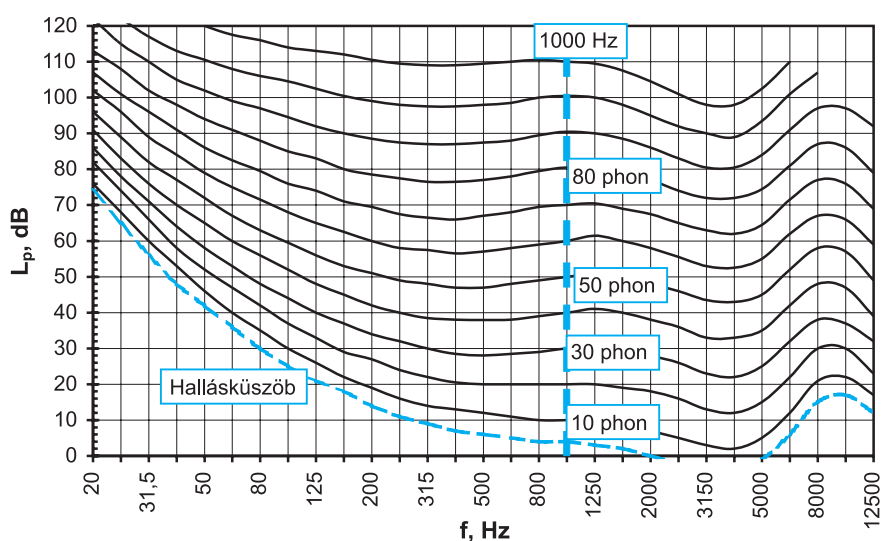
A hallás – mind fizikai, mind idegrendszeri szempontból – összetett folyamatának az érzékelés szempontjából több érdekes sajátossága van. A legfonto-

sabb a hallás frekvenciafüggő érzékenysége, ami azt jelenti, hogy azonos hangnyomásszintű, de eltérő frekvenciájú hangokat eltérő mértékben tartanak az emberek hangosnak. Számos kutató, pl. Fletcher, Munson, Robinson, Dadson, Békésy, Whittle stb. vizsgálta e jelenséget. Néhány klasszikus szakirodalmi forrás a [6.1]–[6.4]. A különböző vizsgálati módszerek és a változó vizsgálati környezet részleteiben eltérő, de tendenciájában azonos eredményre vezetett. Az eredmények legáltalánosabb része a nemzetközi szabványosításban is megjelent [II.22]. Összefoglaló áttekintés pl. a [IV.12] irodalomban található.

A hallás frekvenciafüggő érzékenységét a 6.1. ábra szemlélteti. A görbék a tiszta hangú – egyetlen frekvenciát tartalmazó szinuszos – mérőjel különböző mérési frekvenciákon azonos hangosságot eredményező hangnyomásszint-értékeit mutatják. A hangterjedés szabad térre volt jellemző, tehát hangvisszaverődések a mérések helyszínén nem alakultak ki. A jó hallású megfigyelők a hangforrással szemben helyezkedtek el, és mindkét fülüket használták.

A görbesereg az emberi hallásra vonatkozó általános minőségi jellegű megállapításokat támasztja alá, bár a görbéket meghatározó eredmények tiszta hangú mérőjellel elvégzett kísérletekből származnak:

- a görbéket isophon, tehát azonos hangosságú görbéknek nevezik, ami azt jelenti, hogy az összetartozó frekvencia–hangnyomásszint értékek által meghatározott vizsgálóhangot az ember azonosan hangosnak hallja;
- a hallás érzékenysége frekvenciafüggő, hiszen az



6.1. ábra. Az emberi hallás frekvenciafüggő érzékenysége [II.22]

6.2. táblázat. Az A szűrő átvitele tercsávonként

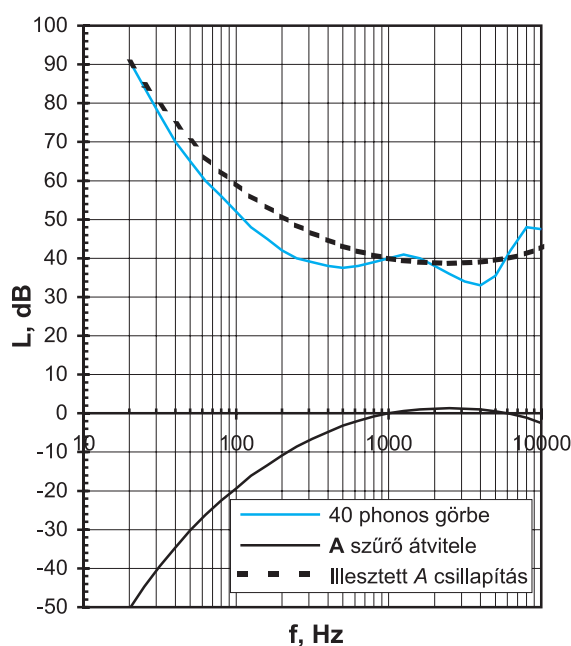
f , Hz	20	25	31.5	40	50	63	80	100	125	160
A , dB	-50,5	-44,7	-39,4	-34,6	-30,2	-26,2	-22,5	-19,4	-16,1	-13,4
f , Hz	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600
A , dB	-10,9	-8,6	-6,6	-4,8	-3,2	-1,9	-0,8	0	0,6	1,0
f , Hz	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10000	12500
A , dB	1,0	1,2	1,3	1,2	1,0	0,5	-0,1	-1,1	-2,5	-4,3

azonos hangnyomásszintű, de eltérő frekvenciájú hangokat a kísérletben részt vevők eltérően hangosnak hallják;

- a hallás érzékenysége függ a jel nagyságától, hiszen míg az 1000 Hz-es frekvencián 10 dB hangnyomásszint-növekedés 10 phon hangosság-növekedést eredményez, eltérő frekvencián a 10 dB hangnyomásszint-növekedés ettől eltérő hangosság-növekedést okoz;
- a hallás érzékenységének a jel nagyság szempontjából alsó határa van, amelyet hallásküszöbnek neveznek: ez a legkisebb, hallható hangnyomásszint, szintén a frekvenciafüggő;
- a hallásnak a frekvencia függvényében van alsó határa, ez névlegesen 20 Hz, az alsó határ az életkortól, a személyek korábbi hangélményeitől és számos más tényezőtől függ;
- a hallás felső frekvenciahatára (az ábrán nem szerepel) névlegesen 20 kHz, a felső határ az életkortól, a személyek korábbi hangélményeitől és számos további tényezőtől függ;
- a hallás felső határa az ábrán és az [II.22] hivatkozásban nem szereplő fájdalomküszöb, amely a 120 phonos görbének felel meg.

Ha a vizsgálati körülmények megváltoznak, pl. zárt helyiségben kialakuló hangtér, akkor az egyes görbék menete részleteiben megváltozik, de az eredmények minőségileg hasonló tendenciákat mutatnak. Az a célkitűzés, hogy a környezetben kialakuló hangjelenségek „erősségét” a hallás frekvenciafüggő érzékenységének figyelembevételével fejezzék ki, a „szakmai történelem” folyamán többféle súlyozószűrő bevezetéséhez vezetett. Ezekből napjainkra a műszaki gyakorlatban az A jelű súlyozószűrő használata vált általánossá.

Az A súlyozószűrő átvitele a frekvencia függvényében változik, az egyszerűbb alkalmazás érdekében 1000 Hz-en 0 dB. A 6.2. táblázat tercsávonként adja meg az átvitel – egyébként szabványban rögzített – értékeit. Az átvitel nullánál kisebb értéke csillapítást, a pozitív érték kiemelés, erősítést jelent. Az 6.2. ábrán a 40 phonos azonos hangos-



6.2. ábra. 40 phonos isophongörbe és az A súlyozószűrő csillapítása

sággörbe és az A szűrő csillapítása látható, a szűrő csillapításértékei az összehasonlíthatóság érdekében olyan mértékben vannak eltolva, hogy 1000 Hz-en a két érték egyenlő legyen. A csillapítás az átvitel -1 szerese. Látható, hogy a két görbe közelítőleg fedi egymást.

A sávhangnyomásszintekből az A hangnyomásszint számításával is meghatározható azon az alapon, hogy az egyes frekvenciasávokat egymástól függetlenül működő, nem kohherens zajforrásoknak tekintik, így az egyes frekvenciasávokhoz tartozó hangnyomás effektív értékek négyzetes összegzése alkalmazható (l. a 2.2.1. pontot). Az A hangnyomásszintet, L_A -t a (6.1) összefüggés alapján kell kiszámítani. Az A szűrő átvitele az i indexű frekvenciasávban A_i , mértékegysége dB, a sávhangnyomásszint jele pedig e sávban L_i :

$$L_A = 10 \cdot \lg \left(\sum_{i=1}^n 10^{0,1(L_i + A_i)} \right). \quad (6.1)$$

6.3. Az L_{Aeq} egyenértékű A hangnyomásszint [II.1], [II.2]

Időben változó hangjelenségek jellemzésére, értékelésére vezették be a fejlődés eredményeként az egyenértékű A hangnyomásszintet. Az emberi hallás frekvenciafüggő érzékenységet tükröző, az időtől függő A súlyozású hangnyomásból – jele $p_A(t)$, vagy A hangnyomásszintből kiindulva, jele L_A kell meghatározni a (6.2) vagy a (6.3) összefüggés szerint. Mindkét összefüggés a hangnyomás négyzetes középértékét jelenti, tehát energiaátlag, amelyet végül szintben fejeznek ki. Az energiaátlag azért indokolt megjelölés, mert többféle hullámterjedés esetében, szabad térben és zárt térben egyaránt a hangjelenség energiasűrűsége, intenzitása a hangnyomás effektív értékének, vagy csúcsértékének négyzetével arányos (1. a 2. fejezetet). A (6.3) összefüggés inkább szakaszonként állandó hangjelenségre alkalmazandó. p_0 a vonatkoztatási érték (1. a 2. fejezetet):

$$L_{Aeq} = 10 \cdot \lg \left[\frac{1}{T} \int_0^T \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} dt \right]; \quad (6.2)$$

$$L_{Aeq} = 10 \cdot \lg \left[\frac{1}{T} \sum_i t_i \cdot 10^{0,1 \cdot L_{Ai}} \right]. \quad (6.3)$$

A T integrálási és egyúttal átlagolási idő az az időtartam, amelyre az egyenértékű A hangnyomásszint vonatkozik. Ha a hangjelenség szakaszonként állandó, az egyes szakaszok indexe, a szakaszok időtartama és az e szakaszokra jellemző A hangnyomásszint rendre i , t_i , L_{Ai} . Természetesen az egyes szakaszok időtartamának összege egyenlő lesz az átlagolási idővel.

Mindezeket a 6.3. ábra szemlélteti. Az ábra vízszintes tengelyén az idő, függőleges tengelyén az A hangnyomásszint látható. A folytonos görbe időfügg-

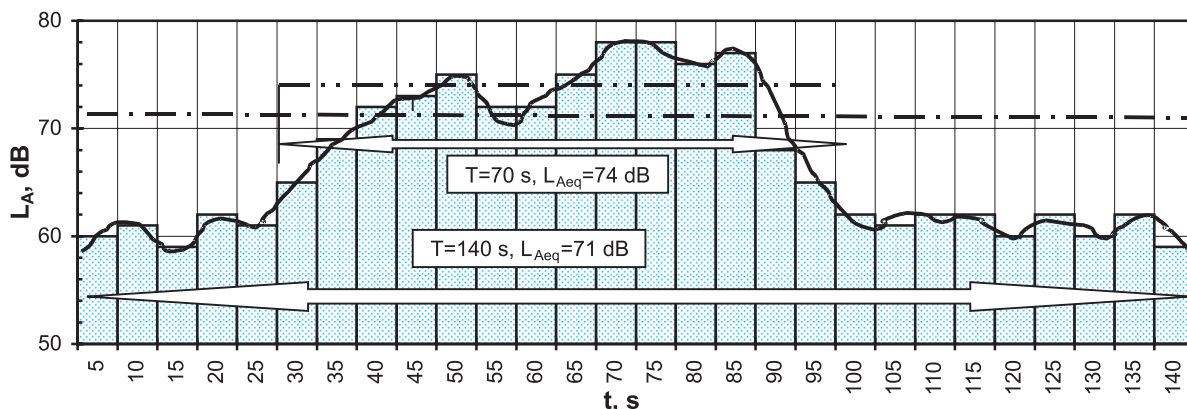
vény – minőségileg közlekedési zaj lámpával szabályozott kereszteződés közelében –, amelyből 5 s tartalmú szakaszokra bontottak, amely szakaszokon belül a tényleges A hangnyomásszintet állandónak tekintették. Az egyenértékű A hangnyomásszintet részben a teljes mintára, részben annak az akadálytalan járműforgalmat mutató szakaszára határozták meg. A vastag pontvonalak a két egyenértékű A hangnyomásszintértéket grafikususan is mutatják.

6.4. Az L_{AM} megítélési szint [II.1]

A 6.1. táblázatból láthattuk, hogy épületen kívül és épületen belül egyaránt a környezeti zaj általános jellemzésére a megítélési szint nevű akusztikai mennyiséget alkalmazzák. Értelmezése a vizsgálandó, értékelendő hangjelenség egyenértékű A hangnyomásszintjéből indul ki. Ehhez a zaj jellegétől függő korrekciós tényezők járulnak, amelyek a hangjelenség két, különösen zavaró sajátosságát „büntetik”: az impulzusos jelleget és a tiszta hangú összetevő – tonális összetevő – jelenlétét. E két sajátosságot ugyanis az egyenértékű A hangnyomásszint nem tükrözi kellő mértékben.

Az impulzusos jelleg és a tiszta hangú zajösszetevő jelenléte hallható is, de objektív módon, és méréssel meg is határozható. A környezeti zaj értékelése szempontjából kedvezőtlen két jelenség hatását az impulzusos zajjelleg miatti és a tiszta hangú összetevő miatti korrekciós tényező (K_{imp} és K_{ton}) meghatározásával lehet kifejezni, amelyeket a vizsgálandó, értékelendő hangjelenség rendeltetésszerű működési körülmények között kialakuló, egyenértékű A hangnyomásszintjéhez mint általános zajjellemzőhöz adnak hozzá. Mértékegységük szintén dB, nagyságuk 0–6 dB lehet tényezőként.

A megítélési szintet a (6.4) összefüggés szerint kell meghatározni. A kiindulás a vizsgálandó hang-



6.3. ábra. Az egyenértékű A hangnyomásszint szemléltetése

jelenség egyenértékű A hangnyomásszintje. A kifejezés azért alkalmazza a ' (vessző) indexet, mert a mérési gyakorlatban a vizsgálandó, értékelendő jelenséget gyakran nem lehet önmagában, csak más hangjelenségekkel együtt mérni. A „más” hangjelenségeket a vizsgálandó jelenség szempontjából alapzajnak kell tekinteni, és a közvetlenül mért egyenértékű A hangnyomásszintet az alapzaj szintén mért értékével vissza kell korrigálni:

$$L_{AM} = L'_{Aeq} + K_{imp} + K_{ton}. \quad (6.4a)$$

A megítélési szintnél is, de eredendően az egyenértékű A hangnyomásszintnél pontosan meg kell adni, hogy a meghatározott zajjellemző milyen időtartamra vonatkozik. Azt az időtartamot, amelyre az adat vonatkozik, általában vonatkoztatási időnek nevezik. A környezeti zaj jogszabály és szabvány szerinti jellemzéséhez, értékeléséhez a vonatkoztatási idő értékét meghatározzák, ez a T_m megítélési idő. Értékeit az 6.3. táblázat tartalmazza. A megítélési idő a vizsgálandó zaj forrásától függ. A közlekedési zaj és az egyéb zaj megítélési ideje közötti különbséget részben kompromisszumok, részben a jelenségek eltérő zavaró hatása indokolja.

6.3. táblázat. Megítélési idő

Vizsgálat időszak	A vizsgálandó zaj forrása	
	közlekedéstől eredő zaj	egyéb zaj (üzemi, építkezéstől származó, használati stb.)
Nappal	06.00–22.00 h között 16 h	06.00–22.00 h között a legkedvezőtlenebb 8 h
Éjszaka	22.00–06.00 h között 8 h	22.00–06.00 h között a legkedvezőtlenebb 1/2 h

Az épületen kívüli zajokat általában az épület homlokzati síkjától 2 m távolságban, terepszint, ill. az egyes emeletek padlószintje felett 1,5 m magasságban kell mérni. Helyiségekben a mérési magasság 1,2 m. Minden esetben meg kell keresni a legrosszabb helyzetet, tehát a legnagyobb egyenértékű A hangnyomásszintet adó mérési helyet, figyelembe véve még néhány távolsági korlátot is.

A megítélési szint épületen kívül, valamint épületek helyiségeiben – nem munkahelyeken – a környezeti zaj értékelésének szabványos mértéke, tervezési cél és egyúttal a zajhatárértékek megadásának módja is.

A megítélési szint épületen belüli és kívüli értelmezését egy lakóépület és környezete példáján a 9. fejezet esettanulmányai szemléltetik.

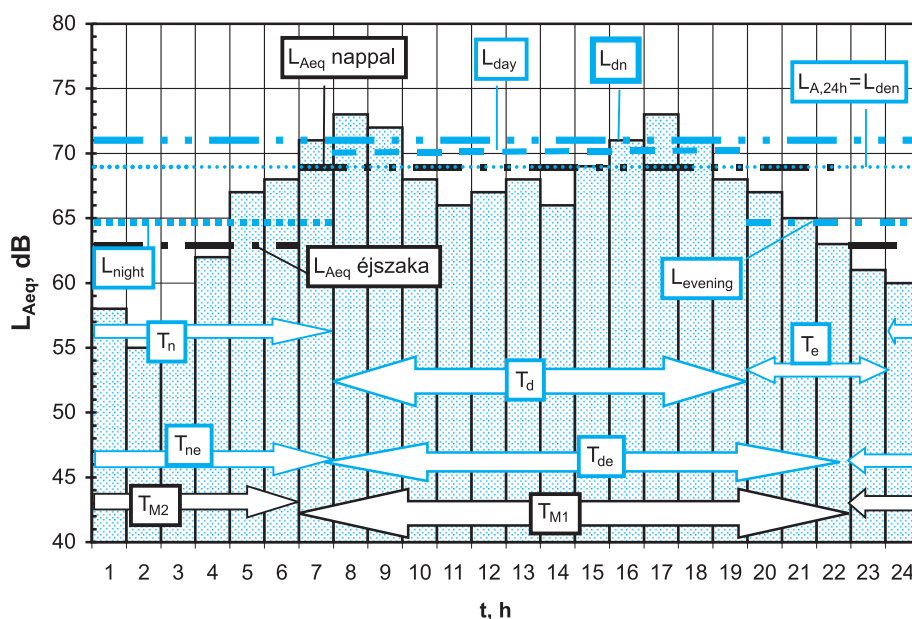
6.5. Az $L_{A,24h}$ (L_{den}) napi megítélési szint [II.1], [II.3] és az L_{night} éjszakai megítélési szint [II.3]

Elsősorban közlekedés – légi, közúti, vasúti –, valamint kültéri tevékenységek, pl. építkezés és ipari tevékenységek által okozott, az épített környezetet tartósan terhelő zaj jellemzésére alkalmazható akusztikai mennyiség. Jelentősége, aktualitása elsősorban az, hogy a [II.3] direktíva és számos más szakmai anyag szerint is a környezet zajosságát e mennyiséggel kell kifejezni zajtérképek készítésekor, települések, utak, vasútvonalak, repülőterek környezeti állapotának jellemzése érdekében, és a jövőre vonatkozó tervek kidolgozása során. Értékelhető mértékű, és a területtervezésben, gazdálkodásban alkalmazható kapcsolat van L_{den} és L_{night} valamint a terület lakosságának a zajjal szemben tapasztalható véleménye között (a környezet zajossága milyen mértékben zavaró).

A napi megítélési szint jele a hazai szabályozás szerint $L_{A,24h}$, a nemzetközi jelölés az EU új környezeti zaj elleni védelemmel foglalkozó direktívája szerint [II.3] egy ehhez közel álló értelmezésű mennyiségre pedig L_{den} . Ez utóbbit gyakran DEN -nek is nevezik. Az index három betűje az angol *day*, *evening* és *night* szavak kezdőbetűje, utalva arra, hogy az egész napra jellemző zajadat e három napszak eltérő súlyú, de együttes értékeléséből származik. A nappali megítélési szint:

$$L_{A,24h} = 10 \cdot \lg \left(\frac{1}{24} \cdot \sum_{i=1}^n t_i \cdot 10^{0,1(L_{AM,i} + Q_i)} \right) \quad (6.4b)$$

ahol azon napszakok száma, amelyre a 24 órás naptot felosztják, értéke 3; a [II.3] direktíva és az ehhez csatlakozó alapozó szakmai anyagok három napszakot különböztetnek meg, a nappalt, az estét és az éjszakát; i a napszak indexe; t_i a napszak időtartama órákban kifejezve, a [II.3] direktíva szerint a nappali időszak 07–19 h közötti időtartam 12 óra, az esti időszak 19–23 h 4 óra, az éjszakai időszak 23–7,8 óra időtartam; $L_{AM,i}$ [II.1] szabvány szerint az i -edik napszakra vonatkozó megítélési szint, a [II.3] direktíva szerint viszont az egyenértékű A hangnyomásszint adott időszakra vonatkozó hosszú idejű, egyéves átlaga; Q_i pedig az adott időszakra vonatkozó súlyozótényező, értéke [II.1] és [II.3] szerint a nappali időszakra 0 dB, az esti időszakra 5 dB, az éjszakai időszakra pedig 10 dB. A súlyozótényező tehát megnöveli az esti és az éjszakai időszakra vonatkozó megítélési szintet az értékelésben, ezzel kiemelve az időszak súlyát, fontosságát.



6.4. ábra. A környezeti zaj jellemzőinek kapcsolata

T_{M1} , T_{M2} a nappali és éjszakai időszak és egyúttal a közlekedési zaj megítélési ideje az MSZ 18150-1:1998 szabvány szerint;
 T_d , T_e , T_n a nappali, esti és éjszakai időszak az L_{den} megállapításához; T_{de} , T_{ne} nappali és éjszakai időszak L_{dn} megállapításához; L_{day} , $L_{evening}$, L_{night} a nappali, esti és éjszakai időszak egyenértékű A hangnyomásszintje L_{den} -hez

Számos szakirodalmi forrás az L_{den} helyett az L_{dn} mennyiséget alkalmazza (röviden DN), többi között a lakosság szubjektív reakcióinak, például zavarásnak a vizsgálatára és értékelésére. A meghatározás szintén a (6.4) összefüggés szerint történik, de csak két napszakra – nappal: day, éjszaka: night –, a nappali időszak 15 óra időtartamú, reggel 7 és este 10 óra között, az éjszakai időszak pedig 9 óra időtartamú.

Összehasonlítás érdekében a 6.4. ábra egy teljes huszonnégy óra közlekedési zajának időfüggését mutatja be óránként meghatározott egyenértékű A hangnyomásszintek alapján. Az ábrán adottak az egyes vonatkoztatási idők, és a vonatkoztatási időkhöz tartozó egyenértékű A hangnyomásszintek.

Mindezeket a 6.4. táblázat foglalja össze. A sok lehetséges következtetés közül példaként az éjszakai időszak határa emelhető ki: a hazai szabályozás szerint az éjszakai-nappali időszak váltása reggel 6 óra, a [II.3] szerint viszont 7 óra. A városi forgalmat ismerve nyilvánvaló, hogy hat és hét óra között már a reggeli csúcsgorgalom figyelhető meg, ezért mind a külső környezetre, mind az épületek belső tereire irányuló tervezési feladatban sokkal szigorúbb előírásoknak kell megfelelni akkor, ha az éjszakai időszak reggel hét óráig tart. Nagyon érdekes az esti időszak önálló megjelenítése, akkor a terhelés kisebb, az átlagos tevékenységek is eltérnek a nappali és az éjszakai tevékenységtől egyaránt. Ugyanakkor a teljes nap szakaszokra osztása azt a felfo-

6.4. táblázat. A környezeti zajt értékelő akusztikai mennyiségek összehasonlítása a 6.4. ábra számpéldáján

Megnevezés	Jel	Vonatkoztatási idő jele és értéke a 6.4. ábrán, óra	Számérték, dBl. a 6.4. ábrát
Egyenértékű A hangnyomásszint nappal	L_{Aeq} nappal	T_{M1} 06–22	69,5
Egyenértékű A hangnyomásszint éjszaka	L_{Aeq} éjszaka	T_{M2} 22–06	63,1
Napi megítélési szint, DEN	$L_{A,24h}$, L_{den}	0–24	69,0
Nappali szint, DEN -hez	L_d	T_d 07–19	70,0
Esti szint DEN -hez	L_e	T_e 19–23	64,6
Éjszakai szint DEN -hez	L_{night}	T_n 23–07	65,4
DN	L_{dn}	0–24	72,3
Nappali szint, DN -hez	L_d	T_{de} 07–22	70,0
Éjszakai szint DN -hez	L_{night}	T_{ne} 22–07	65,4

gást tükrözi, hogy nappal az emberek dolgoznak, este pihennek vagy szabadidős tevékenységet folytatnak, éjszaka pedig alszanak. Ez azonban korántsem általános így.

Az, hogy melyik jellemző alkalmazása a helyes, spekulatív megfontolások alapján nem dönthető el. Felmérések alapján kell tisztázni, hogy melyik időhatár tükrözi a hazai lakosság napi életritmusát, és csak felmérések alapján lehet eldönteni, hogy a lakosság akusztikai környezetre vonatkozó szubjektív ítélete melyik zajjelzővel van a legszorosabb kapcsolatban.

6.6. Az $L_{A_{Max}}$ maximális A hangnyomásszint

Időben változó hangjelenségek, egyes zajesemények értékelésére a szakmai gyakorlatban többféle mennyiséget alkalmaznak. Az egyik mennyiségcsoport a legnagyobb A hangnyomásszintből indul ki. Egy hangjelenség legnagyobb mért értékét a méréshez választott időállandó is befolyásolja. Ezért az időállandót is meg kell adni.

A hazai szabályozási gyakorlatban a munkahelyi zaj legnagyobb értékét impulzusidő-állandóval kell megállapítani akkor, ha a vizsgálat halláskárosodás ellenőrzésére történik. A legnagyobb A hangnyomásszint jele ekkor $L_{A_{IMax}}$. Más esetekben a gyors időállandót alkalmazzák.

6.7. A munkahelyi zaj jellemzése

A munkahelyi zaj jellemzésére a hatályos szabványok, rendeletek alapján több akusztikai mennyiség alkalmazandó, ezekre különféle határértékek vonatkoznak. Ezek munkahelyekhez, az ott dolgozó emberekhez kapcsolódnak.

A [II.4] rendelet, valamint a [II.5] szabvány szerint a munka közbeni zajexpozíció okozta kockázatok számszerűsítésére (elsősorban halláskárosodás) a zajjellemző a megítélési A hangnyomásszint, L_{AD} , és az impulzusidő-állandóval mért legnagyobb A hangnyomásszint, L_{A_I} . A megítélési A hangnyomásszintet a következő összefüggés adja meg:

$$L_{AD} = 10 \cdot \lg \left(\frac{\tau}{T} \cdot 10^{0,1(L_{Aeq} + K_I)} \right) \quad (6.5)$$

ahol L_{Aeq} az értékelési időre vonatkozó egyenértékű A hangnyomásszint; T a megítélési idő; τ az értékelési idő; K_I az impulzusos zajjelleg miatti korrekció, amelynek értéke 0–6 dB közötti.

A megítélési idő 8 óra. Az egyenértékű A hang-

nyomásszint is és a megítélési A hangnyomásszint is a dolgozóra vonatkozik, munkahelyet annyiban jellemez, amennyiben az a dolgozó tartózkodási helye.

Az [I.5] rendelet határértékei azonban ülés- és tárgyalótermek, intézmények irodai helyiségei, könyvtári olvasótermek akusztikai jellemzőjeként a megítélési szintet alkalmazzák (l. a 6.4. alfejezetet).

6.8. 10%-os, 90%-os, 95%-os (L_{10} , L_{90} , L_{95}) A hangnyomásszint

Az időben változó hangjelenségek értékeléséhez többféle statisztikai feldolgozás kapcsolható. Sok példában, értékelésben szerepel a 10, a 90 vagy a 95%-os A hangnyomásszint. A hangjelenség idő szerinti eloszlásfüggvényéből határozhatók meg, azt az A hangnyomásszintet jelentik, amelyet a vizsgált jelenség A hangnyomásszintje a mérési idő 10, 90 vagy 95%-ban meghalad. A 90%-os szint jó közelítéssel az alapzajnak felel meg, míg a 10%-os A hangnyomásszint nincs messze a csúcserőértéktől.

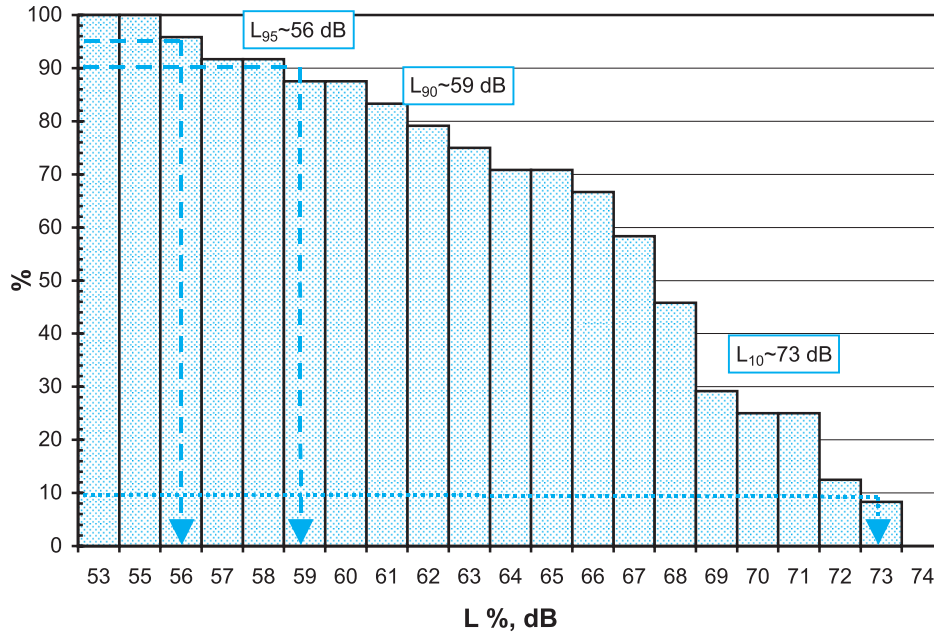
Az 6.5. ábrán látható példa az 6.4. ábrán órák bontásban ábrázolt, egyenértékű A hangnyomásszint időfüggése alapján készült, annak eloszlásfüggvényét, valamint a 10, a 90 és a 95%-os A hangnyomásszintet mutatja be.

6.9. Az L_{AX} zajeseményszint és kapcsolata az egyenértékű A hangnyomásszinttel [II.1]

A gyakorlatban sokszor kell olyan hangjelenséget értékelni, amely a teljes megítélési időnek csak egy rövid szakaszát tölti ki, tehát egyes eseményekhez kapcsolódik. Jellegzetes példa a vasúti és repülési zaj, ahol az értékelendő hangjelenség szerelvények elhaladásakor vagy repülőgépek átrepülésekor jön létre, a közbülső időt más események, tevékenységek által keltett hangjelenség tölti ki, amely az adott értékelésben alapzajnak számít.

Az egyes „események” zajosságára jellemző akusztikai mennyiség a zajeseményszint, célja az adott zajforrás egyenértékű A hangnyomásszintjének meghatározása. Jele L_{AX} , mértékegysége dB, és a (6.6) definíciós képlet értelmezi. Az esemény a t_1 kezdő időpont és a t_2 befejezési időpont között játszódik le, az egyenértékű A hangnyomásszint értelmezéséhez hasonlóan $p_A(t)$ az A súlyozású hangnyomás időfüggvénye, p_0 a vonatkoztatási érték:

$$L_{AX} = 10 \cdot \lg \left(\frac{1}{1 \text{ sec}} \cdot \int_{t_1}^{t_2} \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} dt \right) \quad (6.6)$$



6.5. ábra. A 10%-os, a 90%-os és a 95%-os A hangnyomásszint

Nem az idő szerinti négyzetes középérték, hanem dózis jellegű mennyiség, amely az integrálási idővel növekszik.

Az egyenértékű A hangnyomásszinttel meghatározható kapcsolathoz néhány további részletet ki kell dolgozni.

Az első az alapzaj hatásának figyelembevétele érdekében meg kell határozni az alapzaj L_{AXa} zajesemény szintjét, a t_1-t_2 időtartamnak azonosnak kell lennie a vizsgálandó zajesemény időtartamával. Az alapzajt általában egyenértékű A hangnyomásszintjével, L_{Aeqa} fejezzük ki:

$$L_{AXa} = L_{Aeqa} + 10 \cdot \lg \left(\frac{t_2 - t_1}{1 \text{ s}} \right) \quad (6.7)$$

Az alapzaj és a vizsgált esemény együttes zajesemény szintjéből (L_{AXe}) és az alapzaj zajesemény szintjéből a vizsgált esemény zajesemény szintje, L'_{AX} :

$$L'_{AX} = 10 \cdot \lg (10^{0,1 \cdot L_{AXe}} - 10^{0,1 \cdot L_{AXa}}). \quad (6.8)$$

A vizsgált események átlagos zajesemény szintje, $L'_{AX,R}$, közvetlenül akkor határozható meg, ha az egyes zajesemények időtartama közel azonos. Az egyes események alapzajjal korrigált esemény szintjéből kell kiindulni, az értékelési idő alatti események számát N jelöli, j a futó index:

$$L'_{AX,R} = 10 \cdot \lg \left(\frac{1}{N} \cdot \sum_{j=1}^N 10^{0,1 \cdot L'_{AX,j}} \right). \quad (6.9)$$

Ezen események egyenértékű A hangnyomásszintjét az alapzaj hatása nélkül:

$$L'_{Aeq} = 10 \cdot \lg \left(\frac{1 \text{ s}}{T} \cdot M \cdot 10^{0,1 \cdot L'_{AX,R}} \right), \quad (6.10)$$

ahol az egyenértékű A hangnyomásszint értelmezéséhez tartozó megítélési idő T , az események száma M .

Egy esemény zajesemény szintje és ugyanannak az eseménynek T megítélési időre vonatkozó, egyenértékű A hangnyomásszintje közötti kapcsolatot a (6.11) képlet mutatja, amelyet a (6.2) és a (6.5) összefüggések egyszerű azonosságokon keresztül értelmezéséből lehet levezetni:

$$L_{Aeq} = L_{AX} + 10 \cdot \lg \left(\frac{1 \text{ s}}{T} \right) \quad (6.11)$$

6.10. A közlekedés által okozott környezeti zaj jellemzése [II.6]–[II.9]

A közlekedés által okozott környezeti zaj egészére és annak különböző forrásoktól – légi, vasúti, közúti közlekedés, kisrepülőterek környezete – származó összetevőire minden esetben egyenértékű A hangnyomásszint jellegű mennyiség vonatkozik a 6.1. táblázat szerint. A meghatározás módja attól függ, hogy az okozott zaj folyamatos jellegű (közúti közlekedés), vagy egyes eseményektől származik (vasúti, légi közlekedés). Az adatmegadás vonatkozhat a pillanatnyi, aktuális forgalmi állapotra, valamint a mértékadó forgalmi helyzetre. Az adatmegadás célja állapotfelmérés, határértékhez hasonlítás, hatósági döntés megalapozása, létesítmény hatásának vagy területrendezés eredményének felmérése lehet. Az épületléptékű tervezés során a közlekedés által okozott környezeti zaj a homlokzatot terhelő zaj, amely ellen a határolószerkezeteket méretezni kell.

6.5. táblázat. A közlekedési zaj vizsgálatának és értékelésének rendszere

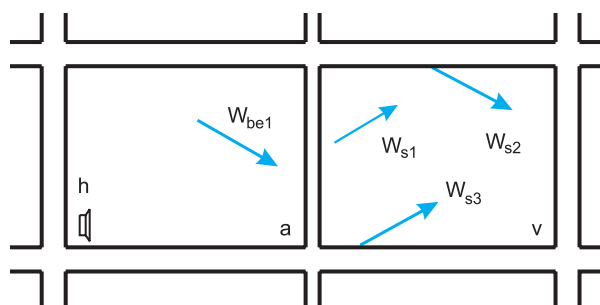
Zajforrás	Jellemzők	Mérendő	Forgalmi helyzet	Forgalom mértékadó A hangnyomásszintje
Közúti közlekedés	Közúti közlekedésből származó mértékadó A hangnyomásszint, $L_{AM, k\ddot{o}}$	Alapzajjal korrigált egyenértékű A hangnyomásszint, L'_{Aeq}	Aktuális forgalom Mértékadó forgalom	$L_{AM, k\ddot{o}} = L'_{Aeq}$ (6.12) $L_{AM, k\ddot{o}} = L'_{Aeq} + K_{\beta\ddot{o}}$ (6.13)
Vasúti közlekedés	Vasúti közlekedésből származó mértékadó A hangnyomásszint, $L_{AM, va}$	Szerelvénytípusonként átlagolt, alapzajjal korrigált zajeseményszint, $L'_{AX,j}$	A forgalmi adatlapban meghatározott forgalom/óra/típus	$L'_{Aeq,j} = L'_{AX,j} + 10 \cdot \lg\left(\frac{1}{3600}\right) + K_{fva}$ (6.14) $L_{AM, va} = 10 \cdot \lg\left(\sum_j 10^{0,1 \cdot L'_{Aeq,j}}\right)$ (6.15)
Légi közlekedés	Repülésből származó mértékadó A hangnyomásszint, $L_{AM, re}$	Repülésiesemény-típusonként átlagolt, alapzajjal korrigált zajeseményszint, $L'_{AX,R,j}$	Mértékadó forgalom a megítélési időre vonatkoztatva	$L'_{AM, re} = 10 \cdot \lg\left(\frac{1}{T} \sum_j M_j \cdot 10^{0,1 \cdot L_{AX,R,j}}\right)$ (6.16)
A közlekedés egésze	A közlekedés egészétől származó mértékadó A hangnyomásszint, $L_{AM, k\ddot{o}}$	–	Aktuális vagy mértékadó	$L_{AM, k\ddot{o}} = 10 \cdot \lg\left(10^{0,1 \cdot L_{AM, k\ddot{o}}} + 10^{0,1 \cdot L_{AM, va}} + 10^{0,1 \cdot L_{AM, re}}\right)$ (6.17)

j szerelvény vagy repülési művelettípus indexe;
 $K_{\beta\ddot{o}}$ közúti közlekedésre vonatkozó, a forgalmi viszonyok hatását kifejező korrekció, ami attól függ, hogy a mértékadó forgalom ismert vagy sem;
 L'_{Aeq} a közúti közlekedés alapzajjal korrigált egyenértékű A hangnyomásszintje;
 K_{fva} vasúti forgalom szerelvényei miatti korrekció, a szerelvények 1 óra alatti számától, hosszától és sebességétől függ;
 $L'_{AX,j}$ vasúti közlekedés egy szerelvénytípusának, vagy légi közlekedés egy repülésiesemény-típusának egyenértékű A hangnyomásszintje;
 M_j a megítélési idő alatt a j -edik repülési műveletcsoportba tartozó repülési események száma

Az előzőek ismereteire támaszkodva a közlekedési eredetű zaj megítélésének rendszerét a 6.5. táblázat foglalja össze.

6.11. Helyszíni léghanggátlási szám és helyszíni súlyozott léghanggátlási szám épületen belül, egymás mellett vagy egymás felett levő helyiségek között (R' , [II.12], R'_w , [II.20])

Épületek helyiségeinek rendeltetésszerű használata során az egyik fajta, a határoló szerkezeteket érő akusztikai terhelés a léghangterhelés. A rádió, tv, hifiberendezés, porszívóműködés, társalgás stb. okozza a mindennapi életben. A helyiségben kialakuló léghang teljesítményt szállít a határolószerkezetre, a teljesítmény részben visszaverődik, részben behatol a szerkezetekbe, rezgésbe hozza őket. A 6.6. ábrán a hangforrás az a helyiségben működ-



6.6. ábra. Elrendezési vázlat helyszíni léghanggátlási szám értelmezéséhez

h hangforrás; a adóhelyiség; v vevőhelyiség; W_{be1} az adó- és vevőhelyiséget elválasztó szerkezetre beeső akusztikai teljesítmény;
 $W_{s1} \dots W_{s3}$ a vevőhelyiségbe az összes határolószerkezet által lesugárzott akusztikai teljesítmény

dik. A szomszédos helyiségbe, akár vízszintes, akár függőleges irányban a teljesítmény egy része különböző terjedési mechanizmusok során átjut, ott lesugárzódik, tehát hang keletkezik. A b helyiség-

ben minden határolószerkezet sugároz hangot, de természetes eltérő mértékben. A két helyiség közötti hangszigetelés minőségi értelemben azt jelenti, hogy az a jelű helyiségben kialakuló hang milyen mértékben jut át a v helyiségbe. A hangszigetelés azonban nem fizikai mennyiség, inkább minőségi jellegű tulajdonság, és elegendő vagy kevés lehet.

A hangszigetelés jellemzésére még az európai országok gyakorlata is többféle akusztikai mennyiséget alkalmaz, a hazai gyakorlatban a helyszíni lég-hanggátlási szám alkalmazása vált általánossá, jele R' , mértékegysége dB, definícióját a (6.18) tartalmazza. Teljesítményviszony, a hangforrást tartalmazó, ún. adóhelyiség és a zaj ellen védendő vevőhelyiség közötti elválasztószerkezet felületére beeső akusztikai teljesítmény, W_{be1} , és a vevőhelyiségbe lesugárzott összes akusztikai teljesítmény ($W_{s1} + W_{s2} + W_{s3} + \dots$) hányadosa. Frekvencia- és szerkezetfüggő, minimálisan a 100–3150 Hz frekvenciasávban, tercsávonként kell vizsgálni és értékelni. Az újabb szabályozás mind a kisebb frekvenciák (63 Hz, 80 Hz), mind a nagyobb frekvenciák (4000 Hz, 5000 Hz) irányában kiterjeszti a vizsgálati és értékelési tartományt:

$$R' = 10 \cdot \lg \left(\frac{W_{be1}}{\sum W_{si}} \right). \quad (6.18)$$

A definíció annyiban tér el a kerülőutak nélküli laboratóriumban mérhető lég-hanggátlási számtól (l. az 5.7. alfejezetet), hogy ott a nevezőben csak az elválasztószerkezet által a vevőhelyiségbe lesugárzott lég-hanggátlási szám szerepel. Ez azt jelenti, hogy a helyszíni lég-hanggátlási szám fogalma nemcsak az elválasztószerkezet, hanem az összes többi szerkezet hatását, az azokon keresztül lezajló hangterjedést is figyelembe veszi. Ezért, ha megkísérelünk választ adni arra a kérdésre, hogy azonos épületszerkezet kerülőutak nélküli laboratóriumban vagy építési helyszínen meghatározható lég-hanggátlási száma lesz-e a nagyobb vagy kisebb, akkor az (5.18) és (6.18) képlet összehasonlítása alapján is, de a jelenségeket nyomon követve is határozott válasz adható: a laboratóriumi lég-hanggátlási szám mindig nagyobb, mint azonos szerkezet helyszíni lég-hanggátlási száma. Az eltérés túllépheti a 8–10 dB-t is, tehát jelentős, de tervezhető.

A vizsgálat hagyományos módja azon a feltételezésen alapul, hogy a helyiségekben diffúz hangtér alakul ki. Ilyen körülmények között bármely határolószerkezet felületére beeső

akusztikai teljesítmény meghatározható a térbeli átlagos hangnyomás effektív értéke négyzetéből, ezt fejezi ki a (6.19) összefüggés, ahol p_{ad0} a hangforrást tartalmazó helyiség térbeli átlagos effektív hangnyomásértéke, S_1 a két szomszédos helyiséget elválasztószerkezet felülete, W_{be1} pedig az elválasztó szerkezet felületére beeső akusztikai teljesítmény. Másrészt a vevőhelyiségbe lesugárzódó összes akusztikai teljesítmény, $\sum W_{s,i}$ meghatározható a térbeli átlagos hangnyomás effektív értékéből, p_{vev0} és a helyiség egyenértékű hangelnyelési felületéből, A_{vev0} , a (6.20) összefüggés szerint. Így a hagyományos méréstechnika keretei között mérhető akusztikai mennyiségekkel kifejezve a helyszíni lég-hanggátlási szám a (6.21) szerint határozható meg.

$$W_{be1} = \frac{p_{ad0}^2}{\rho_L \cdot c} \cdot \frac{S_1}{4}; \quad (6.19)$$

$$\sum_i W_{s,i} = \frac{p_{vev0}^2}{\rho_L \cdot c} \cdot \frac{A}{4}. \quad (6.20)$$

A helyszíni lég-hanggátlási szám a hagyományos méréstechnikára alapozva a (6.21) összefüggés szerint határozható meg. L_{ad0} és L_{vev0} jelenti a zajforrást tartalmazó adóhelyiségben, ill. a vevőhelyiségben az átlagos hangnyomásszintet, S_1 az elválasztó szerkezet felülete, A_{vev0} pedig a vevőhelyiség egyenértékű hangelnyelési felülete. Ha a két helyiséget elválasztó szerkezet a két helyiség felől eltérő méretű, akkor a közös felületrészt kell figyelembe venni.

$$R' = L_{ad0} - L_{vev0} + 10 \cdot \lg \frac{S_1}{A_{vev0}}. \quad (6.21)$$

Miután a helyszíni lég-hanggátlási szám frekvenciafüggő, az értékelésként szükség van egyadatos mennyiségre. Hagyományosan az egyadatos mennyiség a helyszíni súlyozott lég-hanggátlási szám, R'_w , amelyet az 5.14. alfejezetben ismertetett módon kell meghatározni. Az újabb szabványok a súlyozott lég-hanggátlási számon túl a színképillesztési tényezőt is bevezették, amelyről szintén az 5.14. fejezetben volt szó.

Az épületekben vízszintesen vagy függőlegesen szomszédos helyiségek között kialakuló helyszíni súlyozott lég-hanggátlási számot több célból alkalmazzák a gyakorlatban:

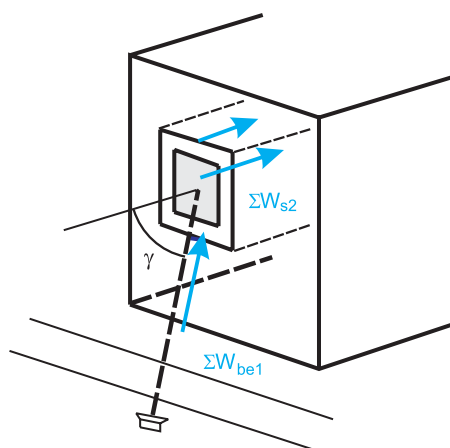
- kifejezi a helyszíni hangszigetelés minőségét lég-hangterhelés esetén;
- a hangszigetelési követelményeket, tehát a minőség minimális értékeit általában a helyszíni súlyozott lég-hanggátlási szám legkisebb értékeként adják meg.

6.12. Homlokzati szerkezetek helyszíni léghanggátlási száma és helyszíni súlyozott léghanggátlási száma (R'_{tr} , R'_y [II.13], R'_{wtr} , R'_{wy} [II.20])

A homlokzati szerkezetek – ablak, erkélyajtó, falazat, nyílások, sorolóelemek stb. – együttes helyszíni léghanggátlási számának a hagyományos mérés-technikát alkalmazó helyszíni vizsgálata mind az épületen kívül, mind pedig a helyiségekben kialakuló hangtérre vonatkozó egyszerűsítő, de jól modellezhető feltételezéseken alapul. A homlokzati szerkezet helyszíni léghanggátlási számát a (6.22) és (6.23) összefüggés határozza meg.

A méréshez alkalmazandó hangforrás és mérőjel gyakorlati megfontolások alapján vagy a helyszínen tapasztalható közlekedés által okozott hangjelenség, vagy mesterséges hangforrás által lesugárzott tercsávú, esetleg oktávsvívú zaj. A 2. fejezet 2.14. ábrája többi között azt is szemléltette, hogy a hangvisszaverő felület előtt kialakuló eredő hangnyomásszint a beeső hullám felületi normálissal bezárt szögétől, tehát a beesési szögtől is függ. A közlekedési zajhoz átlagos beesési szög rendelhető, hangszórós vizsgálat esetén azonban a beesési szög mérési paraméter, bizonyos korlátok között tetszés szerint beállítható. Ezért hangszórós vizsgálat esetén a homlokzat helyszíni léghanggátlási számát R'_γ közlekedéssel végzett vizsgálat esetén pedig R'_{tr} jelöli:

$$R'_{tr} = 10 \cdot \lg \left(\frac{\sum_i W_{be,i}}{\sum_i W_{s,i}} \right) \quad (6.22)$$



6.7. ábra. Elrendezési vázlat homlokzat helyszíni léghanggátlási számának értelmezéséhez, ha a zajforrás hangsugárzó

ΣW_{be1} a homlokzatra beeső akusztikai teljesítmény;
 ΣW_{s2} a zaj ellen védendő helyiségbe lesugárzott összes akusztikai teljesítmény; γ beesési szög

$$R'_\gamma = 10 \cdot \lg \left(\frac{\sum_i W_{be,i}}{\sum_i W_{s,i}} \right) \quad (6.23)$$

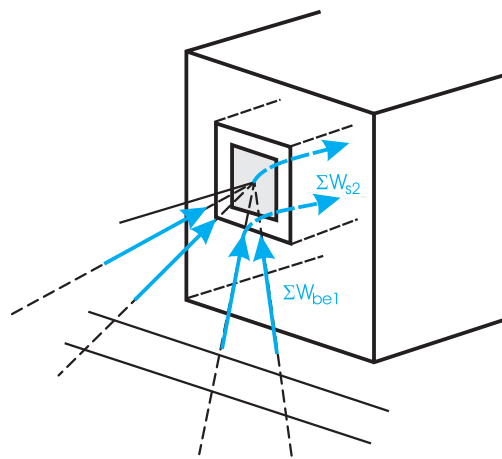
ahol $\Sigma W_{be,i}$ a teljes homlokzati felületre, tehát valamennyi homlokzati elemre a szabad térből beeső akusztika teljesítmény; $\Sigma W_{s,i}$ pedig a helyiségbe valamennyi homlokzati elem által lesugárzott összes teljesítmény.

A vizsgálati elrendezést az 6.7. és az 6.8. ábra mutatja.

A külső teret, akár mesterséges hangforrással, akár közlekedési zajjal történik a vizsgálat, síkhullámú hangtérnek tekintik, mert a hangforrás és a vizsgálandó homlokzat síkja elegendően nagy távolságra van egymástól. Így a hanghullám intenzitása és a mérhető hangnyomás effektívérték-négyzete között a (2.60) összefüggéssel kifejezett kapcsolat van. Ez tehát egyszerű lehetőséget teremt a teljesítmény meghatározására. Ugyanakkor a homlokzat hangvisszaverő hatása miatt lényeges a homlokzat síkja és a mérőmikrofon közötti mérési távolság meghatározása (l. 2. fejezet, 2.14a–d ábra). A legbiztonságosabb megoldás az, ha a külső térben végzendő mérés közvetlenül a homlokzat felületén történik, mert ez esetben a mért eredő hangnyomásszint 6 dB-lel nagyobb, mint szabad hangtérben terjedő síkhullám hangnyomásszintje – a hangnyomás effektívérték-négyzete a felületen négyszerese a szabad térben, visszaverődés nélkül kialakuló hangnyomás effektívérték-négyzetének.

A helyiségben a vizsgálati módszer diffúz hangteret tételez fel, ahol az egyenértékű hangelnyelési felület segítségével lehet kapcsolatot teremteni a térbe bejutó akusztikai teljesítmény és az a hangnyomás effektívérték-négyzete térbeli átlaga között.

Ennek alapján a felületre beeső akusztikai teljesítményt a (6.24), a lesugárzott teljesítményt pedig a (6.25) képlet mutatja:



6.8. ábra. Elrendezési vázlat homlokzat helyszíni léghanggátlási számának meghatározásához, ha a hangforrás vonalas közlekedési létesítmény

ΣW_{be1} a homlokzatra beeső akusztikai teljesítmény;
 ΣW_{s2} a zaj ellen védendő helyiségbe lesugárzott összes akusztikai teljesítmény

$$\sum_i W_{bei} = \frac{p_{külső}^2}{\rho_L \cdot c} \cdot \cos(\gamma) \cdot S \cdot \frac{1}{4}; \quad (6.24)$$

$$\sum_i W_{si} = \frac{p_{belső}^2}{\rho_L \cdot c} \cdot \frac{A}{4}, \quad (6.25)$$

ahol a homlokzat felülete S , γ a beesési szög, a homlokzat felületén az átlagos hangnyomás effektív értéke (felületi átlag) $p_{külső}$, a homlokzat mögötti helyiségben az átlagos hangnyomás-effektívérték (térbeli átlag) $p_{belső}$, az egyenértékű hangelnyelési felület pedig A .

Szintekben kifejezve a homlokzat helyszíni lég-hanggátlási számát végül is a (6.26) adja meg:

$$R'_\gamma = L_1 - L_2 + 10 \cdot \lg \left(\frac{\cos(\gamma) \cdot S}{A} \right) \quad (6.26)$$

ahol L_1 a homlokzat felületén mért átlagos hangnyomásszint; L_2 a helyiségben mért átlagos hangnyomásszint; γ a beesési szög, azaz a hangforrás és a homlokzat geometriai középpontjára állított normális által bezárt szög, S a teljes homlokzat felülete; A a helyiség egyenértékű hangelnyelési felülete.

A [II.13] szabvány a beesési szöget 45° -ban határozta meg, ekkor az összefüggés alakja egyszerű behelyettesítéssel:

$$R'_\gamma = L_1 - L_2 + 10 \cdot \lg \left(\frac{S}{A} \right) - 1,5. \quad (6.27)$$

Közlekedési zajjal végzett vizsgálat során a mérési módszer a helyiséget szintén diffúz hangterűnek tekinti, a külső térben a mérés szintén a homlokzat felületén történik, az átlagos beesési szög pedig 60° , így szintekben kifejezve a lég-hanggátlási szám:

$$R'_{tr} = L_1 - L_2 + 10 \cdot \lg \frac{S}{A} - 3. \quad (6.28)$$

Ha a közlekedés által keltett zaj az idő függvényében változó, akkor mind a külső, mind a belső térben egyenértékű A hangnyomásszintet kell mérni a különböző frekvenciasávokra. Ilyen esetben a mérés szakszerűsége és pontossága szempontjából lényeges feltétel az is, hogy az idő szerinti négyzetes középértéket, azaz az egyenértékű hangnyomásszintet mind a külső, mind az épületen belüli mérési helyeken azonos időben kell képezni.

A lég-hanggátlási szám frekvenciafüggő a hangszórás, mind a közlekedési zajjal végzett vizsgálat során egyaránt, a vizsgálati tartomány legalább a 100–3150 Hz tercsávok által meghatározott frekvenciatartomány. Az utóbbi évek nemzetközi szabványaiban e tartományt mind a kisebb frekvenciák, mind a nagyobb frekvenciák irányában kiterjeszt-

tették (80 Hz, 63 Hz; 4000 Hz, 5000 Hz). Az egyadatos mennyiség a súlyozott helyszíni homlokzati lég-hanggátlási szám, a gerjesztéstől függően $R'_{w\gamma}$, R'_{wtr} , amelyet az 5.14. fejezetben elmondottak szerint kell meghatározni. A színképillesztési tényező értelmezését és meghatározását szintén az 5.14. fejezet tartalmazta.

A helyszíni súlyozott homlokzati lég-hanggátlási számot a gyakorlatban több célból alkalmazzák:

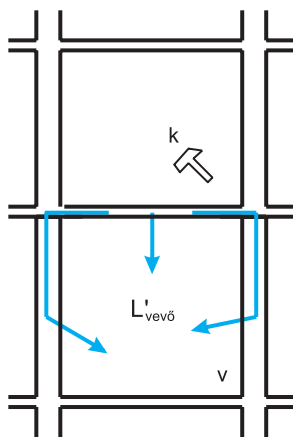
- számszerűsíti a homlokzat helyszíni eredő lég-hangszigetelését;
- a homlokzatra vonatkozó helyszíni hangszigetelési követelmény – amely a homlokzatot terhelő közlekedési zajtól függ – a helyszíni súlyozott homlokzati lég-hanggátlási szám legkisebb megengedhető értékét, tehát a minőség minimumát írja elő;
- a követelmény vagy az annál jobb minőséget kifejező, tehát nagyobb számérték az akusztikai tervezés számszerű céljaként alkalmazható.

6.13. Helyszíni szabványos lépéshangnyomásszint és súlyozott helyszíni szabványos lépéshangnyomásszint (L'_n [II.15], L'_{nw} [II.21])

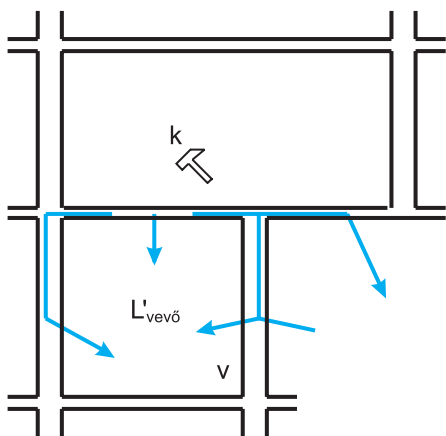
Egymás felett levő, teljes egészében vagy csak részlegesen szomszédos helyiségek, vagy átlósan elhelyezkedő helyiségek közötti lépéshang elleni szigetelést a frekvenciafüggő helyszíni szabványos lépéshangnyomásszint, ill. egyadatos mennyiségként a súlyozott helyszíni szabványos lépéshangnyomásszint fejezi ki. A helyszíni szabványos lépéshangnyomásszint értelmezése a födémszerkezethez, a lépcsőkarhoz, a lépcsőházi pihenő födéméhez, valamint az összes egyéb csatlakozó- és átmenőszervezethez kapcsolódik. A vizsgálati elrendezésekre az 6.9.–6.11. ábrák mutatnak példákat.

Az ábrák arra a fizikai sajátosságra is utalnak, hogy helyszíni körülmények között a zaj ellen védendő helyiségben – vevőhelyiség – több határoló-szerkezet is hangot sugároz. A hangforrást, azaz a kopogógépet itt is kalapács jelzi.

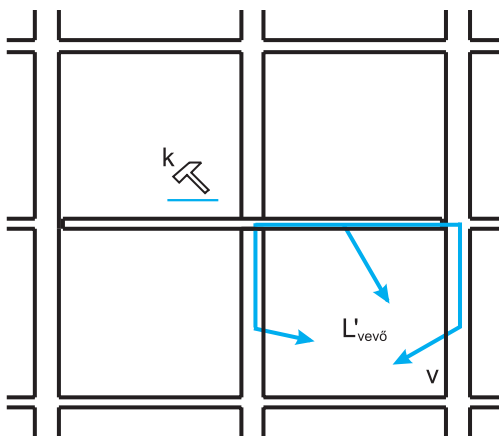
A keletkező lépéshangnyomásszint, $L'_{vevő}$ a födémről, a burkolatoktól, a csatlakozó-szerkezetektől, valamint a vevőhelyiség egyenértékű hangelnyelési felületétől függ. Ez utóbbi függést a kialakult gyakorlat szerint 10 m^2 egyenértékű hangelnyelési felületre kell normalizálni. Ha az egyenértékű hangelnyelési felület 10 m^2 -nél nagyobb, a normalizálás a mérési eredményt növeli, ha kisebb, csökkenti, így az eredmény az az értékek, ami 10 m^2 elnyelésű he-



6.9. ábra. Helyszíni szabványos lépéshangnyomásszint értelmezése, ha a két helyiség egymás felett található
 k kopogógép; v vevőhelyiség; $L'_{vevő}$ a kopogógép működése közben a vevőhelyiségben kialakuló átlagos sávhangnyomásszint



6.10. ábra. Helyszíni szabványos lépéshangnyomásszint, ha a két, egymás felett levő helyiség eltérő alapterületű



6.11. ábra. Helyszíni szabványos lépéshangnyomásszint átlós elhelyezkedésű helyiségkapcsolat esetén

lyiségben lenne. Így jön létre a szabványos L'_n lépéshangnyomásszint:

$$L'_n = L'_{vevő} + 10 \cdot \lg \left(\frac{A_{vevő}}{10} \right). \quad (6.29)$$

A vizsgálati frekvenciatartomány legalább a 100–3150 Hz tercsávok által meghatározott tartomány. Az utóbbi időben e tartományt mind a kisebb, mind a nagyobb frekvenciák irányába kiterjesztették (80 Hz, 63 Hz; 4000 Hz, 5000 Hz).

Az egyadatos mennyiséget, azaz a súlyozott helyszíni L'_{nw} szabványos lépéshangnyomásszintet, valamint a szinképpillesztési tényezőt az 5.15. alfejezetben elmondottak szerint kell értelmezni és meghatározni.

A súlyozott helyszíni szabványos lépéshangnyomásszint többféle célt szolgál:

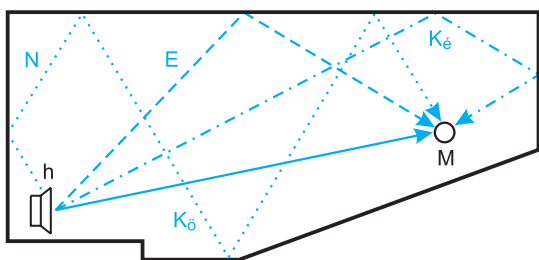
- helyszíni körülmények között számszerűsíti a lépéshangszigetelés minőségét;
- a lépéshangszigetelésre vonatkozó követelményeket a súlyozott helyszíni szabványos lépéshangnyomásszintben fejezik ki, a minőség minimuma a legnagyobb megengedhető számértéket jelenti;
- a követelmény – vagy esetleg annál jobb minőséget kifejező, tehát kisebb számérték – az akusztikai tervezés számszerű céljaként is alkalmazható.

6.14. Utóengési idő helyiségekben [II.26]

Termek dinamikai tulajdonságait egyetlen adatként – elsősorban kisebb térfogatú terek, pl. osztályterem, előadóterem mintegy 1000 m³ térfogatig, mind a tervezés, mind a szubjektív tapasztalatok szempontjából elfogadhatóan jellemzi a T_{rev} utóengési idő, mértékegysége a másodperc (s). A dinamikai tulajdonság azt jelenti, hogy a hangforrástól – beszélő, hangsugárzó, hangszer – a helyiségben kialakuló hangnyomás milyen mértékben követi a hangforrás által lesugárzott teljesítmény változásait.

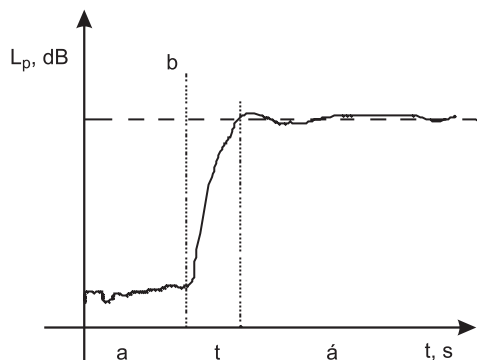
A rezgőrendszerekben a bekapcsoláskor és a kikapcsoláskor lezajló tranziens egymással összefügg, ezért elegendő az átmeneti állapotot vizsgálni a kikapcsolás alatt. A hagyományos mérés technika és a jelenségek és alapvető törvényszerűségek empirikus megismerése is erről az oldalról indult el.

A 6.12. ábra előadóterem sematikus metszetét mutatja, itt h a hangforrás, M pedig a megfigyelés, a mikrofon helye. A hangforrástól a mikrofonig a hang közvetlen úton, tehát hangvisszaverődések nél-



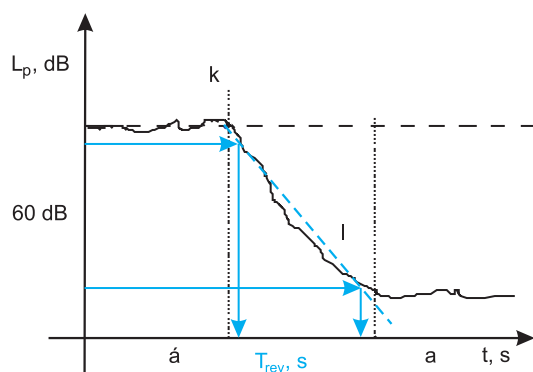
6.12. ábra. Hangterjedési utak szemléltetése

h hangforrás; M megfigyelési, éresi hely; $Kö$ közvetlen hang; E hangterjedési út egyszeres visszaverődési úttal; $Ké$ hangterjedési út kétszeres visszaverődési úttal; N hangterjedési út négyszeres visszaverődési úttal



6.13. ábra. Bekapcsolási transziens: hangnyomásszint az idő függvényében

a alapzaj; b a hangforrás bekapcsolás időpontja; t a bekapcsolást követő átmeneti állapot; $á$ állandósult állapot



6.14. ábra. Kikapcsolási transziens: hangnyomásszint az idő függvényében

$á$ állandósult állapot; k a hangforrás kikapcsolásának időpontja; l lecsengési folyamat; a alapzaj

kül (K), egyszeres (E), kétszeres (K) és többszörös, a példán négyszeres (N) visszaverődésekkel érkezik. Ezekre egy-egy példát mutat a 6.13. ábra.

A modellben kiindulóállapotban a hangforrás ki van kapcsolva, ilyenkor a teremben csak az alapzaj tapasztalható. Bekapcsolás után – a legrövidebb hangterjedési út miatt – először a közvetlen hang érkezik az M megfigyelési helyhez, majd az egyszeres és többszörös visszaverődések után a különböző hangterjedési utak hatása tapasztalható. Az al-

kalmazott közelítésben a hangterjedésnek részben a geometriai, részben a statisztikus közelítése alapján az egyes visszaverődések megérkezése között időkülönbségek lesznek, az egyes hullámösszetevők által szállított teljesítmény összeadódik. Így alakul ki az állandósult állapot, amikor a terembe bevitt akusztikai teljesítmény megegyezik a határoló-szerkezeteken, bútorzaton, személyeken stb. elnyelődő akusztikai teljesítménnyel. A kismértékű ingadozás az állandósult állapotban azért jelenik meg az ábrán, mert a hangforrás a modellben zajjelet sugároz le a terembe (fehérzaj, rózsazaj vagy sávzaj).

Az 6.14. ábra a kikapcsoláskor lezajló folyamatot szemlélteti. A bejelölt időpontban a hangforrást kikapcsolják. A mérés helyén ekkor először a közvetlen hangterjedési úton érkező teljesítményrész marad el, majd a terjedési utak hosszának függvényében fokozatosan a többi teljesítményrész is. Végül a teremre jellemző alapzaj lesz csak megfigyelhető. A hangnyomásszintnek ezt a fokozatos csökkenését *lecsengési folyamatnak* nevezik. A lecsengési folyamat grafikus képe ideális esetben (ideális diffúz hangtér vagy olyan rendszer, amelyben csak egy sajátfrekvencia van) az idő-hangnyomásszint koordináta-rendszerben egy egyenes. Az adott példában a rendszer sok szabadságfokú, sok sajátfrekvenciája van, amelyekhez az állandósult állapotban tartozó hangnyomásszintek eltérő nagyságúak. Ezért a lecsengési folyamat nem lesz egyenes, azonban a tényleges lecsengés idő függvényére egyenes illeszthető. Ezt az ábra szaggatott vonallal jelöli.

A T_{rev} utózengési idő 60 dB hangnyomásszint-csökkenéshez tartozó időtartam az ábra szerint. Ez a csökkenés szubjektív benyomás szerint közelítőleg a hangjelenség teljes elhalkulásának felel meg.

Az utózengési idő értelmezhető térbeli átlagként is, vagy a különböző megfigyelési helyeken külön-külön is. Az utózengési idő a terem fontos akusztikai paramétere, amely egyszerűbb geometria és kisebb helyiségtérfogat esetében mind a tervezés, mind az ellenőrzés szempontjából a szükséges mértékig jellemzi a terem dinamikai tulajdonságait. Nagyobb méretű, összetettebb geometriájú termeknél az utózengési időn túl más paraméterek ismeretére is szükség van, és a tervezés, ellenőrzés is összetettebb feladat.

A hazai gyakorlatban a terek visszhangosságára, utózengési idejére nincs kötelező vagy szabványos előírás, ajánlás. A külföldi szabályozási gyakorlatban azonban vannak ilyen jellegű előírások, pl. lépcsőházak és közlekedőterek, tantermek, előadótermek, hangosított terek esetében.

7.

A KÖRNYEZETI ZAJ HATÁSA AZ EMBERRE. AKUSZTIKAI KÖVETELMÉNYEK

7.1. A környezeti zaj hatása az emberre

7.1.1. A hangjelenségek és az ember kapcsolata

A környezetben folyó tevékenységeknek, folyamatok sok egyéb hatás mellett hanghatásuk is van. A hang erőssége, a hangnyomásszint frekvencia-jelleggörbéje, a hangot keltő folyamat, ill. tevékenység időbeli és „technológiai” sajátosságaitól, a hangterjedés fizikai folyamataitól függ. Az ember, mint biológiai lény és mint társadalmi lény a saját környezetében kialakuló hangjelenségre sokféle módon reagálhat. Válasza csak részben függ a hangjelenség fizikai jellegzetességeitől. Jelentős az ember és a hangkeltési folyamat, az ember és a hangjelenség közötti szubjektív kapcsolat szerepe, az ember biológiai állapota, valamint a hangjelenség alatt folyó emberi tevékenység is.

A hangjelenségek emberre gyakorolt hatásának sokféleségéről számos példa, vizsgálat és eredmény született. Közülük csupán a szemléltetés érdekében bemutatunk egy-egy jelenséget, hatást és a felmérésorozatok egyes eredményeit. Ezekben a jelenségek és a különféle akusztikai követelmények között szoros kapcsolat van, természetesen egy-egy határértékekhez nem elég egy példa. A követelmények, a tervezési célok igen sok adatot, szisztematikus vizsgálódást igényelnek.

Az ember környezetében kialakuló hangjelenségek és a környezetben élő, dolgozó, pihenő emberek közötti kölcsönhatások miatt a következő hatásokat kell számba venni:

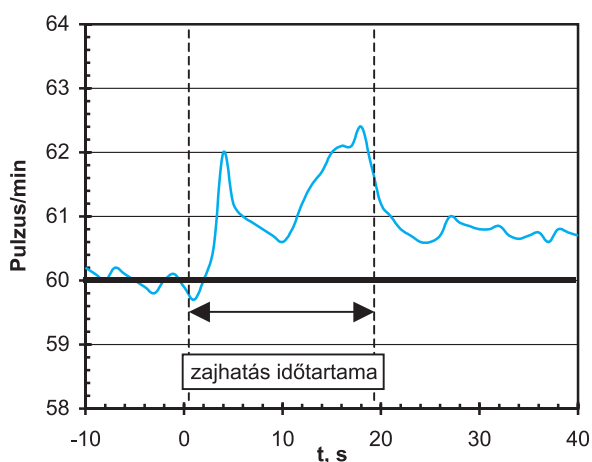
- a hangjelenségek hatása az ember élettani folyamataira rövid távon és hosszú távon egyaránt;
- alvászavarás;
- beszéd-kommunikáció- és szövegértés-zavarás;
- általános zavaró hatás;
- teljesítőképesség-csökkenés környezeti zaj hatására;
- halláskárosodás.

Az általános zavaró hatásokat elsősorban a közlekedési eredetű zajokon tanulmányozzák, hiszen a közlekedés a legelterjedtebb zajforrás. Olyan helyiségekben és termekben (lakószoba, tanterem, tárgyaló, irodai munkahely stb.), amelyekben emberek okozta hangjelenségek vannak, az alapzaj és az utózungési idő hatásának együttes mérlegelése is fontos. A használat szempontjából a terek visszhangossága miatt keletkező hangjelenség szintén zavaró hangjelenség, tehát zaj.

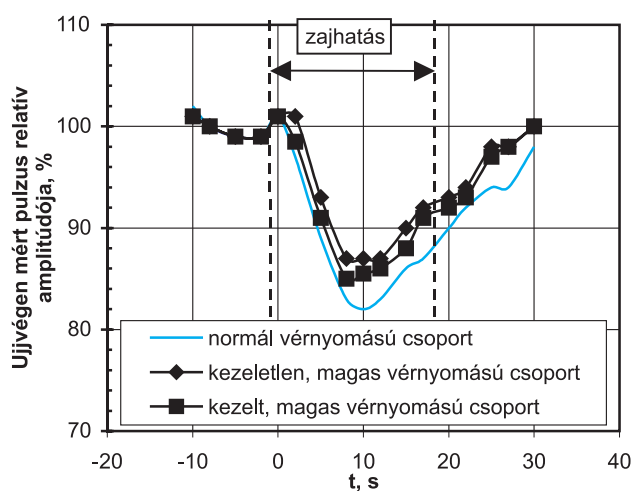
A zavaró hangjelenségek, tehát a zaj egyik forrása a szomszédos helyiségekből áthallatszódo beszéd. Ebben az esetben nem a jó kommunikáció, hanem ennek ellentéte, a szeparáltság létrehozása a cél. A szeparáltság kétirányú, egyszerűen és kissé pontatlanul fogalmazva egy helyiség használója nem akarja a szomszédot hallani, de azt sem akarja, hogy őt a szomszéd hallja...

7.1.2. A környezeti hangjelenségek közvetlen, rövid távú hatása az ember élettani folyamataira

A környezeti hangjelenségek a hatóideje alatt közvetlenül befolyásolják, módosítják a hangjelenséget érzékelő emberek élettani állapotát. A létrejövő változások rövid távon, ébrenléti állapotban többek között a pulzus, a vérnyomás, a pupillaméret vagy a bőr ellenállás-változásában figyelhetők meg. Mérhető az erek összeszűkülése is. Laboratóriumi körülmények között – pl. modellmérések [7.1] keretében – kimutatták, hogy hangjelenség hatására megváltozik a pulzus. A mérőjel rózsazaj, közlekedési zaj vagy mesterségesen előállított impulzus zaj volt, egyenértékű A hangnyomásszintje 62–80 dB között változott. Tendencia jellegű eredmény látható a 7.1. ábrán. Ugyanezen kísérletsorozat keretében születtek eredmények a mérőjelek pulzus-amplitúdóra gyakorolt hatásáról is, amelynek tendencia jellegű eredménye a 7.2. ábrán látható. A három kísérlet-



7.1. ábra. Pulzusváltozás zaj hatására [7.1]



7.2. ábra. Pulzusamplitúdó-változás zaj hatására [7.2]

ből az is megfigyelhető, hogy a személyek egészségi állapota (a példában normál vérnyomás, kezeletlen magas vérnyomás, kezelt magas vérnyomás) szintén befolyásolja az eredményt.

Az alapállapothoz képesti változások más jellemzőkben is megfigyelhetők, módosulhat zaj hatására a vérben egyes hormonok koncentrációja, és többek között a magnézium- és kalciumionok aránya is.

Az alvási állapotban létrejövő változásokat és hatásokat fontosságuk miatt a 7.1.4. pontban külön tárgyaljuk.

7.1.3. A környezeti hangjelenségek hosszú távú hatása az emberre [7.2], [7.3]

Részben a munkahelyeken, részben a közlekedési zajnak tartósan kitett helyeken a zajos környezetben – és kontrollcsoportokban – dolgozók körében

végzett vizsgálatok, felmérések szerint a környezeti zaj, egy bizonyos szint érték felett az ember biológiai állapotára hosszú távú, halmozódó hatást gyakorol. A hatás számos szervi megbetegedés kialakulásának felerősödésében figyelhető meg. Tehát a kapcsolat nem kizárólagos jellegű, hanem más hatások következtében kialakuló tendenciák felerősítésében jelenik meg.

A felmérések több betegcsoporttal mutattak ki szorosabb, lazább kapcsolatot akkor, ha a környezetben – lakás, munkahely, szórakozóhely, közlekedési terület stb. – a hangjelenség meghaladta a napi átlagra vagy az ébrenléti periódusra vonatkozó, 65 dB egyenértékű A hangnyomásszintet. Egyértelmű kapcsolat mutatható ki a magas vérnyomás kialakulásával, az isémiás jellegű szívbetegségekkel, az érszűkület létrejöttével. A pszichofiziológiai hatások számszerű eredményei még nem fordíthatók át határértékekre, azonban bizonyított a kapcsolat többi között a stresszhormonok fokozott termelődésével, a vér magnéziumszintjével, egyes immunológiai jelzőanyagok megjelenésével.

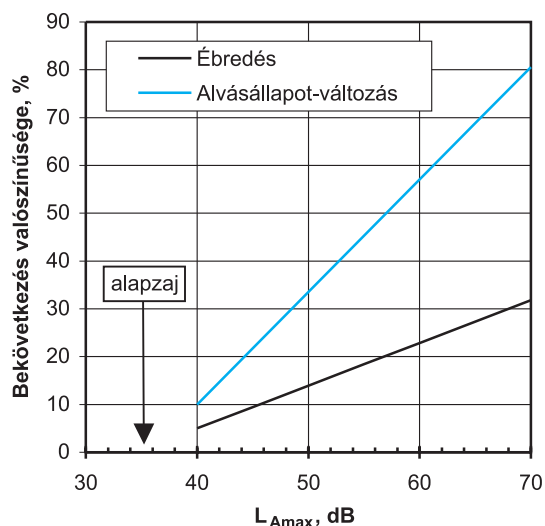
7.1.4. A környezeti hangjelenségek hatása az alvásállapatra [7.3] [7.5]

A hangjelenségek alvásállaputra gyakorolt hatását részben kérdőíves felmérésekkel, részben „laboratóriumi” kísérletek keretében vizsgálják és értékelik. Az alvásállapot-változás azt jelenti, hogy az elalvástól kezdődően a személyek különböző alvási fázisokon mennek keresztül. E a fázisokhoz eltérő jellegű EEG-hullámok tartoznak, az agyban lejátszódó folyamatok is eltérők, a kísérő jelenségek – pupillamozgás, spontán mozdulatok – is jellemzőek. A környezeti zaj hatása ezen állapotok változásában is megfigyelhető.

Elsődleges hatásként egyértelműen igazolható, hogy hangjelenségek hatására alvás közben megváltozik a vérnyomás, a pulzus, az alvási állapot, a különböző agyhullámok jellege és megjelenése, gyakoribbá válik a felébredés, nehezebbé válik az elalvás, megnő az alvás közbeni testmozgások száma. A hatások a hangjelenség nagyságától, időtartamától, valamint a csúcserkékek nagyságától, számától és időtartamától függenek.

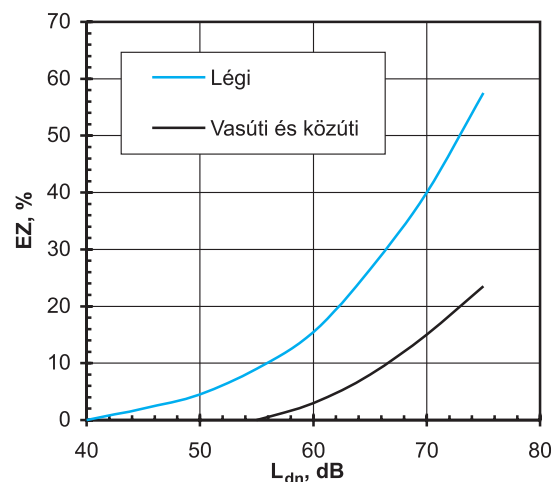
A zavart alvás hatása a másnapi hangulatban, teljesítőképességben is megjelenik, de hosszú távú hatása is van az ember egészségi állapotára.

A kiterjedt felmérések eredménye a [7.3] összefoglaló szerint azt mutatja, hogy folyamatos, elsősorban közlekedési eredetű zaj esetén az alvász-



7.3. ábra. Alvásállapot-változás és felébredés teherautó elhaladása okozta hangjelenség hatására [7.3]

L_{Amax} a teherautók elhaladásakor keletkező hangjelenség A hangnyomásszintjének legnagyobb értéke



7.4. ábra. Közlekedési zaj zavaró hatása [7.6]

L_{dn} a 24 órás környezeti zajjellemző (l. a 6. fejezetet); $EZ\%$ a felmérésben részt vevők közül azoknak a %-ban kifejezett aránya, akiket a közlekedési zaj erősen zavar

varás határa 30 dB egyenértékű A hangnyomásszint. Időben változó hangot keltő egyes események legnagyobb A hangnyomásszintje 45 dB lehet addig, amíg az alvást nem zavarja.

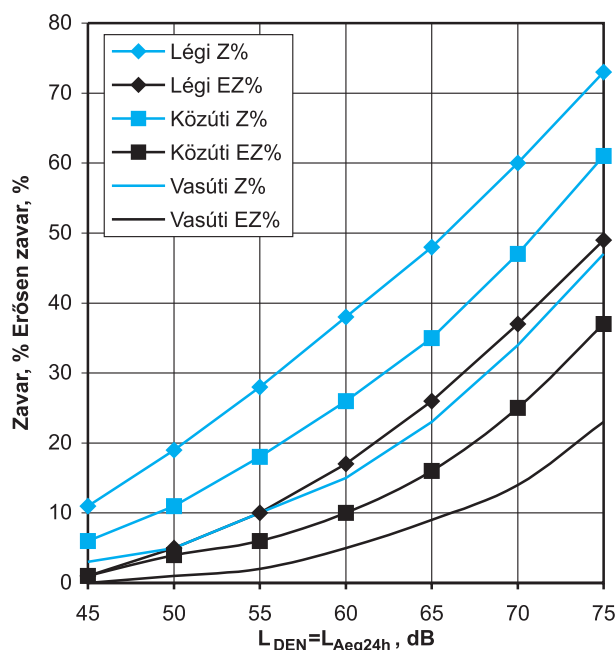
A 7.3. ábra a [7.3] irodalom nyomán pl. azt mutatja, hogy teherautó elhaladásával keltett hangjelenség által okozott alvásállapot-változásnak, ill. a felébredésnek mi a valószínűsége. A hangjelenséget az elhaladási csúcsérték jellemzi. Kimutatták, hogy 45 dB elhaladási csúcsértékhez a felébredés valószínűsége mintegy 10%, az alvásállapot-változás valószínűsége pedig mintegy 23%.

7.1.5. A közlekedési zaj zavaró hatása

A közlekedési zaj zavaró hatásának megismerése a jelenség széles körű kiterjedtsége miatt nagyon rég óta kutatások célja. A felmérések sok ország több városára terjedtek ki, egyebek mellett részletesen elemezték a különböző közlekedési módok (légi, vasúti, közúti közlekedés) közötti eltéréseket is. A környezeti zaj nagyságát épületen kívül végzett mérésekből határozták meg, ennek alapvetően gyakorlati okai vannak. A lakossági reakciókat kérdőíves felmérésekkel derítették fel.

A 7.4. ábrán a [7.6] alapján a légi közlekedés, ill. a közúti és vasúti közlekedés (együttesen földi közlekedés) zavaró hatásának összefoglalása található. A cikk egyébként a [7.7] cikkre adott válasz és az abban található felülvizsgálata. A választott zajjellemző az L_{dn} , 24 órás feldolgozások eredménye (a fogalomról l. a 6. fejezetet). Az eredmények több európai és

amerikai városban végzett vizsgálatokból származnak, időbeli átfogásuk több, mint 10 év. A zavarás mértékét általában százalékos skálán értékelték, a mérsékelt zavarás a skálán a 40–60%-os tartományt, az erősen zavaró a 60–80%-os tartományt, míg a szélsőségesen extrém zavaró kategória az értékelés felső 20%-os tartományát foglalta el. Az ábrából látható,



7.5. ábra. Közlekedési zaj zavaró hatása [7.7]

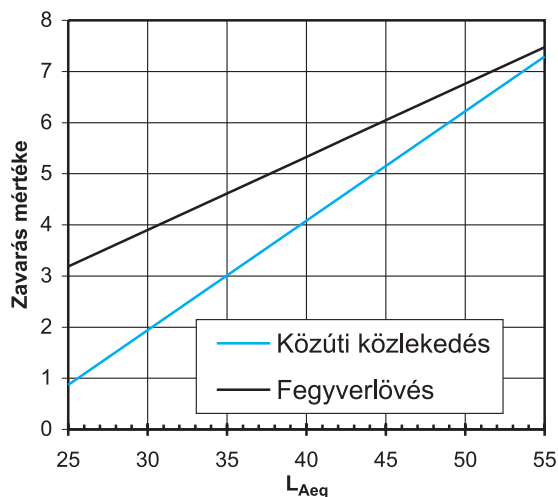
L_{DEN} , L_{Aeq24h} 24 órás egyenértékű A hangnyomásszint (l. a 6. fejezetet); $Z\%$, $Zavar\%$ a kísérletben részt vevő személyek közül azok százalékos aránya, akiket az adott hangjelenség zavar; $EZ\%$, $Erősen zavar\%$ a kísérletben részt vevő személyek közül azok százalékos aránya, akiket az adott hangjelenség erősen zavar

hogy az $L_{dn} = 70$ dB határ a földi közlekedés hatásterületén élők legalább 15 %-át, míg a légi közlekedésnek kitett területen élők legalább 40%-át erősen zavarja. Tehát a légi közlekedés okozta zaj sokkal zavaróbb, mint a földi közlekedés által okozott.

Hasonló céllal végeztek kiterjedt vizsgálatokat az elmúlt években az Európai Unió országaiban. Zajjellemzőként az L_{DEN} 24 napi megítélési szintet választották, amely kisebb mértékben eltérő eredményt ad, mint L_{dn} , az eltérés azonban pl. közúti közlekedésre 1 dB-nél kisebb. Az eredmények összefoglaló értékelésének [7.7] grafikonja a 7.5. ábrán látható. Világos tendenciák figyelhetők meg az eredményekből: a vasúti zaj zavarja viszonylag a legkevesebb embert, a légi közlekedés által keltett zaj pedig a legtöbb embert, azonos L_{DEN} értékek mellett. E tendencia úgy is kifejezhető, hogy a a közösség szempontjából leginkább a légi közlekedés által keltett hangjelenség a zavaró.

7.1.6. Az impulzusos jellegű zaj hatása

Általános szakmai tapasztalat mutatja, hogy az impulzus jellegű hangjelenség zavaró hatása, halláskárosodást okozó hatása nagyobb, mint az azonos egyenértékű A hangnyomásszinttel rendelkező folyamatos hangjelenség. Ez úgy jelenik meg pl. a



7.6. ábra. Közúti közlekedés és fegyverműködés által keltett zaj zavaró hatásának összehasonlítása [7.8]

hangjelenségek értékelésében, hogy az impulzus jellegű zajt az egyenértékű A hangnyomásszinthez képest kiegészítő, korrekciós tényezőkkel teszik hangsúlyosabbá.

Az impulzus jellegű hangjelenségek erőteljesebb zavaró hatása figyelhető meg példaként a 7.6. áb-

rán összefoglalt kísérleti eredményen is, a [7.8] alapján. Közlekedési okozta hangjelenségek és fegyverek működése okozta hangjelenségek zavaró hatását hasonlították össze. A zavarás mértékét e vizsgálat sorozatban 1–8-ig terjedő skálán fejezték ki, laboratóriumi körülmények között végzett, kifejezetten összehasonlító vizsgálatok keretében. Az alkalmazott jelszintek inkább szobai, mint külső térbeli körülményeknek feleltek meg.

Az ábra azt a világos tendenciát mutatja, hogy az impulzus jellegű hangjelenség lényegesen zavaróbb, mint a folyamatos hangjelenség. A kis hangnyomásszintek tartományában az azonos mértékű zavaráshoz mintegy 10 dB szintkülönbség, a nagyobb hangnyomásszintek tartományában pedig 6–7 dB szintkülönbség tartozik, ami meggyőző eltérést jelent.

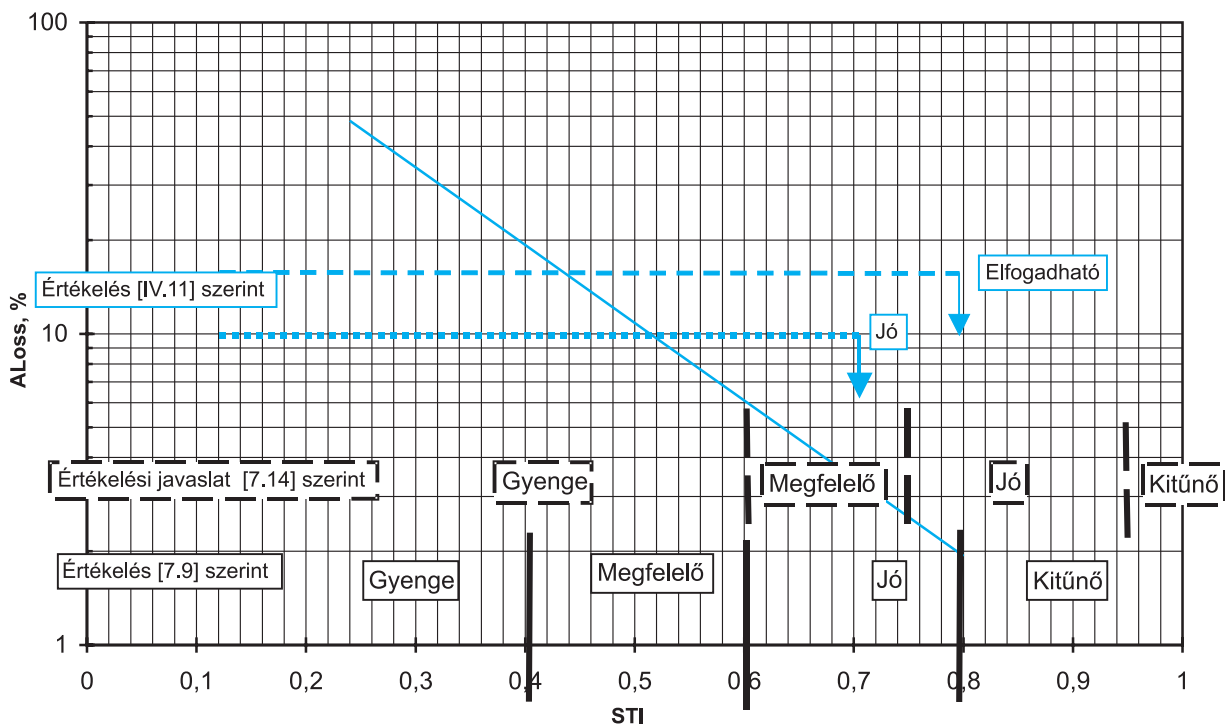
7.1.7. A környezeti zaj hatása a teljesítőképességre

Széles körben végzett felmérések (ismereteink jelenlegi szintjén) megerősítik azt a minőségi jellegű, de számszerűen még nem kellően alátámasztott megállapítást, hogy a zajos környezet nehezíti a szellemi tevékenység végzését. Ennek egyik jellegzetes példáját egyes repülőterek környezetében levő iskolákban végzett felmérések adják (pl. a müncheni vagy a los angelesi repülőtér környezetében). A tanulással járó összetett szellemi folyamatokban is, egyes elemi tanulási feladatok megoldásában is nehezítő tényezőként jelent meg a zaj. Ez megmutatkozott a folyamat alatti megemelkedett vérnyomásban és stresszhormonszintben is.

7.1.8. Az alapzaj és az utózengetési idő hatása a szövegértésre, helyiségekben

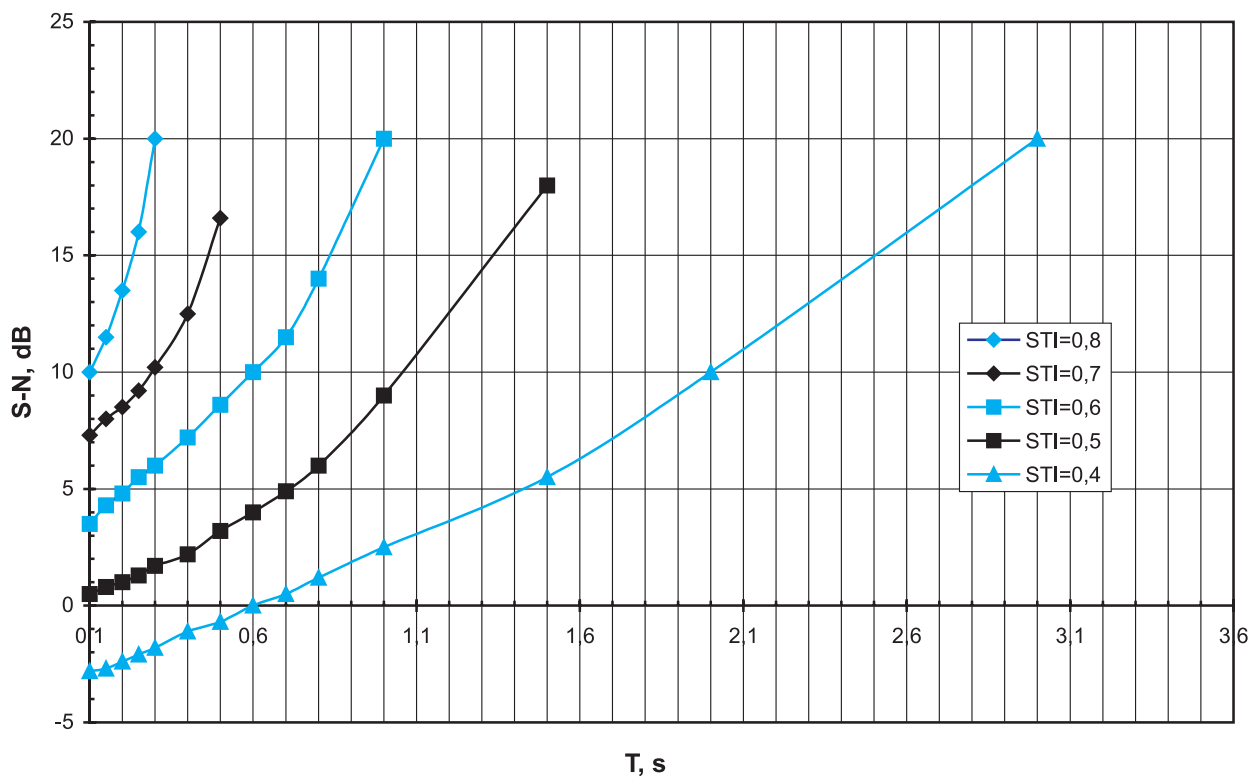
Kiterjedt felmérések alapján beszéd célú termekben (tanterem, lakóhelyiségek, tárgyalók stb.) a kommunikáció minősége, azaz a beszéd megértése alapvetően két tényezőtől, a helység alapzajától és utózengetési idejétől együttesen függ.

A 7.7.–7.8. ábrák angol nyelvű beszéd vizsgálatán és értékelésén alapulnak [7.9], [7.14], [7.15]. Előadótermekben a szóbeli kommunikáció szubjektív vizsgálatának hagyományos módja a beszéd érthetőségének vizsgálata és értékelése. Történhet értelmes szavakkal vagy a vizsgált nyelv hangzókészletét, hangzását visszatükröző értelmetlen szavakkal. Értékelhető a szótagok, szavak vagy akár a más-salhangzók helyes megértése. Az eredmények több formában adhatók meg:



7.7. ábra. A kommunikáció minősége a mássalhangzók artikulációs veszteségével ($ALoss\%$) és a beszédátviteli tényezővel (STI) kifejezve [7.9] [7.14], [7.15] és [IV.11] alapján

A [IV.11g]-ben található értékelés, tervezési cél $ALoss$ szükséges értékét adja meg; a többi hivatkozás STI alapján értékkel, de [7.9] alacsonyabb követelményt állít, mint [7.15]



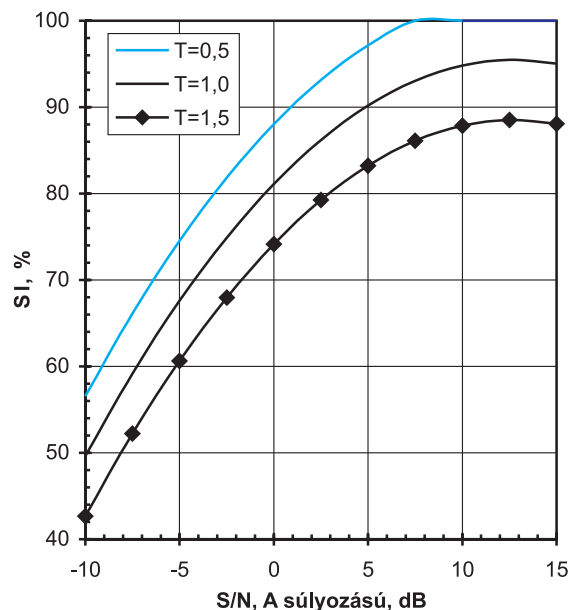
7.8. ábra. A kommunikáció minőségének kapcsolata az utózengési idővel és a terem jel-zaj viszonyával [7.9] és [7.14] alapján

- a helyesen felismert szótagok, szavak vagy esetleg mássalhangzók és a teljes szöveg arányának %-ban kifejezett nagysága, ez az érthetőség;
- a hibásan, tévesen felismert szótagok, szavak vagy mássalhangzók és a teljes szöveg arányának %-ban kifejezett nagysága, ez az artikulációs veszteség.

A 7.7. ábra a szubjektív beszédérthetőség-vizsgálat eredményének, a mássalhangzók artikulációs vesztesége, Articulation Loss of consonants: $ALoss$ %-os értékei és egy lehetséges, számítható kommunikációs jellemző, a beszédátviteli tényező, Speech transmission Index: STI közötti kapcsolatot mutatja be. A két mennyiség között a kapcsolat a lin-log skálán egyenest mutat, hatványfüggvény. A kitűnő minőségű beszédérthetőség megfelelő mértéke a különböző szerzőknél $ALoss$ -ban kifejezve 10–15%, STI -ben kifejezve 0,8–0,95 között van. A beszédátviteli tényező egyébként általánosan elfogadott, mérhető jellemző [I.17], amelynek egyszerűsített mérési módszere az ún. RASTI-módszer.

A terem T közepes utózengési idejével és a beszéd-alapzaj viszonyt kifejező jel-zaj viszsonnyal (jele $S-N$, mértékegysége dB, a beszéd és az alapzaj A hangnyomásszintjeinek különbsége) kifejezhető kapcsolatot a 7.8. ábra mutatja számítások alapján. A vízszintes tengelyen az utózengési idő, a függőleges tengelyen pedig a beszéd és az alapzaj közötti jel-zaj viszony szerepel. Általában minél kisebb a jel-zaj viszony, tehát minél kisebb a beszéd és az alapzaj A hangnyomásszintjei között a különbség, annál kevesebb lehet az utózengési idő. Az ábra szerint pl. a megfelelő vagy más értékelés szerint jó minőségű beszédkommunikációhoz az $STI=0,7$, ehhez reálisan legalább 10 dB jel-zaj viszony szükséges, és az utózengési idő nem lehet 0,5 s-nál nagyobb. Ha az $ALoss < 10\%$ feltétel elérése a cél, akkor ehhez $STI > 0,52$ feltétel adódik. Ez azonban [7.15] szerint már nem éri el a megfelelő kommunikációs minőséget.

A [7.10] cikk mérés és számítások, valamint többváltozós regressziós elemzés eredményeként talált összefüggést a termék 1000 Hz-es oktávsvámban mérhető utózengési ideje, a terem A súlyozású S/N jel-zaj viszonya és az STI beszédérthetőség között. A közepes méretű termekre ($V \sim 300 \text{ m}^3$) vonatkozó eredmény a 7.9. ábrán látható. Az ábra azt sugallja, hogy beszéd célú termekben a lehető legkisebb utózengési idő a legkedvezőbb. A jó kommunikációhoz a beszédérthetőségnek legalább 0,85-nek, inkább 0,9-nek kell lennie, ezt az 1,5 s utózengési idővel alig lehet elérni. Az is megfigyelhető, hogy legalább 10 dB jel-



7.9. ábra. A beszédérthetőség és a jel-zaj viszony kapcsolata különböző utózengési idők esetén

SI a százalékos beszédérthetőség, T az utózengési idő, S/N a beszéd egyenértékű A hangnyomásszintje és az alapzaj egyenértékű A hangnyomásszintje közötti különbség

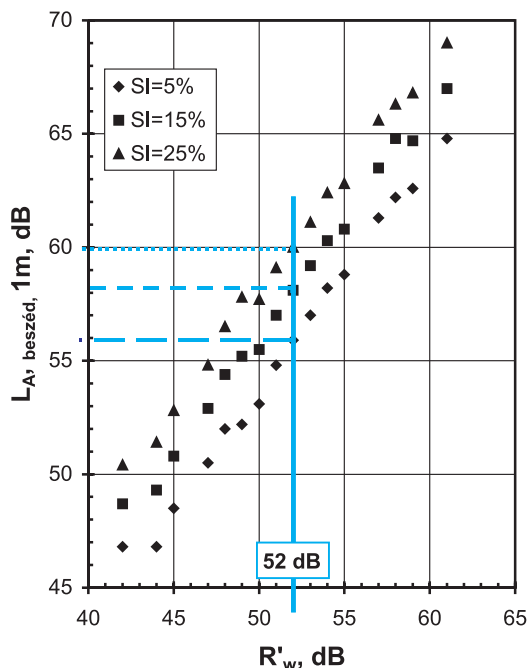
zaj viszonyt kell célul kitűzni. A 10 dB jelzaj viszony elérhető, ha 50 dB 1 m-es beszéd A hangnyomásszinthez legfeljebb 40 dB egyenértékű A hangnyomásszintű alapzaj társul; ekkor mintegy 95%-os beszédérthetőség, tehát megfelelő eredmény jön létre.

Munkahelyi körülmények között megvalósuló kommunikáció feltételeiről és értékeléséről szól az [I.16] szabvány. Más megközelítésből indulva azt tartalmazza, hogy ha az utózengési idő 2 s-nál kisebb, a jó minőségű kommunikáció feltétele A hangnyomásszintben kifejezve legalább 6 dB jel-zaj viszony.

7.1.9. A helyiségek közötti hangszigetelés és a szeparáltság kapcsolata

Az egymással szomszédos lakások közötti léghangszigetelési igény részben a beszédáthallatszódás korlátozása szempontjából állapítható meg. Ennek a megközelítésnek az eredményét pl. a 7.10. ábra szemlélteti, amely német nyelvű kísérletek [7.11] és német nyelvre vonatkozó számítások eredményét foglalja össze.

A beszédérthetőség számszerűsítését az SI jelű, %-ban kifejezett beszédérthetőség segítségével fejezik ki. Pontosítani kell azonban azt, hogy mi volt a szöveg minta – értelmetlen, de az adott nyelv hangtani sajátosságait visszatükröző szavak sorozata,



7.10. ábra. A szeparáltság és a helyiségek közötti súlyozott léghanggátlási szám kapcsolata

$L_{A, beszéd}$ a beszéd A hangnyomásszintje 1 m távolságban a zajos helyiségben; R'_w a zajos helyiség és a védendő helyiség közötti helyszíni súlyozott léghanggátlási szám; $SI\%$ százalékos beszédérthetőség

vagy értelmes szöveg –, és hogy az értékelés során szótagok, teljes szavak vagy egész mondatok helyes felismerését vizsgálták. A 7.10. ábra adatai (1. az SI paramétereket) értelmes szövegből álló mondatok vizsgálatával keletkeztek, az értékelésben teljes mondatok helyes felismerését vették alapul.

A három adatsorhoz a vízszintes tengelyen a szomszédos helyiségek közötti súlyozott léghanggátlási szám, a függőleges tengelyen pedig a beszéd 1 m-es A hangnyomásszintje tartozik. Abban a helyiségben, ahol az érthetőségvizsgálat történt az alapzaj A hangnyomásszintje mintegy 20 dB volt, nem befolyásolta, nem csökkentette a kommunikáció minőségét. Egyébként a kommunikáció minőségének csökkenése a szeparáltságot javította volna.

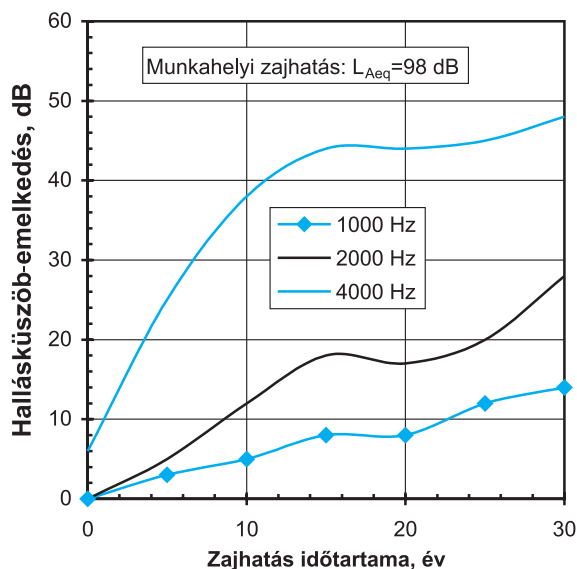
Az eredmények azt mutatják, hogy a különböző, megkövetelt érthetőséghez milyen súlyozott léghanggátlási szám-, R'_w , (vízszintes tengely), beszéd A hangnyomásszint, $L_{A, beszéd}$ (függőleges tengely) értékek tartoznak. Bár a szeparáltságnak nincs általánosan elfogadott, a beszédérthetőségre vonatkozó igényszintje, a józan megfontolás arra mutat, hogy a 25%-os mondatérthetőség meglehetősen csekély szeparáltságot tükröz. Sokkal inkább az 5%-os legnagyobb megengedhető érthetőségre kell törekedni. Az ábra kiemeli az $R'_w = 52$ dB hanggátlási követelményt.

Látható, hogy ha két helyiség között a helyszíni súlyozott léghanggátlási szám 52 dB, az 5% beszédérthetőséghez a beszéd 1 m-es A hangnyomásszintje nem haladhatja meg az 56 dB-t. Ez kevesebb, mint a normál beszédnek megfelelő 58 dB szint, de több, mint a csendes beszédnek megfelelő 50 dB-es szint. Másképpen értelmezve a grafikont, ha pl. a zajos helyiségben a beszéd 1 m-es A hangnyomásszintje 60 dB – ez emelt hangú beszédnek felel meg –, és a két helyiség között ismét 52 dB a helyszíni súlyozott léghanggátlási szám értéke, akkor a mondatérthetőség 25%, ami csekély szeparáltságot jelent. Tehát az $R'_w = 52$ dB hangszigetelési követelmény nagyon kompromisszumos, egyáltalán nem jelent teljes szeparáltságot.

7.1.10. Halláskárosodás

A halláskárosodást általában úgy határozzák meg mint a hallásküszöb megemelkedését, eltolódását a nagyobb hangnyomásszintek irányába. A fejlett ipari országokban elsősorban munkahelyi körülmények következtében alakul ki, de az elmúlt évtizedek életmód- és izlésváltozásának következtében egyes szórakozási tevékenységek is felelőssé tehetők, legalábbis a rövidebb idejű hatások szempontjából. A halláskárosodás a hallószervek kóros elváltozásának következménye. A zajhatás után az első kóros elváltozások a csiga alakú szervben a szőrsejtek összetapadtak és elgörbültek. További zajhatás után azok a szőrsejtek, amelyek a magas hangok érzékeléséért felelősek, gyakorlatilag nem voltak megállíthatók.

Felmérések [7.3] azt mutatták, hogy ha a zajterhelés 24 órás egyenértékű A hangnyomásszintben kifejezve nem haladja meg a 70 dB-t, akkor a megvizsgált emberek több, mint 95%-ánál halláskárosodás nem fordul elő. 8 órás zajhatás és 8 órás értékelés során megállapították, hogy ha a zajhatás egyenértékű A hangnyomásszintje nem haladja meg a 75 dB-t, akkor a zaj gyakorlatilag nem okoz halláskárosodást. Régóta ismert, hogy a halláskárosodás fokozódása figyelhető meg akkor, ha a személyek hosszabb ideig, sőt évekig zajos környezetben tartózkodnak, erre mutat példát a 7.11. ábra, Taylor cikke nyomán [7.12]. Az ábrán megfigyelhető, hogy textilipari üzemből töltött hosszú munkaszakasz alatt a munkahelyi zaj 98 dB egyenértékű A hangnyomásszintje hatására évente emelkedő mértékű halláskárosodás alakul ki. Legerőteljesebben a 4000 Hz frekvencia környezetében jelentkezik a hatás, de megjelenik 1000 és 2000 Hz-en is.



7.11. ábra. Hallásküszöb-emelkedés hosszú idejű zajterhelés hatására [7.12]

Rövid idejű hallásvesztés – a hallásküszöb megemelkedése – alakul ki a 90–120 dB egyenértékű A hangnyomásszint-tartományban a zenés szórakozóhelyeken, már néhány óra zajhatás alatt is. Ha az ismétlődés nem túl gyakori, a hallásvesztés egy idő után megszűnik, azaz a hallásküszöb többé-kevésbé visszaáll korábbi szintjére. Azonban, ha a hatás rendszeresen és gyakran ismétlődő, akkor maradó hallásvesztés kialakulása figyelhető meg.

Rövid idejű, nagyon magas hangnyomásszintekre vonatkozóan megállapították, hogy a 140 dB szintű hangjelenségek már rövid hatásidő alatt a hallószervek maradó károsodását idézik elő. Gyerekek körében célszerűnek látszik a 120 dB határ betartása.

7.1.11. A környezeti zaj zavaró hatását befolyásoló tényezők

Az épületen kívül és belül tartózkodó, ott pihenő, dolgozó emberre ható környezeti zaj zavaró hatása objektív és szubjektív tényezőktől együttesen függ. Az objektív tényezők a hangjelenség mérhető akusztikai jellemzői, időbeli sajátosságai (időtartama, ismétlődése), valamint dinamikája. A szubjektív tényezők az embertől, előéletétől, tapasztalataitól függenek. Lényeges szempont a hangjelenséget létrehozó műsor és az ember kapcsolata is (7.12. ábra). Ezért van szükség az akusztikai minőséget számszerűen kifejező mennyiségekre, valamint tervezési célként értelmezhető határértékekre, követelményekre.



7.12. ábra. Példák egy hangjelenségről az emberben kialakuló összesített vélemény összetevőire

A környezeti zaj sokféle tevékenységet befolyásoló, az embert mint biológiai és társadalmi lényt egyaránt érintő hatása szinte a hallás teljes tartományában megfigyelhető. Összefoglaló eligazítást nyújt a 7.13. ábra, amely A hangnyomásszintben kifejezve mutat jellegzetes hangnyomásszintértékeket és -hatásokat, összevetve a 7.2. alfejezetben ismertetett határértékekkel is.

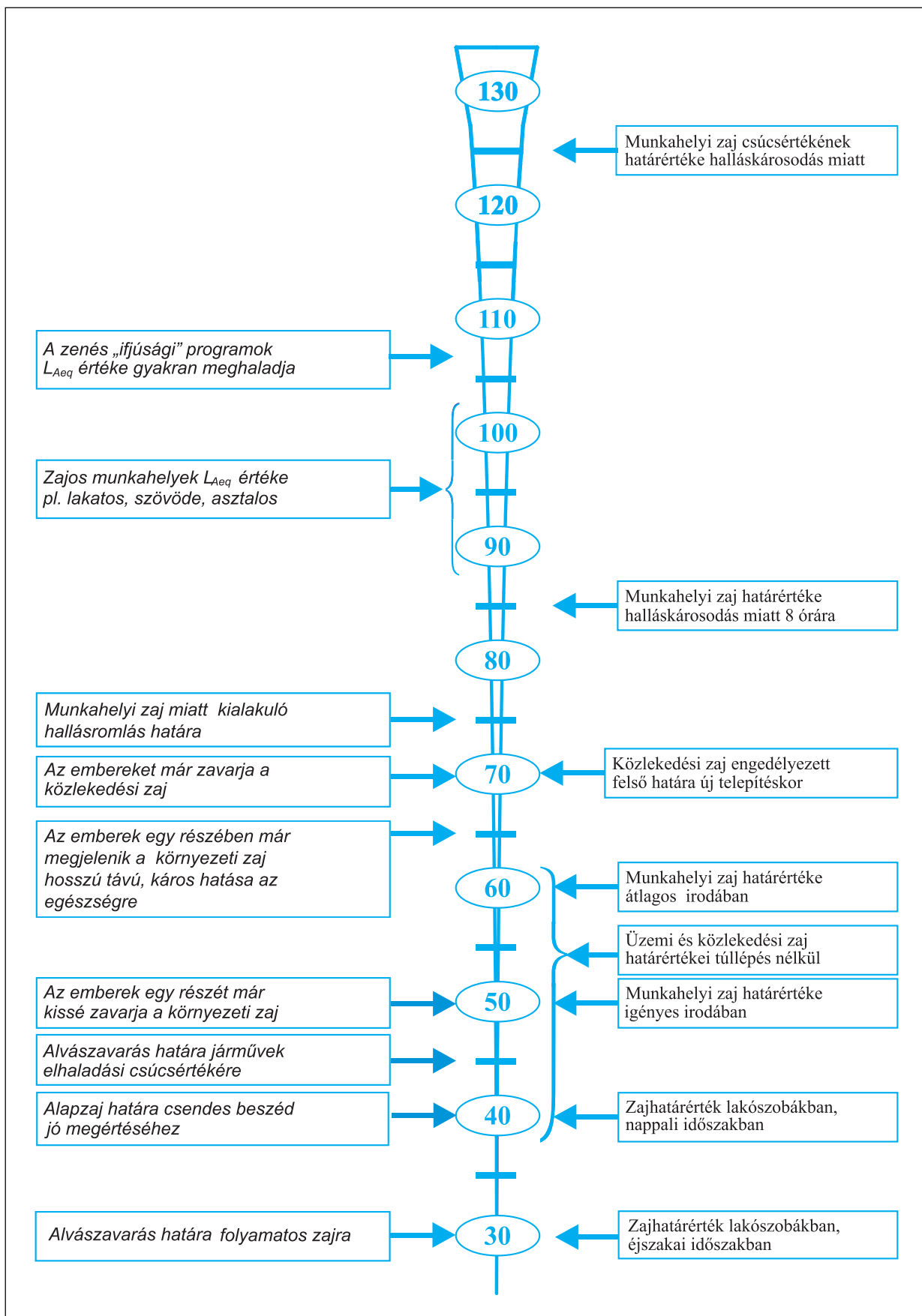
7.2. Az épületek akusztikai tervezésének számszerű céljai (akusztikai követelmények)

7.2.1. Az akusztikai követelmények rendszere

Tartalmi szempontból Magyarországon a következőkben felsorolt akusztikai követelmények léteznek. Ezek részben elkülönülten kezelendő zajokra vonatkozó zajhatárértékek, részben munkahelyen kialakuló eredő zajt korlátozó határértékek, részben pedig hangszigetelési követelmények. Még jelenlegi formájukban is vannak közöttük tartalmi átfedések, ami inkább hátrányos, mint előnyös.

A határértékek, követelmények mérhető mennyiségek, a minőség legkisebb szükséges értékét írják elő. (E mennyiségekről l. a 6. fejezetet.) A határértékek logikájának és egyes látszólag apró részleteknek a megértése több esetben segít olyan alaprajzi elrendezések, épülettájolás kiválasztásában, amely egyszerűbb szerkezeti megoldások alkalmazásához vezet. A határértékek és követelmények funkciói a következők:

- zajhatárérték épületek külső környezetében a szomszédságban működő üzemi létesítményektől származó zaj korlátozására;
- zajhatárérték épületek külső környezetében a szomszédságban működő építkezésektől származó zaj korlátozására;



7.13. ábra. A környezeti zaj hatásai és határértékei

- zajhatárérték épületek külső környezetében a közlekedési eredetű zaj korlátozására;
- zajhatárérték épületek helyiségeiben az épületen belül működő technikai berendezések együttes zaj korlátozására;
- zajhatárérték épületek helyiségeiben az épület helyiségeibe csukott ablakokon és ajtókon keresztül bejutó közlekedési eredetű zaj korlátozására;
- zajhatárérték épületek helyiségeiben az épületen belül működő üzemi tevékenység zajának korlátozására;
- a dolgozók zajterhelését korlátozó zajhatárértékek (alapvetően nem helyiségekhez, hanem munkahelyekhez és dolgozókhoz kapcsolódnak); ezek a munkahelyeken kialakuló eredő zajt korlátozzák;
- helyiségek közötti hangszigetelési követelmények (vízszintesen, függőlegesen és átlósan levő szomszédos helyiségek között, léghangterhelésre és lépéshangterhelésre);
- homlokzati szerkezetek helyszíni hangszigetelésére vonatkozó követelmények.

Formai szempontból a szűkebb értelemben vehető akusztikai előírások részben rendeletekben, részben szabványokban találhatók. A rendeletek kötelező jellegűek, a szabványok önmagukban nem. Azonban számos olyan kiegészítő jogi elem van, amelynek következtében a szabványokban levő előírások is kötelezővé válnak, pl. szerződéses kapcsolat előírásai, minőségbiztosítási rendszer bevezetése stb. A jogszabályi előírások kötelező jellegűtől függetlenül a Magyarországon bevezetett akusztikai követelmények az épített környezet, az épületek és helyiségek rendeltetésszerű használatának egyik szükséges feltételcsoportját jelentik (a rendeltetésszerű használat feltételeiről l. az 1. fejezetet). Ha a határértékek nem teljesülnek, az egyértelműen azt jelenti, hogy a rendeltetésszerű használat feltételei nem teljesülnek.

A határértékek ismertetése nem helyettesíti a rendeletek pontos tanulmányozását és alkalmazását, célja a logikai rend ismertetése.

7.2.2. Zajhatárértékek üzemi létesítményektől származó zajra, épületen kívül [1.5]

Az üzemi létesítmények közé tartoznak az üzemek telephelyei, az épületen belül és azon kívül működő technológiai és termelőberendezések, az ott végzett egyéb tevékenységek, a kulturális, a szórakoztató, a vendéglátó, a sport, a közösségi célú létesítmények helyhez kötött üzemelő berendezései és

tevékenységei. Ezek összessége által keltett zaj a rendeltetésszerű állapotban az üzemi létesítmény környezetében levő és zajtól védendő területeken nem haladhatja meg a 7.1. táblázatban levő határértéket. A határérték a megítélési szint, az L_{AM} legnagyobb megengedhető értéke. Ellenőrizni alapvetően épületek homlokzata előtt 2 m távolságban vagy épület hiányában a tervezett beépítési vonalon kell. A mérési magasság az épület zaj ellen védendő homlokzata magasságának felel meg.

Ha a zajtól védendő területen levő épület egy homlokzati szakaszán nincs nyílászáró szerkezet (pl. a teljes homlokzati szakasz tűzfal), akkor ott nincs megállapított zajhatárérték. Ha olyan helyiségek ablakai, ajtajai nyílnak a homlokzatra, amelyek mögött a helyiségekben a zajhatárérték 45 dB-nél nagyobb, akkor a 7.1. táblázat határértékei kisebb, de számszerűen nem megadott mértékben meghaladhatók.

A területi funkció, területi besorolás szorosan megfelel az OTÉK [1.6] kategóriáinak.

7.1. táblázat. Üzemi létesítményektől származó zaj terhelési határértékei zajtól védendő területeken

Területi funkció	Határérték az L_{AM} megítélési szintre, dB	
	nappal 6–22 h	éjjel 22–6 h
Üdülőtérület, gyógyhely, egészségügyi terület, védett természeti terület kijelölt része	45	35
Lakóterület (kisvárosias, kertvárosias, falusias, telepszerű beépítésű)	50	40
Lakóterület (nagyvárosias beépítésű), vegyes terület	55	45
Gazdasági terület és különleges terület	60	50

7.2.3. Zajhatárértékek építkezésektől származó zajra, épületen kívül [1.5]

Az építkezések azért jelentős környezeti zajforrások, mert javarészt kültérben működő berendezések és tevékenységek okozzák a környezeti zajt. A határértékek alapvetően megegyeznek az üzemi zajra megállapított határértékekkel, mérséklő tényező az építkezés időtartama. A határértékeket a 7.2. táblázat foglalja össze. Az ellenőrzés az építkezés környezetében levő zaj ellen védendő területekre vonatkozik, az ott álló épületek homlokzata előtt 2 m távolságban, vagy épület hiányában a tervezett beépítési vonalon kell elvégezni. A mérési magasság a zaj ellen védendő homlokzat magasságának felel meg.

7.2. táblázat. Építőipari kivitelezési tevékenységtől származó zaj terhelési határértékei zajtól védendő területeken

Zajtól védendő terület	Határérték az L_{AM} megítélési szintre, dB					
	Ha az építési munka időtartama					
	1 hónap vagy kevesebb		1 hónap felett 1 évig		1 évnél több	
	nappal 6–22 h	éjjel 22–6 h	nappal 6–22 h	éjjel 22–6 h	nappal 6–22 h	éjjel 22–6 h
Üdülőtérület, gyógyhely, egészségügyi terület, védett természeti terület kijelölt része	60	45	55	40	50	35
Lakóterület (kisvárosias, kertvárosias, falusias, telepszerű beépítésű)	65	50	60	45	55	40
Lakóterület (nagyvárosias beépítésű), vegyes terület	70	55	65	50	60	45
Gazdasági terület és különleges terület	70	55	70	55	65	50

Ha a zajtól védendő területen levő épület egy homlokzati szakaszán nincs nyílászáró szerkezet (pl. a teljes homlokzati szakasz tűzfal), akkor ott nincs zajhatárérték. Ha olyan helyiségek ablakai, ajtói nyílnak a vizsgált homlokzaton, amelyek mögött a helyiségekben a zajhatárérték 45 dB-nél nagyobb, akkor az építési munkától származó zajt korlátozó határérték kisebb, de számszerűen nem megadott mértékben meghaladható.

7.2.4. Közlekedési zajra vonatkozó zajhatárérték, épületen kívül [1.5]

A közúti, vasúti, légi közlekedés egyaránt általánosan elterjedt, nagyon széles hatókörű zajforrás. A védekezés ellene azért nehéz, mert a zajkeltés mechanizmusának számos eleme kívül esik a hatékonyan szabályozható műszaki vagy adminisztratív eszközökkel jól kordában tartható paraméterek körén. Ugyanez igaz a határértékek megállapítására is. A kialakult városi környezet azért kezelendő elkülönülten, mert a spontán, esetleg évszázados fejlődés során kialakult városi szerkezetben a közlekedési zajt korlátozó határértékek közvetlen érvényesítése nem lehetséges.

A közlekedési eredetű zajt korlátozó határértékek új telepítésű, megváltozott terület felhasználású védendő területekre, valamint új vagy bővített kapacitású közlekedési létesítmények környezetére vonatkoznak. Az ellenőrzést az építkezés környezetében levő zaj ellen védendő területeken, az ott álló épületek homlokzata előtt 2 m távolságban, vagy épület hiányában a tervezett beépítési vonalon levő mérési helyeken kell elvégezni. A határértékeket a 7.3. táblázat foglalja össze.

7.3. táblázat. A közlekedéstől származó zaj terhelési határértékei zajtól védendő területeken

Területi funkció	Határérték az $L_{AM,kö}$ a közlekedés egészétől származó mértékadó A hangnyomásszint, dB							
	Üdülő-, lakóépületek és közintézmények közötti forgalomtól elzárt területeken; pihenésre szolgáló körzetekben		Kiszolgáló; átmenőforgalom nélküli utakon		Gyűjtőút, összekötőút, bekötőút, egyéb közúti, vasúti mellékvonal és pályaudvar, repülőtér, ill. helikopterállomás leszállóhelye mentén		Autópálya, autótűz; I. rendű főút; II. rendű főút; autóbusz-pályaudvar; vasúti fővonal és pályaudvar; repülőtér, ill. helikopterállomás leszállóhelye mentén	
	nappal 6–22 h	éjjel 22–6 h	nappal 6–22 h	éjjel 22–6 h	nappal 6–22 h	éjjel 22–6 h	nappal 6–22 h	éjjel 22–6 h
Üdülőtérület, gyógyhely, egészségügyi terület, védett természeti terület kijelölt része	45	35	50	40	55	45	60	50
Lakóterület (kisvárosias, kertvárosias, falusias, telepszerű beépítésű)	50	40	55	45	60	50	65	55
Lakóterület (nagyvárosias beépítésű), vegyes terület	55	45	60	50	65	55	65	55
Gazdasági terület és különleges terület	60	50	65	55	65	55	65	55

A kialakult városi környezet jellege miatt szükséges kompromisszum, hogy a közegészségügyi hatóság bizonyos feltételek előírásával 5 dB, indokolt esetben 10 dB határérték-túllépést engedélyezhet. Az engedélyezés előfeltételei a passzív akusztikai védelem megerősített előírása, tervszintű megvalósítása, kivitelezése, és a kivitelezett állapot utólagos ellenőrzése.

Ha a zajtól védendő területen levő épület egy homlokzati szakaszán nincs nyílászáró szerkezet (pl. a teljes homlokzati szakasz tűzfal), akkor ott nincs zajhatárérték. Ha olyan helyiségek ablakai, ajtajai nyílnak a vizsgált homlokzaton, amelyek mögött a helyiségekben a zajhatárérték 45 dB-nél nagyobb, akkor a közlekedéstől származó zajt korlátozó határérték kisebb, de számszerűen nem megadott mértékben meghaladható. Ez az épületek telepítési helyének és tájolásának kiválasztásában jól alkalmazható akusztikai szempontokat jelent: lakóépület vagy oktatási épület helyett célszerű pl. irodaépület vagy irodai szintek telepítése olyan környezetbe, ahol a 7.3. táblázat határértékei nem teljesülnek, ha erre a beruházási program egyébként lehetőséget ad.

7.2.5. Zajterhelési határértékek épületek zajtól védendő helyiségeiben [1.5], [1.1], [1.2], [1.3]

A legtöbb ember életének jelentős részét épületek helyiségeiben tölti. Az alvás, pihenés, szórakozás, tanulás színhelye általánosan lakó- és hálószoba, tan-

terem, előadóterem, de gyakran a munkatevékenység helye is épületen belül található. Ezért a környezeti zaj elleni védelem legközvetlenebb formája a helyiségek, ill. munkahelyek zajhatárértékeinek megállapítása. Napjainkban a helyiségek zajterhelési határértékeit és a munkahelyek határértékeit általában eltérő koncepció szerint szabályozzák. Az eltérés részben érthető, részben azonban nem feltétlenül indokolt. Bár a jelenlegi rendszer az eltérő koncepciók miatt kissé összetetté vált, a pozitív célkitűzések, valamint a rendeletek kötelező jellege miatt az egyes szabályozási elemek – egymással esetenként átfedő jellegű – tervezési célként jelennek meg a gyakorlatban.

Lakóépület, kórház, oktatási épület, intézmények, kereskedelmi vendéglátó és szállodai épületek helyiségeire a zajterhelési határértékeket a 7.4. táblázat foglalja össze. Azonos számérték korlátozza az épületen belüli technikai berendezések, valamint az épületen kívülről származó közlekedési zaj nagyságát. Így a méretezés során figyelembe veendő tervezési cél számértékét tekintve azonos a két zajforráscsoportra, de elkülönülten kezelendő. Az utólagos ellenőrzés is külön-külön történik.

Az épületben vagy azzal közvetlenül szomszédos épületben működő termelő- és szolgáltató létesítménytől, ill. az ezek működéséhez alkalmazott berendezésektől származó zajra vonatkozó zajterhelési határértékeket a 7.5. táblázat ismerteti. Látható,

7.4. táblázat. A zajterhelés határértékei épületek zajtól védendő helyiségeiben (azonos számérték korlátozza az épületen belüli technikai berendezések, valamint az épületen kívülről származó közlekedési zaj nagyságát, az ellenőrzés is külön-külön történik) [1.5]

Zajtól védendő helyiség	Határérték az L_{AM} megítélési szintre, dB	
	nappal 6–22 h	éjjel 22–6 h
Kórtermek és betegszobák	35	3
Kórházak, rendelőintézetek kezelő- és műtőhelyiségei	35	
Egyéb orvosi rendelő- és kezelőhelyiségek	40	
Tantermek, előadó- és foglalkoztatótermek bölcsődékben, óvodákban és oktatási intézményekben, ülés- és tárgyalótermek, könyvtári olvasóhelyiségek, tanári szobák, intézmények akusztikailag igényes helyiségei	40	
Lakószobák lakásokban, szociális otthonokban, üdülőkben	40	30
Lakószobák szállodákban, panziókban, munkásszállókban, diákotthonokban, üdülőházakban	45	35
Étkezőkonyha, étkezőhelyiség lakásokban	45	
Szállodák, panziók, üdülők, szociális otthonok, munkásszállók és diákotthonok közös helyiségei	50	
Éttermek, eszpresszók	55	
Kereskedelmi, vendéglátó épület eladóterei, ill. vendéglátó helyiségei; várótermek; intézmények akusztikai szempontból kevésbé igényes helyiségei	60	

7.5. táblázat. A zajterhelés határértékei épületek zajtől védendő helyiségeiben, ha a zajforrás az épületben vagy azzal közvetlenül szomszédos épületben levő termelő- vagy szolgáltatólétesítmény [1.5]

Zajtól védendő helyiség	Határérték az L_{AM} megítélési szintre, dB	
	nappal 6–22 h	éjjel 22–6 h
Kórtermek és betegszobák	30	25
Kórházak, rendelőintézetek kezelő- és műtőhelyiségei	30	
Egyéb orvosi rendelő- és kezelőhelyiségek	35	
Lakószobák lakásokban, szociális otthonokban, üdülőkben	35	25
Lakószobák szállodákban, panziókban, munkásszállókban, diákotthonokban, üdülőházakban	40	30

7.6. táblázat. A munkahelyen a munkavégzés során a dolgozót érő zaj megengedhető egyenértékű A hangnyomás-szintértékei a minimális védelem biztosítása érdekében [1.1] (példák)

Funkció	Határérték az L_{AD} megítélési A hangnyomás-szintre, dB
Speciális orvosi vizsgálóhelyiségek (CT, UH, MR, RTG stb.), műtők, fokozottan igényes irodai munkahelyek (tárgyaló, előadó), olvasótermek	40
Repülésirányítói munkahelyek, zajvédelmi szempontból igényes irodai munkahelyek (tervező-, programozó-, kutató-fejlesztő laboratórium zajforrás nélkül stb.)	50
Irodai munkahelyek, ügyfélirodák, analitikai laboratóriumok	60
Művezetői irodák, zajvédő fülkék, vezérlőpult vagy vezérlőfülke telefonos kapcsolattal, mikroelektronikai és mikrofinommechanikai munkahelyek, telefonközpontok, diszpécserközpontok	65
Fokozott figyelmet igénylő fizikai munkavégzés (elektro, finommechanikai műszerész, MEO, precíziós munka stb.)	70
Vezérlőpult vagy vezérlőfülke telefonos kapcsolat nélkül, összeszerelői munkahelyek, elektronikai, finommechanikai, optikai üzemekben, laboratóriumok gépi zajforrással	80

hogy e zajforráscsoportra 5 dB-lel szigorúbb a zajterhelési határérték, mint az előző két csoportban.

A 7.4. és 7.5. táblázat három zajforráscsoportra külön-külön megállapított határértékeit a tevékenységzavarás, az alvászavarás és a kommunikációzavarás korlátozása céljából állapították meg.

A 7.6. táblázatban található munkahelyi zajhatárértékeket nem a teljes helyiségekre, hanem a dolgozó tartózkodási helyére állapították meg. A szempont a tevékenységzavarás és a kommunikációzavarás volt.

7.2.6. Zajhatárértékek munkahelyeken [II.4], [I.1]

A halláskárosodás elkerülése és a dolgozókat érő zajterhelés csökkentése érdekében megállapított határérték 8 órás napi munkaidőt feltételezve:

- 85 dB, amelyet a megítélési A hangnyomásszinttel, L_{AD} -vel kell összehasonlítani;
- 125 dB, amelyet az impulzusos időállandóval mért legnagyobb A hangnyomásszinttel, L_{AI} -vel kell összehasonlítani.

Munkahelyeken a kommunikáció biztosítása, valamint a munkateljesítmény zavarásának csökkentése érdekében a tevékenység és a munkahely jellegétől függő további határértékeket állapítottak meg (7.6. táblázat). E határértékek a munkahelyeken kialakuló eredő zajt korlátozzák, tehát mind a tervezés, mind az ellenőrzés során a munkatevékenység hatása is figyelembe veendő.

7.2.7. Hangszigetelési követelmények többlakásos lakóépületek, sorházak, szállodák, kórházak és üdülők helyiségei között

A hangszigetelési követelmények logikája az, hogy a zaj ellen védendő helyiségekben kialakuló zaj korlátozható úgy is, hogy a zajos helyiség és a zaj ellen védendő helyiség közötti hangszigetelést írják elő. Ennek előfeltétele, hogy a zajos helyiségben a helyiség használata jól tipizálható, jellegzetes legyen, és így az ott keletkező hang jellemző legyen a helyiségre és használatra.

A helyiségek közötti léghangszigetelés mennyiségei relatív mennyiségek, ezért ezekhez rögzíteni kell a rendeltetésszerű használatra jellemző ún. használati zajszintet (a rendeltetésszerű, szabványos használat során a helyiségben kialakuló hangjelenség 1%-os A hangnyomásszintje). Ha a zajos helyiség ren-

deltetése úgy változik meg, hogy ahhoz nagyobb használati zajszint tartozik, akkor a léghangszigetelési igény is megnő. Hasonlóképpen adható meg az alaprendeltetéstől eltérő helyiségkapcsolat is, pl. iroda és lakószoba egymás mellett vagy egymás felett.

A megnövekedett szigetelési igényt a (7.1) összefüggés segítségével kell meghatározni. Az új, megváltozott állapotban a helyszíni súlyozott léghanggátlási szám szükséges értékét R'_{wuj} , a használati zajszintet L_{huj} jelöli, a kiindulóállapot jele R'_{w0} és L_{h0} :

$$R'_{wuj} = R'_{w0} + L_{huj} - L_{h0} \quad (7.1)$$

A 7.7. táblázat leggyakrabban előforduló helyiségek használati zajszintjét ismerteti. Az adatok általában az [I.9] hivatkozásból származnak, kivéve

7.7. táblázat. Használati zajszintek, részben L_{h0} [I.9] alapján

Épület rendeltetése	Helyiségek rendeltetése	L_{h0} , L_{huj} , dB
Lakó- és üdülőépület	Lakó-, közlekedő-, főző- és étkezőhelyiségek	80
Kórház, szanatórium, orvosi rendelő	Betegszoba, intenzív szoba, orvosi szoba, pihenő	65
	Vendégszoba, lakószoba, orvosi rendelő, kezelő	70
Nevelési, oktatási intézmény	Általános tanterem, foglalkoztató, előadóterem, tanári	80
	Ének-zene terem, tornaterem	90
Közösségi épület	1–2 személyes iroda, tanácsterem	70
	3–5 személyes iroda	75
	Több gépi zajforrást tartalmazó iroda, nagyterem iroda	80
Bármilyen épület	Épülethez, intézményhez tartozó társalgó, büfé	80
	Épülethez, intézményhez tartozó étterem. 1–2 szgk. részére tároló	85
	Épülethez, intézményhez tartozó konyhaüzem	90
	Nyilvános forgalmú üzlethelyiség	85
	Nyilvános étterem, büfé, eszpresszó zeneszolgáltatás nélkül	90
	Nyilvános forgalmú étterem, büfé, eszpresszó kisebb teljesítményű hangosítással szolgáltatott háttérzenével	95–100*
	Előadóterem, klubhelyiség élő zenei műsorral (disco, rock, pop stb.)	>110*

Megjegyzés: a *-gal jelölt értékeket az utóbbi időben végzett mérések tapasztalatai alapján állapították meg

a megjelölt tételeket. Ezek az utóbbi évtizedekben kialakult használati szokásokat tükrözik.

Ha a hangszigetelési követelményt nem a helyszíni súlyozott léghanggátlási szám, hanem más mennyiség fejezi ki, akkor az új követelményt is ezzel az összefüggéssel kell meghatározni. Az összefüggés eredménye természetesen ekkor nem az új súlyozott léghanggátlási számot, hanem azt a mennyiséget adja, amelyben a kiinduló követelményt kifejezték. A számítást mindkét terjedési irányban el kell végezni.

A 7.8a táblázatban általános rendeltetésű lakóépületek belső hangszigetelési követelményei találhatóak, ha a szomszédos helyiségek azonos vagy a táblázat szerinti rendeltetésűek.

A sorházak, csoportházak magasabb igényszínvonalat jelentenek a többlakásos lakóépületekhez képest. Ez a hangszigetelési követelményekben is tükröződik, lásd a 7.8b táblázatot.

Szállodák, kórházak, nyugdíjasok háza belső hangszigetelési követelményeit a 7.9. táblázat foglalja össze. Az elmúlt évek tapasztalatai azt mutatják, hogy elsősorban nemzetközi tulajdonban levő szállodák saját műszaki előírásaiban hangszigetelési előírások is vannak. Ezek több esetben nem R'_w , L'_{nw} mennyiségekben megadott követelményeket tartalmaznak, de ezzel egyidejűleg a nemzeti szabványokban található határértékek betartását is előírják.

A 48 dB hanggátlási követelményt a 7.10. ábra adataival összevetve megállapítható, hogy az 5%-os beszédérthetőség, tehát elfogadható szeparáltság csak akkor jön létre, ha a beszéd 1 méretes A hangnyomásszintje 52 dB-nél kisebb. Ez meglehetősen csendes beszédet jelent, tehát a követelmény nagyon szerény szeparáltságot eredményez.

7.2.8. Hangszigetelési követelmények irodák és iskolák helyiségei között

Léghangterhelés esetén irodaépületek és oktatási épületek belső hangszigetelési követelményeit az [I.9] szabvány a teljes szintcsökkenés nevű mennyiségben fejezi ki. E mennyiség a nemzetközi gyakorlatban nem ismert, méretezési módszert a hazai előírások nem tartalmaznak. Ezért iskolák és irodák követelményeit nem e szabvány, hanem a nemzetközi gyakorlatban ismertebb [I.11] szabvány alapján adja meg a 7.10. és 7.11. táblázat. Az [I.11]-ben található előírások szigorúbbak, így betartásukkal a hazai előírások is teljesülnek. A 9. fejezetben található hangszigetelésre vonatkozó méretezési módszerek közvetlenül alkalmazhatók.

7.8a táblázat. Társasházban lévő lakások és önálló üdülőegységek hangszigetelési követelményei [I.9] nyomán

Irány, akusztikai terhelés	Helyiségkapcsolat	Követelmények, dB		
		R_w	R'_w	$L'_{n,w}$
Függőleges kapcsolat, lég- vagy lépéshangterhelés	Lakások, ill. üdülőegységek lakószobái és másik lakás, ill. üdülő egység bármilyen helyisége között	–	52	55
	Lakások, ill. üdülőegységek előszobái, konyhái, kamrái, fürdőszobái és másik lakás, ill. önálló üdülőegység hasonló helyiségei között	–	47	58
	A lakás, ill. önálló üdülőegység bármilyen helyisége és közös használatú padlástér vagy földszinti tárolókamrák között	52	–	55
	Lakások, ill. üdülőegységen belüli szintek között	–	47	55
	Nyitott átjáró (kapualj) és lakás vagy üdülőegység bármilyen helyisége között	52	–	–
Vízszintes vagy függőleges kapcsolat, lépcsőkarra, pihenőre ható lépéshangterhelés	Lakószoba mellett vagy fölött	–	–	55
	Lakás, ill. üdülőegység egyéb helyisége mellett vagy fölött	–	–	58
Vízszintes kapcsolat, lég- hangterhelés	Lakások, ill. üdülőegységek helyiségei között	–	52	–
	Lakáson belüli helyiségek között, ha a válaszfalban nincsen ajtó	–	37	–
	Közös használatú padlástér, vagy földszinti tároló kamrák és lakás, ill. üdülőegység között	52	–	–
	Nyitott átjáró (kapualj) és lakás, ill. üdülőegység között	52	–	–
	Lépcsőház vagy zárt közlekedő folyosó és lakás, ill. üdülőegység között	52	–	–
	Lakáson, ill. üdülőegységen belül, szoba és előszoba közötti ajtó	20	–	–
	Lépcsőház, függőfolyosó vagy belső folyosó és előszoba közötti ajtó	27	–	–
	Lépcsőház, függőfolyosó vagy belső folyosó és lakószoba vagy lakóelőtér közötti ajtó	37	–	–

Megjegyzés: az R_w oszlop az adott helyiségkapcsolatban található elválasztószervezetre vonatkozik, termékjellemző, tehát a kerülőutak nélküli laboratóriumban mért súlyozott lég- hanggátlási szám legkisebb szükséges értékét fejezi ki. Az R'_w és $L'_{n,w}$ oszlop az adott helyiségkapcsolatban és gerjesztés mellett a helyszíni minőség legkisebb szükséges értékét adja meg: lég- hangszigetelés esetén ez a legkisebb számot, lépéshangszigetelés esetén pedig a legnagyobb számot jelenti.

7.8b táblázat. Csoportházakban, sorházakban lévő lakások és önálló üdülőegységek hangszigetelési követelményei

Irány, akusztikai terhelés	Helyiségkapcsolat	Követelmény, dB		
		R_w	R'_w	$L'_{n,w}$
Függőleges kapcsolat, lég- vagy lépéshangterhelés	Lakáson, ill. önálló üdülőegységen belüli szintek között	–	–	55
	Szomszédos lakások, ill. önálló üdülőegységek között	–	–	45
Vízszintes és függőleges kapcsolat, lépéshangterhelés	Szomszédos lakás bármilyen helyisége mellett	–	–	45
Vízszintes kapcsolat	Szomszédos lakások, ill. önálló üdülőegységek között	–	57	–
	Lakáson belül, ha a válaszfalban nincsen ajtó	–	37	–
	Lakáson, ill. önálló üdülőegységen belüli lakószoba és előszoba között	20	–	–

Megjegyzés: az R_w oszlop az adott helyiségkapcsolatban található elválasztószervezetre vonatkozik, termékjellemző, tehát a kerülőutak nélküli laboratóriumban mért súlyozott lég- hanggátlási szám legkisebb szükséges értékét fejezi ki. Az R'_w és $L'_{n,w}$ oszlop az adott helyiségkapcsolatban és gerjesztés mellett a helyszíni minőség legkisebb szükséges értékét adja meg: lég- hangszigetelés esetén ez a legkisebb számot, lépéshangszigetelés esetén pedig a legnagyobb számot jelenti.

7.9. táblázat. Hangszigetelési követelmények szállásépületekben, üdülőszállókban és egészségügyi épületekben

Az épület rendeltetése	Helyiségkapcsolat	Követelmény			
		vízszintes kapcsolat		függőleges kapcsolat	
		R'_{w} , dB	R_w , dB	R'_{w} , dB	L'_{w} , dB
Háromcsillagos vagy magasabb osztályú szálloda vagy gyógyszálló, üdülőszálló	Vendégszobák, betegszobák egymás mellett vagy felett	48	–	52	55
Kétszillagos vagy alacsonyabb osztályú szálloda vagy gyógyszálló, üdülőszálló	Vendégszobák, betegszobák egymás mellett vagy felett	45	–	52	55
Kórház, szanatórium, gyógyüdülő, orvosi rendelő, szociális otthon, nevelőotthon, diákotthon, munkásszálló, szobabérlők háza, garzonház, nyugdíjasok háza, kollektív üdülő	Betegszoba, rendelő- vagy kezelőhelyiség, ill. lakószoba egymás mellett vagy felett	42	–	52	55
Bármilyen szálloda, gyógyszálló, üdülőszálló	Vendégszoba, betegszoba és folyosó közötti fal	–	45	–	–
	Vendégszoba, betegszoba és folyosó közötti ajtó	–	35	–	–
Kórház, szanatórium, gyógyüdülő, orvosi rendelő, szociális otthon, nevelőotthon, diákotthon, munkásszálló, szobabérlők háza, garzonház, nyugdíjasok háza, kollektív üdülő	Rendelő, kezelőhelyiség, lakószoba és folyosó közötti fal	–	45	–	–
	Rendelő, kezelőhelyiség, lakószoba és folyosó közötti ajtó	–	30	–	–

Megjegyzés: az R_w oszlop az adott helyiségkapcsolatban található elválasztószervezetre vonatkozik, termékjellemző, tehát a kerülőutak nélküli laboratóriumban mért súlyozott léghanggátlási szám legkisebb szükséges értékét fejezi ki. Az R'_{w} és L'_{w} oszlop az adott helyiségkapcsolatban és gerjesztés mellett a helyszíni minőség legkisebb szükséges értékét adja meg: léghangszigetelés esetén ez a legkisebb számot, lépéshangszigetelés esetén pedig a legnagyobb számot jelenti.

7.10. táblázat. Oktatási intézmények hangszigetelési követelményei [I.11]

Írány	Helyiségkapcsolat, elválasztószervezet	Követelmények	
		R'_{w} , dB	$L'_{n,w}$, dB
Függőleges kapcsolat	Tantermek és hasonló rendeltetésű termék közötti födém	55	53
	Folyosók közötti födém	–	53
	Zajos vagy akusztikai szempontból igényes helyiségek (pl. tornaterem, zeneterem, műhely) közötti födém	55	46
Vízszintes kapcsolat	Tantermek, ill. hasonló rendeltetésű termék közötti fal	47	–
	Tantermek, ill. hasonló rendeltetésű termék és folyosó közötti fal	47**	–
	Tantermek, ill. hasonló rendeltetésű termék és lépcsőház közötti fal	52**	–
	Tantermek, ill. hasonló rendeltetésű termék és zajos vagy akusztikai szempontból igényes helyiségek (pl. tornaterem, zeneterem, műhely) közötti fal	55	–
	Tantermek, ill. hasonló rendeltetésű helyiségek közötti ajtó	32*	–

Megjegyzések:

* a követelmény ajtók laboratóriumban mért súlyozott léghanggátlási számának legkisebb értékét írja elő;

** bár [I.11] helyszíni követelményt ad meg, a hazai szabályozást is tekintve véve elegendő a jelölt esetekben olyan szerkezetet választani és szakszerűen beépíteni, amelynek termékjellemzője, a kerülőutak nélküli laboratóriumban mért súlyozott léghanggátlási szám meghaladja a táblázatban talált határértékeket.

7.11. táblázat. Irodák hangszigetelési követelményei [I.12]

Írány	Helyiségkapcsolat, elválasztószervezet	Követelmény			
		R'_{w} dB	$L'_{n,w}$ dB	R'_{w}^* dB	$L'_{n,w}^*$ dB
Függőleges kapcsolat	Helyiségek közötti födémek, lépcsők, folyosók födémjei és lépcsőházak határolófalai	52**	53	>55	46
Vízszintes kapcsolat	Átlagos irodahelyiségek közötti fal	37	–	>42	–
	Átlagos irodahelyiségek és folyosó közötti fal	37**	–	>42	–
	Fokozott figyelmet igénylő szellemi tevékenység helyiségei, ill. igazgatói iroda és folyosó közötti fal	45	–	>52	–
	Átlagos irodahelyiségek és folyosó közötti ajtó	27***	–	>32	–
	Fokozott figyelmet igénylő szellemi tevékenység helyiségei, ill. igazgatói iroda és folyosó közötti ajtó	37***	–	–	–

Megjegyzések:

* emeletszintű hangszigetelési irányérték;

** bár [I.11] helyszíni követelményt ad meg, a hazai szabályozást is tekintetbe véve elegendő a jelölt esetekben olyan szerkezetet választani és szakszerűen beépíteni, amelynek termékjellemzője, a kerülőutak nélküli laboratóriumban mért súlyozott léghanggátlási szám meghaladja a táblázatban talált határértékeket;

*** a követelmény ajtók laboratóriumban mért súlyozott léghanggátlási számának legkisebb értékét írja elő.

7.2.9. Homlokzati szerkezetekre vonatkozó hangszigetelési követelmények

A homlokzati szerkezeteknek kitüntetett szerepe van a külső, közlekedési zaj elleni védelemben. Hangszigetelésük meghatározása és a megfelelő szerkezetek kiválasztása jelenti azt az eszközt, amelynek segítségével – még ha kompromisszumok eredményeként is – legalább az épületek belső tere, helyiségei megvédhetők a közlekedési zaj ellen.

A nemzetközi gyakorlatban ez az eszköz annyira elterjedt, hogy – ellentétben a hazai gyakorlattal – a helyiségekben nem is értelmeznek közlekedési zajt korlátozó zajhatárértéket. Ehelyett a helyiség rendeltetése és a külső határolószervezeteket terhelő közlekedési zaj nagysága közvetlenül elvezet a külső határolószervezetek szükséges hanggátlásához és a szükséges hanggátlást létrehozó szerkezetek kiválasztásához.

A hazai gyakorlat más utat követ. Egyrészt tervezési célként megjelennek a helyiségek közlekedési eredetű zajt korlátozó határértékei, másrészt az [I.10] szabvány a külső, közlekedési zaj nagysága és a zajhatárérték alapján megadja a homlokzat szükséges helyszíni léghanggátlási számát. Nem mutatja meg a szükséges hanggátlás létrehozásának módját, tehát nem jut el a szerkezetválasztásig, és – régi dokumentumként – nem veszi figyelembe a különböző külső határolószervezetek jellegzetesen eltérő frekvenciakarakterisztikájának következményeit sem. Ezért alkalmazása nem célszerű.

A hazai szabályozottság jelenlegi szintjén homlokzati szerkezetek szükséges hangszigetelésének megállapítására és a termékek kiválasztására nincs

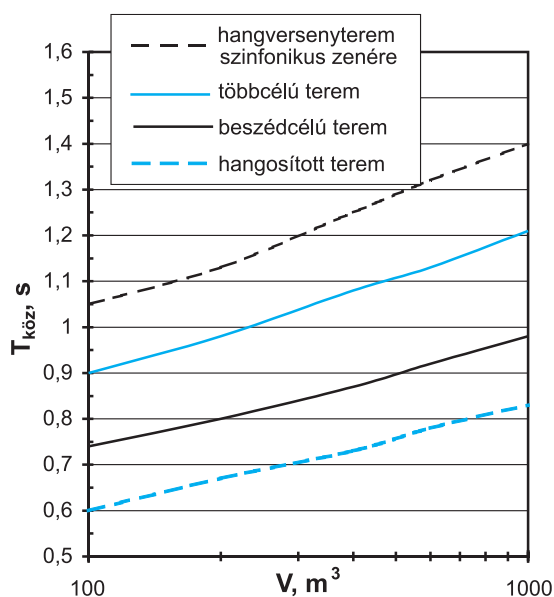
megfelelő hazai követelmény. Implicit formában a helyiségek zajhatárértékei jelentik a követelményeket, amelyek a 7.4. táblázatban találhatók.

Épületek külső határolószervezeteinek közlekedési zaj elleni védelem szempontjából történő méretezéséről a 9. fejezetben lesz szó. Ez tartalmazza a szükséges hanggátlás meghatározását és az ezt megvalósító szerkezetválasztást.

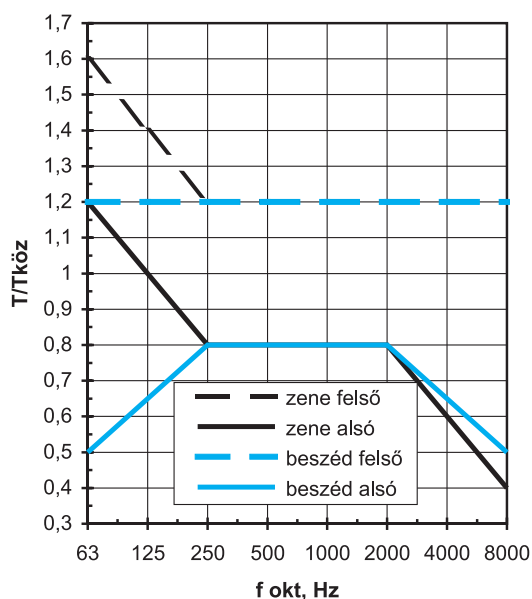
7.2.10. A helyiségek teremakusztikai követelményei

Magyarországon a helyiségek teremakusztikai minőségére vonatkozóan sem számszerű, sem minőségi jellegű követelmények nincsenek. A hiány az igényes, nagyberuházási programok keretében megvalósuló létesítmények esetében nem szembetűnő, hiszen a felkészült szakértők ismeretei lehetővé teszik a jó minőség elérését. Átlagos esetben azonban – iskola, kisebb irodaépület tanácsteremmel stb. – a követelmények hiánya gátolja a megfelelő akusztikai minőség elérését.

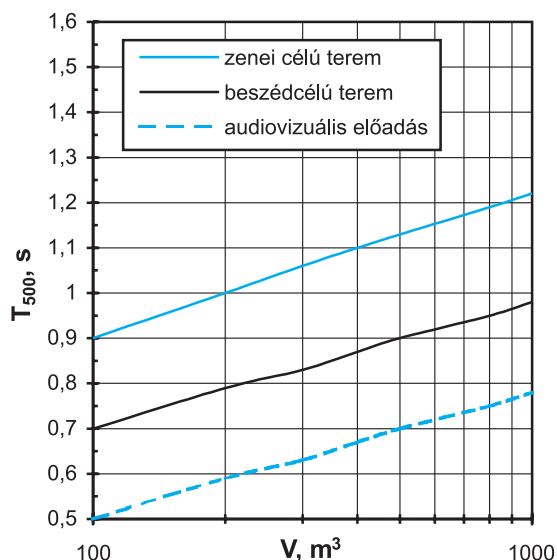
Az utózengetési idő sem napjainkban, sem a korábbi évtizedekben nem volt az egyetlen tervezendő teremakusztikai paraméter. Viszont egyszerűbb feladatokban, pl. beszéd célú előadóterem legfeljebb 1000 m³ helyiségtérfogatig az utózengetési időre történő méretezés a jó eredmény elérésének feltétele. Ezért részben a külföldi szabályozás, részben a szakirodalom alapján a következő ábrák néhány bevált irányértéket mutatnak. Az optimális utózengetési idő alapvetően a helyiség térfogatától és rendeltetésétől függ, ez az irányértékekben is tükröződik.



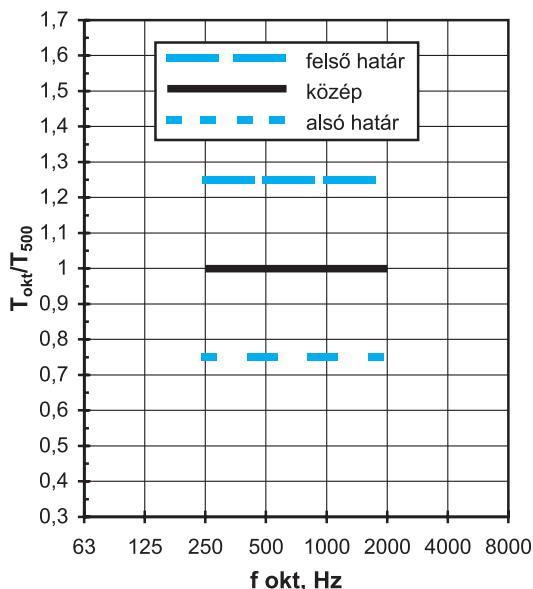
7.14a ábra. Közepes utózungési idő a terem rendeltetése és térfogata függvényében [IV.9]



7.14b ábra. Az utózungési idő tolerancia-tartománya [IV.9]



7.15a ábra. Közepes utózungési idő a terem rendeltetése és térfogata függvényében [I.13]



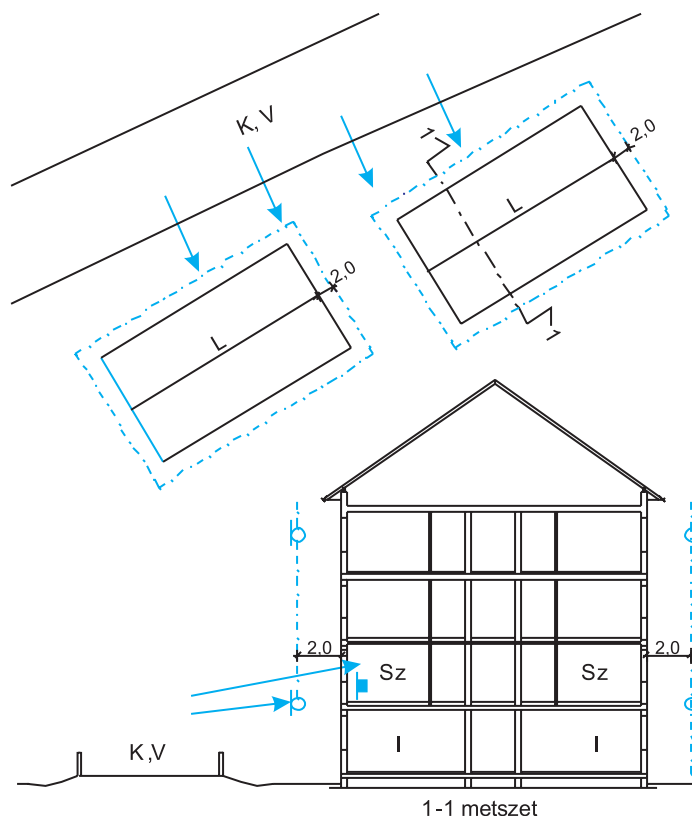
7.15b ábra. Az utózungési idő toleranciatartománya [I.13]

A 7.14a ábrán [IV.9] alapján a közepes utózungési idő (500 Hz és 1000 Hz oktávsávokban) látható a helyiségtérfogattól és a hangműsor jellegétől függően. A 7.14b ábra a közepes utózungési időhöz tartozó toleranciatartományt adja meg a 250–2000 Hz frekvenciasávokban a frekvenciafüggő utózungési idő és a közepes utózungési idő megengedett arányaként.

A 7.15a és 7.15b ábra szintén a közepes utózungési időt és a toleranciasávot mutatja, de az [I.15] nyomán. A toleranciatartományt e példában a 63–8000 Hz tartományra adták meg.

7.3. A zajhatárértékek értelmezése

Az épületen belüli hangszigetelési előírások alapvetően egyértelműek, homogén jellegűek. A zajhatárértékek azonban összetett rendszert alkotnak, az értelmezéshez sok „finom” részlet tartozik, és a tervezési folyamatot már annak kezdeti szakaszában hasznosan orientálhatják. Néhány, a gyakorlatban leggyakrabban előforduló épületelrendezéshez a 7.16–7.18. ábrák bemutatják a zajhatárértékek értelmezését. A példák egy-egy konkrét zajforrás értékelésére irányul, a valóságban azonban nemcsak egy, hanem valamennyi határérték figyelembe veendő.



7.16. ábra. Zajhatárértékek közlekedési eredetű zajra épületen belül és kívül
K, V közút, vasút; Sz lakószoba; I iroda; L lakóépület; pontvonal: a mérési pontok lehetséges helye

A 7.16. ábra közlekedési létesítmény környezetében levő lakóépületre vonatkozó, a közlekedéstől származó zajt korlátozó határértékek elhelyezkedését szemlélteti. Az épületen kívüli határértéket ellenőrizni, ill. méretezés esetén számítani alapesetben a homlokzat síkjától 2 m távolságban, a padlószintek felett 1,5 m magasságban kell. A külső határérték azonban csak új telepítésű, megváltozott területfelhasználású környezet, valamint új vagy bővített kapacitású közlekedési létesítmény esetében jelenik meg. Nincs zajhatárérték olyan homlokzati szakaszoknál sem, amelyek mögötti helyiségben a közlekedési zaj határértéke 45 dB-nél nagyobb. Tehát külső, közlekedési zajhatárérték nem értelmezhető olyan homlokzati szakaszok előtt, ahol a helyiség rendeltetése átlagos minőségű iroda, üzlet, kereskedelem, ügyfélforgalom stb. A határértékek számértékei egyébként a területi besorolástól és a közlekedési zajforrás jellegétől és a napszaktól függenek a 7.3. táblázat szerint.

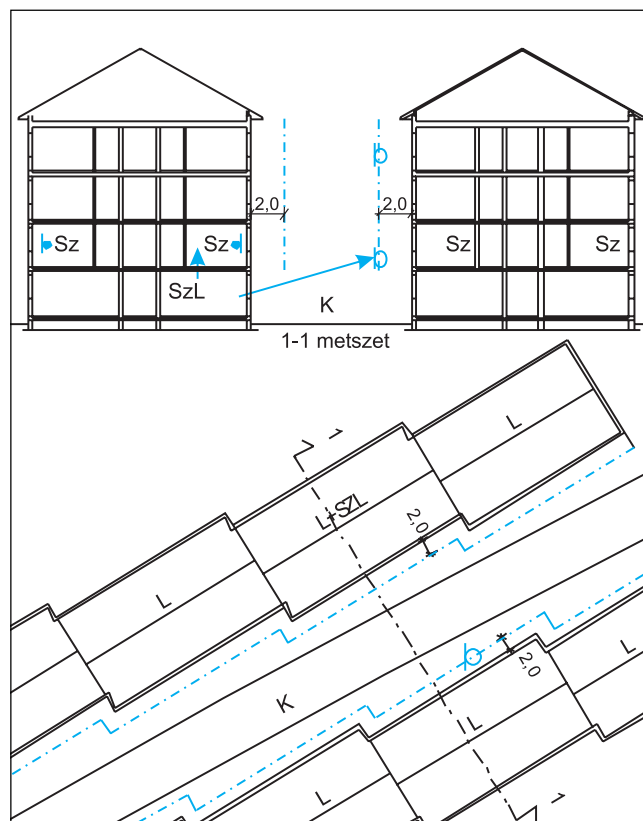
A helyiségekben a zajhatárérték általánosan érvényes (l. a 7.4. táblázatot) és közvetlen kapcsolatba hozható a külső határolószerkezetek hangszigetelésével.

A 7.17. ábrán zárt sorú beépítésű lakóházak láthatók, egyikük földszintjén szolgáltatóüzem van. A szolgáltatóüzem működéséhez gépészeti berendezések is tartoznak, ezek nem azonosak a házhoz tartozó technikai berendezésekkel. A létesítmény működésének hatására keletkező zaj részben a gépektől, részben a tevékenységtől származik. A határértékek ezt az együttes, eredő zajt korlátozzák.

A szolgáltatóüzemmel közös épületben levő lakószobákban – és más helyiségekben – az üzem működése következtében kialakuló zajra vonatkozó határértékek a 7.5. táblázatban találhatók. Ettől független az épületen belüli, az épülethez tartozó, az épületet ellátó technikai berendezések zaját korlátozó zajhatárérték-csoport, amelynek számértékeit a 7.4. táblázat tartalmazta.

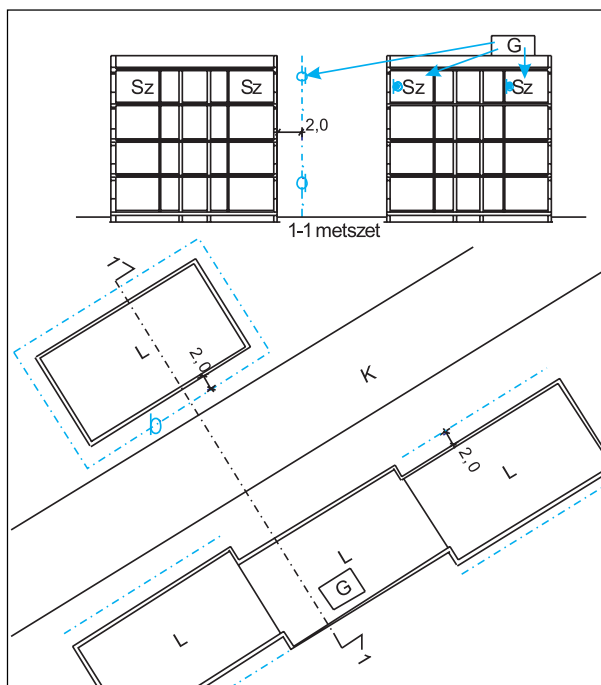
A szolgáltatóüzem külső környezetbe jutó zaját szintén határérték korlátozza, az ábrán példaként egy-két ellenőrzési pont szerepel. A számértékeket a 7.1. táblázat foglalta össze. A saját épület előtt azért értelmeznek határértéket, mert a szolgáltatóüzem üzemelési szempontból független a lakóépülettől, ahhoz képest többletterhelést jelent.

A 7.18. ábrán látható feladatban a külső tér érté-



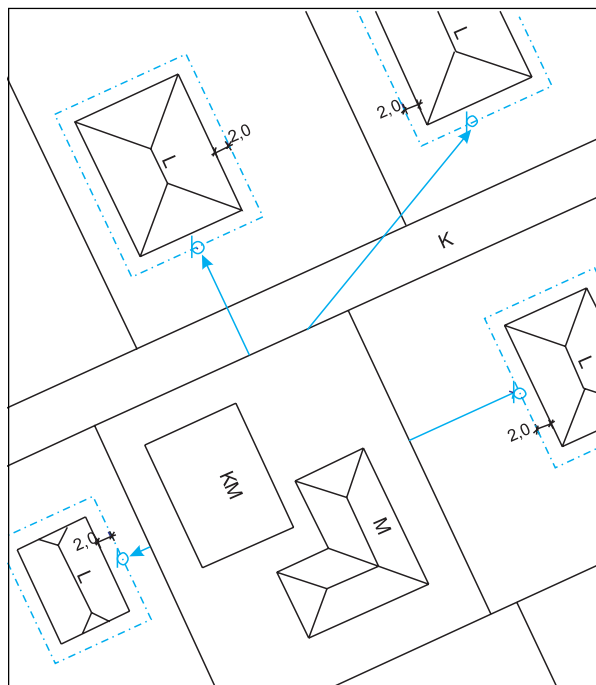
7.17. ábra. Zajhatárértékek üzemi zajra épületen kívül és belül

L lakóépület; *K* közút; *Sz* lakószoba; *SzL* szolgáltató vagy kereskedelmi létesítmény; pontvonal: a mérési pontok lehetséges helye



7.18. ábra. Zajhatárértékek technikai berendezés zajára (üzemi zaj) épületen kívül és belül

K közút; *L* lakóépület; *G* a lakóépülethez tartozó gépház (technikai berendezés); *Sz* lakószoba; pontvonal: a mérési pontok lehetséges helye



7.19. ábra. Környezeti zajhatárérték telephellyel rendelkező üzemi létesítmény zajára

M műhely épülete; *KM* szabad térben végzendő munkafolyamatok területe; *L* lakóépület; pontvonal: a mérési pontok lehetséges helye

kelése üzemi zajként, a helyiségek értékelése pedig technikai berendezésként történik. A zajforrás a tetőn levő gépészeti helyiség, amelyben a fűtés, melegvíz-ellátás és szellőzés berendezései működnek nappal és éjszaka is. E berendezéseket az épület rendeltetésszerű működéséhez tartozó technikai berendezések közé tartoznak. Így a saját épület külső környezetében határértéket nem állapítanak meg rájuk. A helyiségekben kialakuló zajt azonban határérték korlátozza, a legfelső szintre ezt az ábra jelzi is. (A határértékeket l. a 7.4. táblázatban.)

A szomszédos épületek felől tekintve a gépház üzemi zajforrás, ezért a szomszédos épületek külső környezetében zaját határérték korlátozza, a jelölés

szerint. A határértékek a területi besorolástól és a napszaktól függenek, a 7.1. táblázat alapján. Az ábra arra is felhívja a figyelmet, hogy határérték nemcsak az utca szintjén, hanem a védendő épült teljes magasságában megjelenik.

A 7.19. ábra részben beltérben, részben kültérben működő üzemi létesítmény környezetizaj-határértékeit mutatja. Az ipari vagy szolgáltatótevékenység az *M* műhelyben, ill. szabad térben történik. A létesítmény környezetében *L*-vel jelölt lakóházak találhatók. Az üzemi létesítménytől származó zaj határértékeit alapesetben e lakóházak homlokzatától 2 m távolságra levő mérési vonalon értelmezik, ellenőrzik, ill. tervezik.

8.

ÉPÍTÉSI TERMÉKEK AKUSZTIKAI JELLEMZŐI

8.1. Az áttekintés célja

Az építési törvény [I.14] szerint az építési termékek azok az anyagok, szerkezetek, berendezések, amelyeket épületekben alkalmaznak. Ezek akusztikai jellemzői közül azokat tekintjük át termékekhez kötötten, amelyeket a 9. fejezet méretezési módszerei az épületek akusztikai minőségének meghatározása érdekében felhasználnak.

Az áttekintés részben napjainkban kapható, gyártókhoz kapcsolható termékeket ismertet példaként. Ennek célja a szakszerű adatmegadás. Az adatok másik része vagy helyszíni kivitelezés eredményeként létrejött szerkezetek adataiból, vagy általánosan, széles körben alkalmazott szerkezetek, termékek adataiból mutat példákat. Ezek első csoportjába tartoznak pl. a monolit vasbeton födémek különböző vastagságú szerkezetei, vagy a tömör, kisméretű téglafalazatok. A másik csoportot pl. a szokványos hőszigetelő üvegezésű ablakok alkotják, amelyeket sok helyen, azonos kiindulási anyagokból és technológiával állítanak elő, és szakszerű beállítás, beépítés esetén az egyes gyártmányok akusztikai minősége a mérési pontosságon belül megegyezik.

Az áttekintés nem törekszik teljességre, tehát nem helyettesíti az agyag-, szerkezet- és berendezésgyártók katalógusainak használatát.

A 8.1. táblázat az építési termékek azon anyag, szerkezet és akusztikai termékjellemzőit foglalja össze, amelyeket a szerkezetek kidolgozása, ill. a helyszíni akusztikai minőség megtervezése során fel kell használni. Az anyagjellemzőkhöz tartoznak pl. a testsűrűség és a rugalmassági modulusok; a szerkezetjellemzők a méretek, a fajlagos tömeg, a rétegrend és a rajzi formában megadható részletek; a termékek akusztikai jellemzői alapvetően a hangelnyelési, hangszigetelési adatai, a kibocsátott zajra jellemző adatok, ill. a szerkezet akusztikai működésének modellezéséhez szükséges paraméterek. A jelölések az 5. fejezetben alkalmazott termékjel-

lemző-jelölésekkel összhangban vannak. A termékjellemzők felsorolása az egyszerűbb használat érdekében ábécé sorrendben készült.

- α , α_w hangelnyelési tényező, súlyozott hangelnyelési tényező;
- v szálas szigetelőanyagok névleges vastagsága, m;
- l légrés vastagsága, m;
- D_n , D_{nw} szabványos hangnyomásszint-különbség, súlyozott szabványos hangnyomásszint-különbség, dB;
- d_0/d_t úszópadoókban alkalmazott szigetelőanyagok terheletlen és terhelés alatti vastagsága;
- ΔL_n , ΔL_w szabványos lépéshangnyomásszint-csökkenés, súlyozott szabványos lépéshangnyomásszint-csökkenés, dB;
- ΔR , ΔR_w léghanggátlásiszám-javulás, súlyozott léghanggátlásiszám-javulás, dB;
- E rugalmas rétegek nyomó igénybevétellel szembeni, terhelés alatt kialakuló dinamikai rugalmassági modulusa, N/m²;
- f_h határfrekvencia, Hz;
- G rugalmas rétegek nyíró igénybevétellel szembeni, nyomóterhelés hatása alatt tapasztalható dinamikai rugalmassági modulusa, N/m²;
- h épületszerkezetek összvastagsága, m;
- η_E , η_G a nyomó igénybevétellel, ill. nyíró igénybevétellel szembeni rugalmassági modulus veszteségi tényezője;
- η , η_k épületszerkezetek veszteségi tényezője és közepes veszteségi tényezője;
- L_{ap} szerelvénnyel A hangnyomásszint
- L_n , L_{nw} szabványos lépéshangnyomásszint, súlyozott szabványos lépéshangnyomásszint, dB;
- L_w , L_{Aw} gépek, berendezések hangteljesítményszintje és A hangteljesítményszintje;
- m'' a szerkezet fajlagos tömege, kg/m²;
- ρ_{atl} átlagos testsűrűség, kg/m³;
- r fajlagos áramlási ellenállás: Ns/m⁴;
- R , R_w léghanggátlási szám, súlyozott léghanggátlási szám, dB;

8.1. táblázat. Építési termékek tervezés során felhasználandó akusztikai termékjellemzői

Megnevezés	α_w	ν	l	D_n D_{nw}	d_0 d_t	ΔL_n ΔL_w	ΔR ΔR_w	E η_E	f_h	G η_G	h	η_k	L_{ap}	L_w L_{Aw}	L_n L_{nw}	m''	ρ	r	R R_w	R_L R_{Lw}	s'
Ablak, ajtó	*										*								*		
Álmennyezet	E	*	*	*		E	E													*	
Álpadló	*	*	*	*		E	E													*	
Egyhéjú, kerámia-, gipsz-, könnyűbeton, betonfalazat	*							*		*	*				E	*		E			
Falburkolat (száraz vakolat, előtétfal, hangelnyelő burkolat)	E	*	*				E														
Födém	*							*		*	*			E	E	*		E			
Kéthéjú, merev peremkapcsolatokkal készült kerámia-, gipsz-, könnyűbeton, betonfalazat	*	*	*							*	*				E			E			
Kéthéjú, rugalmas peremkapcsolatokkal készült kerámia-, gipsz-, könnyűbeton, betonfalazat	*	*	*							*	*				E			E			
Kisméretű épületelemek				E														E			
Műanyaghabok úsztatott aljzatok alá					E			E									*				E
Padlóburkolat	*					E	E								*						
Rugalmas lemezek rezgés-szigetelési célból					*			*		*											
Szerelt fal	*		*	*						*	*							E	E		
Szálas szigetelőanyag légrés kitöltésére		*															*	E			
Szálas szigetelőanyag úsztatott aljzatok alá					E			E									*	*			E
Az épületbe kerülő technikai berendezések													E								
Tetőszerkezet		*	*							*	*				*			E	E		
Vízellátási berendezések												E									

Megjegyzés: E elsősorban, * lehetséges.

- R_L , R_{Lw} hosszirányú léghanggátlási szám, súlyozott hosszirányú léghanggátlási szám, dB;
- s'' az úsztatott aljzatban alkalmazott rugalmas lemezek fajlagos dinamikai merevsége, N/m³.

Az adatmegadás általános, mind a közvetlen hangátvitel, mind a kerülőutas hangátvitel akusztikai mennyiségeit tartalmazza. A termékkatalógusokban a 8.1. táblázatban található adatoknak csak egy része található meg. A katalógusadatok általában az egyadatos mennyiségekkel végezhető számításokhoz elegendők.

8.2. Kerámia, gipsz vagy könnyűbeton, pórusbeton alapanyagú, egy- és kéthéjú falak léghanggátlása

8.2.1. Kerámia alapanyagú, egyhéjú falak léghanggátlása (8.2. táblázat)

Hétköznapi nyelven e szerkezetcsoporthoz falazóelemeit tégláknak nevezik. Alapanyaguk égetett agyag. A falazat kötőanyaga az egyéb igényeknek – pl. szilárdság, hőszigetelés stb. – megfelelő habarcs, általános alkalmazásuk során mindkét oldalra az egyéb igényeknek megfelelő vakolat kerül. Akusztikai minőségük és belső szerkezetük alapján a következő csoportokra oszthatók:

8.2. táblázat. Kerámia alapanyagú egyhéjú falazatok hangszigetelési adatai***

Falazat elemének megnevezése	Típus	m'' , kg/m ²	R_w , dB	Adat- forrás
Porotherm 10 N+F	Ü	150	40	kat.
Porotherm 12 N+F	Ü	180	41	kat.
Porotherm 20 N+F	ML	210	46	kat.
Porotherm 30 N+F	PL	305	42	kat.
Porotherm 38 N+F	PL	365	42	kat.
Porotherm 30 Hanggátló	T	590	59	kat.
B30	*	*	*	*
Tömör, kisméretű téglá, 25 cm falazat	T	>400	**	**
Tömör, kisméretű téglá, 12 cm falazat	T	>200	**	**

*** Minden adat vakolt falazatra vonatkozik.

* A megnevezés alatt többféle falazóelem szerepel, amelyek fajlagos tömege, belső szerkezete és ennek megfelelően hanggátlása széles tartományban változik, e megnevezés ezért nem alkalmas a termék azonosítására a hangszigetelés szempontjából.
kat. Katalógusadat.

** A fajlagos tömeg alapján becsülhető adat, l. a 4.19. ábrát.

- tömör vagy csak kismértékben üreges szerkezetek, akusztikai sajátosságuk a hangszigetelés alapján az, hogy frekvenciafüggő léghanggátlásuk jól követi a hagyományos elméletet (l. a 4. fejezetet); súlyozott léghanggátlási számuk a fajlagos tömeg alapján becsülhető; jelük **T**;
- üreges szerkezetek, az üregrendszer a szilárdsági igények alapján alakult ki; hangszigetelési sajátosságuk az, hogy frekvenciafüggő léghanggátlásuk általában jól követi a hagyományos elméletet (l. a 4. fejezetet); súlyozott léghanggátlási számuk a fajlagos tömeg alapján becsülhető; jelük **Ü**;
- falsíkra merőleges irányban lamellás szerkezetek: az átmenő lamellák a falsíkra merőlegesek; hangszigetelési sajátosságuk az, hogy frekvenciafüggő léghanggátlásuk jól követi a hagyományos elméletet (l. a 4.5.1. pontot); súlyozott léghanggátlási számuk a fajlagos tömeg alapján becsülhető; jelük **ML**;
- falsíkkal párhuzamos lamellás szerkezetek: az átmenő lamellák a falsíkkal párhuzamosak; hangszigetelési sajátosságuk az, hogy frekvenciafüggő léghanggátlásuk nem követi a hagyományos elméletet (l. a 4.5.2. fejezetet); súlyozott léghanggátlási számuk a fajlagos tömeg alapján nem becsülhető; jelük **PL**.

A veszteségi tényező laboratóriumi adatai katalógusban nem szerepelnek, a helyszín és a labora-

tóriumi adatok közötti kapcsolatra l. az esettanulmányok példáit.

8.2.2. Gipsz, beton vagy könnyűbeton, pórusbeton alapanyagú, merev peremkapcsolatokkal beépített, egyhéjú falazatok léghanggátlása

E csoportba a homogén belső felépítésű, általában 8–38 cm vastag falazóelemekből készült falazatok tartoznak. A falazatot gipsz alapanyag esetén általában nem vakolják, könnyűbeton, pórusbeton falazat esetében ez a technológiától függ. A hangszigetelési termékjellemző, tehát a laboratóriumban mérhető léghanggátlásból meghatározott súlyozott léghanggátlási szám a falazat fajlagos tömege alapján jól becsülhető. A becslés a 4.19. ábra alapján végezhető.

Az átlagos testsűrűségek az alábbiak:

- gipsz alapanyagú falazóelem: általában $\rho = 900\text{--}1200\text{ kg/m}^3$;
- könnyűbeton, pórusbeton falazóelem: $\rho = 600\text{--}800\text{ kg/m}^3$;
- beton: $\rho = 2200\text{--}2400\text{ kg/m}^3$.

Amennyiben bármely alapanyagból nagyméretű elemeket készítenek, amelyek szerelvények, technológiai csatlakozások nyílásait is tartalmazzák, akkor a fajlagos tömeg alapján végzett becslés csak a tömör, résmentes elemre vonatkozik.

8.2.3. Merev peremkapcsolatokkal kialakított, kerámia, gipsz vagy könnyűbeton falazóelemekből készült, kéthéjú falazatok léghanggátlása

A merev peremkapcsolatok miatt (l. a 4.11.7. pontot) a falazat egyhéjú szerkezetként viselkedik. A légrés 2–10 cm között lehet, mérete nem meghatározó. A légrésbe helyezendő szálás szigetelőanyag kitöltés testsűrűsége, vastagsága nem meghatározó. A szálás szigetelőanyag-kitöltés névleges vastagsága azonban ne legyen nagyobb, mint a légrés vastagsága –1 cm. Az ebbe a csoportba tartozó falazatok hangszigetelési termékjellemzője, tehát a kerülőutak nélküli, laboratóriumban mért súlyozott léghanggátlási számuk a fajlagos tömeg alapján becsülhető. A becslésre alkalmas összefüggést a (8.1) képlet mutatja:

$$R_{w,\text{merev,kéthéjú}} \approx R_{w,\text{egyhéjú}}(m''_1 + m''_2) \quad (8.1)$$

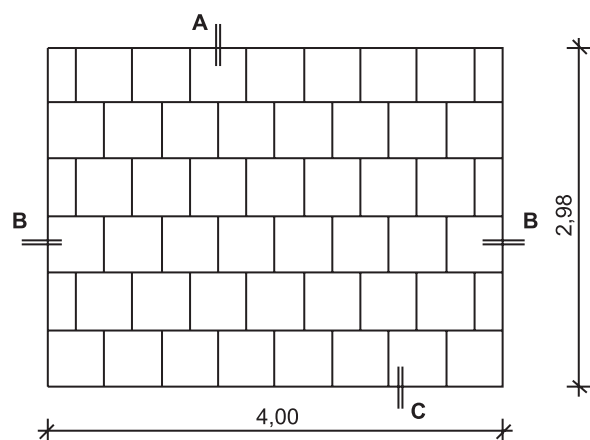
$R_{w,\text{merev,kéthéjú}}$ a merev peremkapcsolatos, kéthéjú falazat súlyozott léghanggátlási száma; $R_{w,\text{egyhéjú}}$ a

homogén, egyhjú szerkezetek becsült súlyozott léghanggátlási száma a 4.19. ábra alapján.

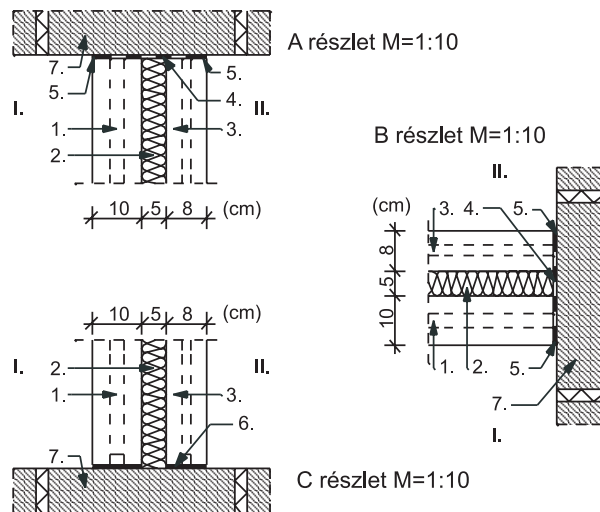
8.2.4. Rugalmas peremkapcsolatokkal kialakított, kéthjú falazatok léghanggátlása

A rugalmas peremkapcsolatokkal kivitelezett kéthjú falak hanggátlása a 4.11.8. pontban ismertetteknek megfelelően a peremkapcsolatokon keresztül vezető hangterjedési utak kerülőutas hanggátlásának megnövelésével lényegesen nagyobb, mint az azonos rétegrendű, fajlagos tömegű, merev peremkapcsolattal kivitelezett falazat. Ezért az adatközlés általánosságban nem oldható meg, kizárólag mind a négy peremnél alkalmazott rugalmas réteg adataival együtt. A következő példa részben a korrekt adatmegadást, részben a hangszigetelés szempontjából fontos szerkezeti részleteket mutatja be. Az egyes összetevők mással általánosan nem helyettesíthetők, a szerkezet optimális rétegfelépítést és csomóponti részleteket tartalmaz.

- Falazat nézete: 8.1. ábra, ez egyúttal a metszetek helyét is bemutatja.
- Falazat csomópontjai: 8.2. ábra.
- Rétegek adatai:
 - 1. falazatréteg: ALBA falazólap: $h = 8 \text{ cm}$, $m'' \approx 80 \text{ kg/m}^2$;
 - l : légrésvastagság 5 cm , a légrésben szálas szigetelőanyag, vastagsága $h = 50 \text{ mm}$, típusa TF 50 TEL üveggyapot műszaki filc;
 - 2. falazat réteg: ALBA akusztikus falazólap: $h = 10 \text{ cm}$, $m'' \approx 126 \text{ kg/m}^2$.
- A peremek mentén elhelyezett rugalmas rétegek adatai:
 - alsó peremszigetelő réteg, amely a falazat mint állandó terhelés hatására legfeljebb



8.1. ábra. Rugalmas peremkapcsolatokkal épített kéthjú fal nézete laboratóriumi vizsgálat során



8.2. ábra. Rugalmas peremkapcsolatokkal épített kéthjú fal beépítési csomópontjai laboratóriumi vizsgálat során

I., II. laborhelyiség 10 cm vastag, gipsz alapanyagú válaszfallapból készült fal; 2 légrés, szálas szigetelőanyaggal kitöltve; 3 8 cm vastag, gipsz alapanyagú válaszfallapból készült fal; 4 oldalsó és felső rugalmas peremkapcsolat; 5 tartósan elasztikus kitt részköltés; 6 alsó rugalmas peremkapcsolat; 7 laborszerkezet

$s'' \approx 275 \text{ MN/m}^3$ fajlagos dinamikai merevségű, anyagában homogén;

- oldalsó és felső peremszigetelő réteg, a beépítésre jellemző fajlagos terhelés hatására legfeljebb $s'' \approx 50 \text{ MN/m}^3$ fajlagos dinamikai merevségű, anyagában homogén.

- A falazat súlyozott léghanggátlási száma kerülőutak nélküli laboratóriumban: $R_w = 58 \text{ dB}$.

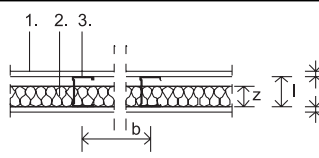
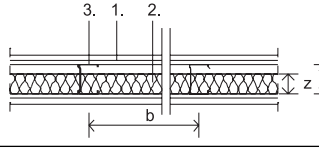
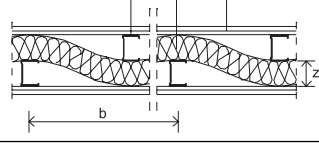
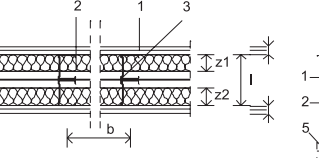
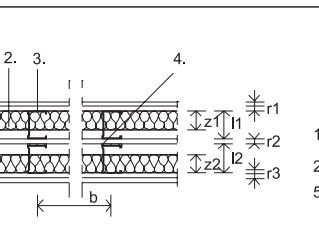
8.3. Szerelt szerkezetek akusztikai jellemzői

8.3.1. Szerelt falak léghanggátlása

A szerelt falak léghanggátlása, amely a légrésen, ill. a bordákon keresztül vezető hangterjedési utak eredője, a szerkezet rétegrendjétől, a kéreglemezek fajlagos tömegétől, a bordák távolságától és merevségétől függ. A 8.3. táblázat néhány jellegzetes szerkezeti példa hangszigetelési termékjellemzőjét foglalja össze. A kéreglemez a példákban $12,5 \text{ mm}$ vastag gipszkarton lemezből készültek. A súlyozott léghanggátlási szám adatának alkalmazásához ismerni kell a kéreglemez fajlagos tömegét is, ezt a típus megjelölés tulajdonképpen helyettesítheti.

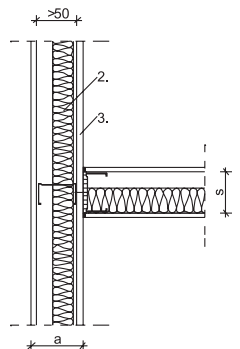
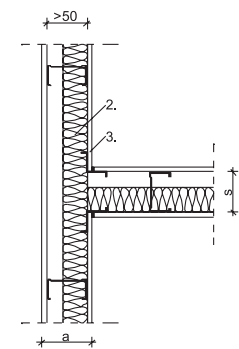
A légrés méretét a bordák mérete, osztott és kettős bordás szerkezeteknél az alsó és felső vezetősín határozza meg. A négy- és ötrétegű, fokozott hang-

8.3. táblázat. Szerelt falak léghangátlása

Szerkezet rétegrendje	$r_1 = r_2$, mm	l , mm	z , mm	b , mm	Borda	R_{w^*} , dB	Adat- forrás
	12,5 RF 12,5 RB 12,5 RB	50 75 100	40 40, 60 40, 60, 80	600 600 600	CW50 CW75 CW100	32 45 50	kat. kat. kat.
	2×12,5 RB 2×12,5 RB 2×12,5 RB	50 75 100	40 60 40, 80	600 600 600	CW50 CW75 CW100	51 53 55	kat. kat. kat.
	2×2×12,5 gipszkarton lemez	100	40	600	CW100	59	[III.3]
	2×12,5 RB 2×12,5 RB	75 100	60 80	600 600	CW75 CW100	56 57	kat. kat.
	2×12,5 RB 1×12,5 RB 2×12,5 RG	75+75	60+60	600	2×CW75	69	kat.

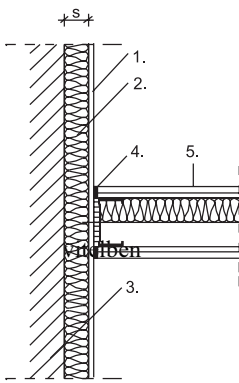
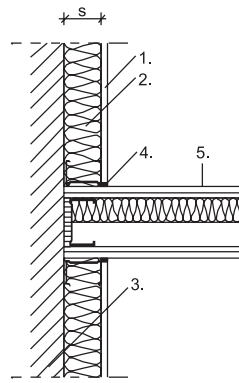
Kat: RIGIPS katalógus; RB, RF: RIGIPS gipszkarton lemez típusa; 1 gipszkarton lemez, 2 szálás szigetelőanyag, 3 bordaváz, 4 dilatáció

8.4. táblázat. Szerelt fal–szerelt fal csatlakozás hosszirányú súlyozott léghangátlási száma, R_{Lw} (a méretezés során felhasználható adatok [III.3] szerint)

Megszakítás nélkül átmenő fal		Szerelt átmenő fal, belső oldali réteg megszakítva	
			
3. jelű falréteg rétegeinek száma	R_{Lw} , dB	3. jelű falréteg rétegeinek száma	R_{Lw} , dB
1	53 dB	1	73 dB
2	57 dB	2	>75 dB

s a szomszédos helyiségeket elválasztó szerelt fal légrésének vastagsága, ≥ 50 mm, rétegrendje tetszőleges; 2 szálás szigetelőanyagú légréskitöltés, $r \geq 5$ kNs/m⁴; 3 az átmenő fal helyiség felőli kéreglemez, a az átmenő fal.

8.5. táblázat. Szerelt fal–átmenő fal csatlakozás hosszirányú súlyozott léghanggátlási száma, R_{LW} (a méretezés során felhasználható adatok [III.3] szerint)

	Közvetlen falcsatlakozás	R_{LW} , dB	
		Csatlakozás burkolaton keresztül (elvi ábra)	Csatlakozás megszakított burkolattal (elvi ábra)
Az átmenő fal fajlagos tömege, m'' , kg/m ²	A falrendszer dokumentációja szerinti kivitelben		
		$s \geq 40$ mm	$s \geq 60$ mm
100	43 dB	53 dB	63 dB
200	53 dB	57 dB	70 dB
250	55 dB	57 dB	71 dB
300	58 dB	58 dB	72 dB
400	62 dB	58 dB	73 dB

1 gipszkarton lemez, legalább 1 réteg, fajlagos tömege 10–15 kg/m²; 2 szálas szigetelőanyagú légréskitöltés, $r \geq 5$ kNs/m⁴; 3 átmenő falszerkezet, fajlagos tömege m'' , kg/m²; s az átmenő szerkezetet takaró burkolat légrésének vastagsága; 4 tartósan rugalmas kitt-tömítés; 5 tetszőleges rétegrendű szerelt fal, szegélyezéssel, peremtömítéssel, filc alátéttel

gátlású falszerkezetek táblázatban közölt metszete a laboratóriumi beépítést mutatja, amikor labordilatáció két oldalára építik a vizsgálandó szerkezetet. Ennek az a célja, hogy a laborszerkezeten keresztül kialakuló kerülőutas hangterjedést a beépítés a lehetőségekhez képest lecsökkentse. Az adatokból világos tendenciák fogalmazhatók meg, pl.:

- a légrés méretének növelése növeli a hanggátlást;
- a kéreglemezek fajlagos tömegének növelése növeli a léghanggátlást;
- a bordakapcsolatok „lazítása” növeli a léghanggátlást.

8.3.2. A szerelt falak peremei mentén átmenő szerkezeteken keresztül kialakuló hangterjedési utak hosszirányú léghanggátlása

A szerelt falak peremei mentén található átmenő szerkezetek – földemek, homlokzat, belső fal, álmennyezet stb. – hosszirányú hangterjedési utakat hoznak létre. E hangátviteli utakra a hosszirányú léghanggátlás a jellemző. Értéke az átmenő szerke-

zettől és a csomópont kialakításától függ. A 8.4.–8.7. táblázatok a következő csomópontokat és átmenő szerkezeteket tartalmazzák:

- szerelt fal–szerelt fal csomópont: 8.4. táblázat;
- szerelt fal–nehéz átmenő fal csomópontburkolat nélkül vagy burkolattal: 8.5. táblázat;
- szerelt fal–földem és szerelt fal–úszópadló csomópont: 8.6. táblázat.

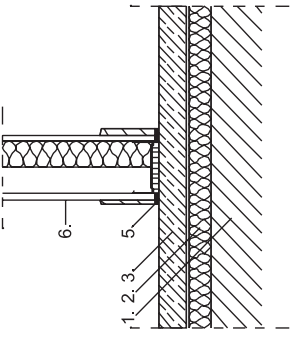
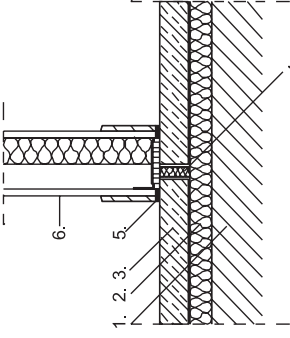
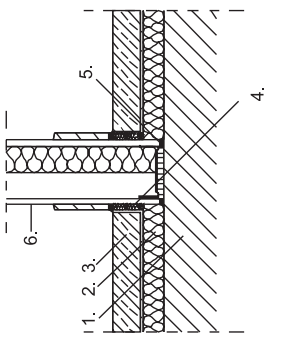
Az álmennyezeteken keresztül vezető hangátviteli utak hosszirányú léghanggátlásának néhány példája az álmennyezetekkel összefüggő részben található.

8.3.3. Álmennyezetek hangszigeteléssel összefüggő adatai

Álmennyezetekben többirányú hangterjedés játszódik le, ennek megfelelően a hangszigeteléssel összefüggően több adat megadására van szükség. Az álmennyezetek javítják a földem függőleges irányú hangszigetelését (mind léghanggátlás, mind szabványos lépéshangnyomásszint), ilyen jellegű adatokat azonban a katalógusok nem tartalmazznak.

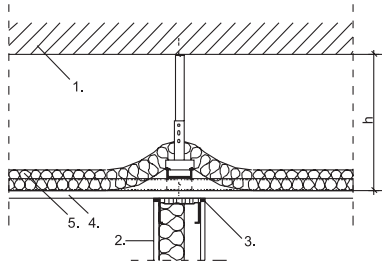
Egymás melletti helyiségek közötti léghang-

8.6. táblázat. Szerelt fal–átmenő födém csatlakozás hosszirányú súlyozott léghanggátlási száma, $R_{L,w}$ (a méretezés során felhasználható adatok [III.3] szerint)

$R_{L,w}$, dB				
	Csatlakozás födémhez	Csatlakozás jól méretezett üszópadlóra	Csatlakozás jól méretezett, dilatált üszópadlóra	Csatlakozás a födémre, üszópadló-szakaszok közé
Az átmenő fal fajlagos tömege, m'' , kg/m ²	A falrendszer dokumentációja szerinti kivitelben			
100	41 dB	na	na	na
200	51 dB	na	na	na
250	53 dB	na	na	na
300	56 dB	38 dB	55 dB	70 dB
400	60 dB			

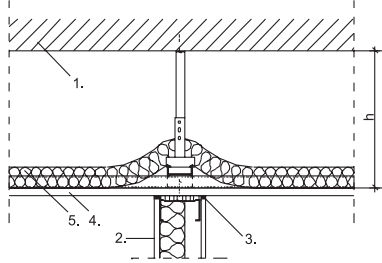
1 Födém, fajlagos tömege nagyobb, mint 300 kg/m²; 2 üszátatóréteg; 3 üszátott aljzat; 4 dilatációs hézag az üszátott aljzatban, szálas szigetelőanyag-csikkal kitöltve; 5 rugalmas peremcsatlakozás az üszátott aljzat és a szerelt fal között, felső szélé tartósan rugalmas kittel lezárva; 6 tetszőleges rétegrendű szerelt fal, szegélyezéssel, peremtömítéssel, filc alátéttel; na nincs adat, nincs az adatnak megfelelő szerkezet

8.7. táblázat. Tömör gipszkarton lemezből készült álmennyezet hosszirányú súlyozott léghanggátlási száma, $R_{L,w}$ (a méretezés során felhasználható adatok [III.3] szerint)

Álmennyezet és válaszfal csomópontja	Álmennyezet fajlagos tömege, kg/m ²	$R_{L,w}$, dB szálas szigetelőanyag-terítés vastagsága		
		0 cm	5 cm	10 cm
	9	40	51	57
	11	43	55*	59*
	22	50	56*	
	11	43	58	

Az álmennyezeti lapok légtömörök; az álmennyezet feletti légrés 400 mm-nél kisebb; a légrésben az álmennyezeti lapokra fektetve szálas szigetelőanyag-réteg van terítve, fajlagos áramlási ellenállása $r \geq 5$ kN/m⁴; az álmennyezeti lapok tömör gipszkartonból készültek; a válaszfal felett a *-gal jelölt adatok eléréséhez dilatáció szükséges; 1 földem; 2 tetszőleges rétegrendű szerelt fal; 3 tartósan rugalmas kitt-tömítés; 4 tömör, lemez jellegű álmennyezeti lap; 5 szálas szigetelőanyag-terítés.

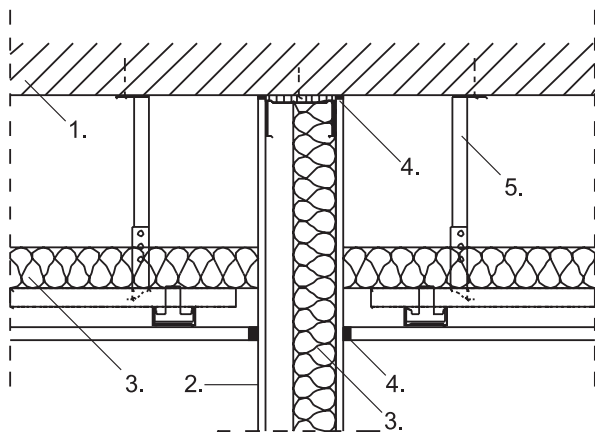
8.8. táblázat. Préselt, kemény ásványgyapot lemezből készült álmennyezet hosszirányú súlyozott léghanggátlási száma, $R_{L,w}$ (a méretezés során felhasználható adatok [III.3] szerint)

Álmennyezet és válaszfal csomópontja	Álmennyezet lapjának mini- mális fajlagos tömege, kg/m ²	Álmennyezet tömörsege $R_{L,w}$, dB	szálas szigetelőanyag-terítés vastagsága		
			0 cm	5 cm	10 cm
	$\geq 4,5$	áttört, perforált felület	26	37	45
		tömör felület, felső oldalon föliaterítés	30	43	52
	≥ 6	áttört, perforált felület	28	40	48
		tömör felület, felső oldalon föliaterítés	35	48	57
	≥ 8	áttört, perforált felület	31	43	52
		tömör felület, felső oldalon föliaterítés	40	53	60

Az álmennyezet feletti légrés 400 mm-nél kisebb; a légrésben az álmennyezeti lapokra fektetve szálas szigetelőanyag-réteg van terítve, a terítés felület folytonos, a réteg fajlagos áramlási ellenállása $r \geq 5$ kN/m⁴; az álmennyezeti lapok préselt ásványgyapot lemezből készültek; 1 földem; 2 tetszőleges rétegrendű szerelt fal; 3 tartósan rugalmas kitt-tömítés; 4 álmennyezeti lap; 5 szálas szigetelőanyag-terítés

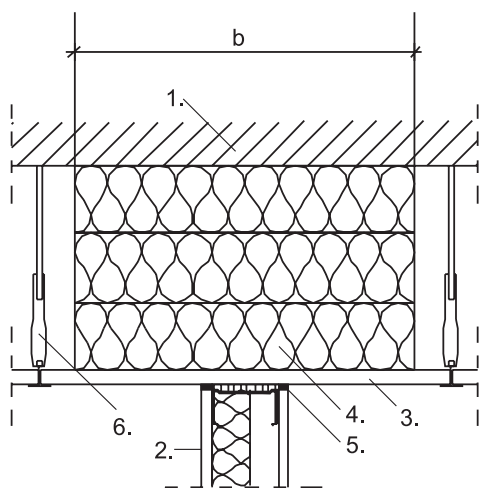
terjedés az álmennyezetten keresztül is lejátszódik, értéke számos szerkezeti részlettől és mérettől függ. Ezekből mutat néhány példát [III.3] szabvány alapján a 8.7.–8.8. táblázat. A táblázatokban megadott műszaki jellemzők alapján sok esetben meg lehet találni az egyébként megfelelő adatokkal nem ellátott álmennyezet rendszerek akusztikai adatait.

Az álmennyezet feletti hangterjedés hatékony csökkentésének az a legbiztosabb módja, hogy a két helyiséget elválasztó válaszfal a földem alsó síkjáig felmegy. Ennek egy példáját a 8.3. ábra mutatja. Az álmennyezet feletti tér utólagosan is elválasztható vagy fallal, vagy a légrésbe elhelyezett szigetelőanyag-lemezekkel, a 8.4. ábrának megfelelően.



8.3. ábra. Álmennyezet feletti légtér elválasztása szerelt fallal a [III.3] nyomán

1 földem; 2 tetszőleges rétegrendű szerelt fal, amely a földem alsó síkjáig felmegy; 3 szálás szigetelőanyag-kitöltés; 4 tartósan rugalmas kitt-tömítés; 5 az álmennyezeti rendszerre jellemző rögzítőszerelvények



8.4. ábra. Álmennyezet feletti tér elválasztása szálás szigetelőanyag-lemezekkel a [III.3] nyomán

1 földem; 2 tetszőleges rétegrendű szerelt fal; 3 álmennyezet; 4 szálás szigetelőanyag-elválasztás, melynek b szélessége a javítás mértékétől függ; a szigetelőanyag fajlagos áramlási ellenállása $r \geq 8 \text{ kN/m}^4$; 5 tartósan rugalmas kitt-tömítés; 6 az álmennyezeti rendszerre jellemző rögzítőszerelvények

A 8.9. táblázat az álmennyezet feletti hangterjedési út hosszirányú súlyozott léghanggátlásának javulását, ΔR_{Lw} -t adja meg a szigetelőanyag-réteg szélességének függvényében.

Általánosságban az álmennyezetek hosszirányú léghanggátlásának értékében lényeges tényező az, hogy az álmennyezet szerkezeti rendszere rejtett vagy látszó bordás, és ezzel összefüggésben az is, hogy a lapok mennyre tömören vagy réseken illeszkednek egymáshoz. Minél tömörebb egy álmennyezet, annál nagyobb lesz minden hangszigetelési jellemzője.

8.9. táblázat. Álmennyezet felett vezető hangterjedési út ΔR_{Lw} hosszirányú súlyozott léghanggátlási számának javulása a szigetelőanyag-réteg szélességének függvényében [III.3] nyomán (l. a 84. ábrát)

b, m	$\Delta R_{Lw}, \text{dB}$
0,3	12
0,4	14
0,5	15
0,6	17
0,8	20
1,0	22

8.3.4. Álmennyezetek hangelnyelési tényezője

Az álmennyezetek hangelnyelési tényezője – összhangban a 4.13. alfejezettel – számos szerkezetjellemzőtől függ, általános tendenciák csak nagyon minimális információ-tartalommal adhatók meg. Ezért példaként ebben a részben konkrét termékjellemzők találhatók az OWA és a RIGIPS termék-választékából. A termék azonosítása a megnevezéssel történik, a katalógus az álmennyezeti lapok nézeti képét is tartalmazza. Kiegészítésül – ahol az adat rendelkezésre áll – a hosszirányú súlyozott léghanggátlási szám adata is szerepel (8.10. és 8.11. táblázat).

8.10. táblázat. OWA álmennyezetek hangelnyelési tényezője és hosszirányú súlyozott léghanggátlási száma (katalógusadatok)

Típus	Jelleg	Légrés, cm	α						a_w	$R_{L,w}$
			f , Hz							
			125	250	500	1000	2000	4000		
Harmony 72	áttört felületű	na	0,43	0,62	0,67	0,8	1	1	0,75	31
Schlicht 9	tömör felületű	na	0,23	0,17	0,12	0,16	0,16	0,16	0,15	42
Sandilla N	áttört felületű	na	0,49	0,51	0,58	0,63	0,49	0,29	0,5	nincs adat
Sandilla O	tömör felületű	na	0,23	0,17	0,12	0,16	0,16	0,15	0,15	nincs adat
Sternbild	áttört felületű	na	0,47	0,58	0,6	0,72	0,79	0,67	0,7	35

na nincs megadva adat.

8.11. táblázat. RIGIPS álmennyezetek hangelnyelési tényezője (katalógusadatok)

Típus	Jelleg	Légrés, cm	Szálás szigetelő- anyag-terítés vastagsága, cm	α						α_w
				f , Hz						
				125	250	500	1000	2000	4000	
Casovoice	perforált gipszakrton lap	30	–	0,3	0,6	0,55	0,5	0,5	0,45	0,55(L)
			7,5	0,5	0,7	0,6	0,55	0,5	0,45	0,55(L)
Casostar, Casoroc	tömör gipszakrton lap	30	7,5	0,37	0,28	0,17	0,13	0,08	0,08	0,15(L)
Decogips Leone, Fisurado	érdes felületű gipsz lap	30	7,5	0,37	0,28	0,17	0,13	0,08	0,08	0,15(L)
		10		0,62	0,37	0,15	0,07	0,06	0,02	0,1(L)
Gyptone LINE6	perforált gipszkarton lap	30	7,5	0,53	0,76	0,68	0,59	0,45	0,48	0,5(L)
		10		0,51	0,84	0,78	0,57	0,46	0,44	0,55(LM)
Gyptone, Quattro 41	perforált gipszkarton lap	30	7,5	0,56	0,86	0,76	0,68	0,62	0,57	0,7(L)
		10		0,51	0,89	0,85	0,67	0,61	0,56	0,7(L)
Gyptone, Quattro 47	perforált gipszkarton lap	30	7,5	0,51	0,63	0,53	0,41	0,32	0,27	0,4(L)
		10		0,54	0,63	0,55	0,39	0,31	0,27	0,4(L)

A katalógusadatok a 8.3.3. pontban már terméktől függetlenül ismertetett hosszirányú hangszigetelés adatait is tartalmazta. Ezek az adatok a katalógusokban azonban nem kellően pontos, inkább csak tájékoztató adatként értékelhetők.

A hangelnyelési–hangszigetelési sajátosságokat áttekintve általános tendenciát azonban érdemes megfogalmazni. A hangelnyelési tényező szempontjából az áttört, perforált álmennyezeti lapok előnyösek, hangszigetelés szempontjából azonban nem. Tehát a hangelnyelési tulajdonságokra az álmennyezet szerkezeti rendszere (látszó bordás, rejtett bordás stb.) nincs különösebb hatással, azonban a hangszigetelésre igen: a tömör szerkezeti megoldások (tömör felületű álmennyezeti lap, rejtett bordás függesztési rendszer, az álmennyezet hátoldalán a tömörséget javító fóliaterítés stb.) sokkal előnyösebbek.

8.4. Födémek hangszigetelési tulajdonságai

A födémeket a rendeltetésszerű használat során kétféle akusztikai terhelés, léghang- és lépéshangterhelés éri, ezért legalább két hangszigetelési termékjellemzőt kell megadni (l. az 5. fejezetet is).

A gyakorlatban előforduló szerkezetek súlyozott léghanggátlási száma a szerkezet fajlagos tömege alapján becsülhető, a szabványos lépéshangnyomásszint általában csak mérési adat lehet. Homogén szerkezeteknél a súlyozott szabványos lépéshangnyomásszint értékét vastagságváltozás esetén korlátozottan át lehet számítani. A leggyakrabban előforduló szerkezeti adatokat a 8.12. táblázat foglalja össze. Az adatok a légtömör, rés- és hézagmentes szerkezetekre vonatkoznak.

A táblázatban közölnél vastagabb monolit vas-

8.12. táblázat. Födémek hangszigetelési termékjellemzői

Szerkezet	Vastagság, cm	m'' , kg/m ²	R_w , dB	L_{nw} , dB
Porotherm profipanel, legalább 13 cm felbetonnal*	legalább 18	405	53	73
Porotherm födémrendszer 45 cm tengelytávolsággal*	21	300	48,5	87
Monolit vasbeton szerkezet [III.2]	12	288	46	80
Monolit vasbeton szerkezet [III.2]	15	360	54	76
E gerendás, Bj jelű béléstestű födém, alulról vakolva, felülről 5 cm felbetonnal**	25	372	53	80
PK-PS födém, alulról vakolva, felülről 5 cm felbetonnal**	25	390	446	74

* termékkatalógus adata; ** ÉTI labormérés.

8.13. táblázat. Padlóburkolatok DL_w súlyozott szabványos lépéshangnyomásszint-csökkenése (tájékoztató jellegű adatok)

Szerkezet	Megjegyzés	DL_w dB
Kemény burkolat		0
Kemény PVC		8–12
Habalátétes PVC		18–25
Jó minőségű szőnyegpadló		20–26
Úszópadló általában	az úsztatott aljzat 5 cm-nél vastagabb	~ 25
Jobb minőségű úszópadló	az úsztatott aljzat 5 cm-nél vastagabb	~ 30
Úszópadló vastag úsztatórétgen	az úsztatott aljzat 5 cm-nél vastagabb	~ 35

beton födémek a táblázat értékeiből átszámíthatók. Például 20 cm vastag szerkezet fajlagos tömege mintegy 440 kg/m², így súlyozott léghanggátlási száma a 4.19. ábra alapján 55–56 dB. A szabványos lépéshangnyomásszint [IV.7] alapján a (8.2) képlettel számítható át:

$$L_{nw2} = L_{nw1} + 35 \cdot \lg\left(\frac{d_1}{d_2}\right); \quad (8.2.)$$

Az 1-es indexű adatok a kiindulási szerkezet méréssel meghatározott jellemzői; a 2-es indexű adatok az azonos szerkezetű, megváltozott vastagságú szerkezetre jellemző adatok; L_{nw} a súlyozott léghanggátlási szám; d a vastagság.

A képlet alapján a 20 cm vastag monolit vasbeton födém súlyozott szabványos lépéshangnyomásszintje kerekítve 72 dB lesz.

8.5. Padlóburkolatok hangszigetelést javító hatása

A padlóburkolatokat szerkezeti szempontból a következő négy csoportra osztják:

- kemény burkolatok (kő, csempe stb.);
- lágypadlóburkolatok (szőnyegpadló, PVC-padló);
- hajlékony burkolatok (pl. száraz esztrich);
- úszópadló.

A kemény burkolatok csak olyan mértékben befolyásolják az alapszerkezet hangszigetelését, amilyen mértékben megnövelik a tömegét.

A lágypadlóburkolatok a léghanggátlást gyakorlatilag nem befolyásolják, a szabványos lépéshangnyomásszintet lecsökkentik. A csökkentés termékjellemző, néhány tájékoztató érték a 8.12. táblázatban található.

A hajlékony burkolatok a léghanggátlást gyakorlatilag nem befolyásolják, a szabványos lépéshangnyomásszintet bizonyos mértékben csökkentik. Általában száraz esztrichekkel $\Delta L_w = 18–20$ dB súlyozott szabványos lépéshangnyomásszint-csökkenés érhető el.

Az úszópadlókkal laboratóriumi beépítésben hatékonyan növelhető a léghanggátlás és hatékonyan csökkenthető a szabványos lépéshangnyomásszint. A helyszíni beépítésben a léghanggátlás-javulás a kerülőutak hatása miatt csak olyan csekély mértékben jelenik meg, hogy azt méretezési tartaléknak célszerű tekinteni (azonban a helyszíni hangszigetelés számításakor figyelembe kell venni, l. pl. a 9.3. alfejezetet). A szigetelésjavulás az úsztatott aljzat fajlagos tömegétől, az úsztatórétgen fajlagos dinamikai merevségétől, valamint nagyon sok szerkezeti részlettől függ. Érdekes módon a teljes úszópadló súlyozott szabványos lépéshangnyomásszint-csökkenése csak csekély mértékben függ a járórétgtől, ha az úsztatott aljzat fajlagos tömege 100 kg/m²-nél nagyobb. Ha az úsztatórétgen fajlagos dinamikai merevsége 20 MN/m³ vagy annál kisebb, a hatás nem jelenik meg, ennél merevebb úsztatott aljzat esetén a hatás 1–4 dB között változik a [III.3] alapján.

Mindezek következtében a helyszínen tapasztalható hatás a kivitelezés minőségére nagyon érzékeny. Jó minőségben kivitelezett szerkezetek tájékoztató értékei a 8.13. táblázatban találhatók. (A termékekre vonatkozó adatok a 8.6. alfejezetben találhatók.)

8.6. Úsztatórétgek fajlagos dinamikai merevsége

Az úsztatórétgek lehetséges anyagai közül példaként üvegyapot, ill. PS-hab termékek példáit mutatja be katalógusadatok alapján (8.14. táblázat).

Az anyagmegadás a megnevezés mellett a terheletlen és a névleges terhelés hatására kialakuló vastagság mm-ben megadott értékeit tartalmazza. A terhelhetőség lényeges szempont, az úsztatórétgen kiválasztásának ez az egyik kritériuma (a másik a fajlagos dinamikai merevség). A katalógusokban gyakran (és kellő körülhatárolás nélkül) közölnek ΔL_w adatot is, amelynek forrása valószínűleg az [I.15] szab-

8.14. táblázat. ISOVER gyártmányú, üveggyapot úszató-rétegek akusztikai adatai gyári termékismertető alapján

Megnevezés	P_{max} kN/m ²	Fajlagos dinamikai merevség, s'' , MN/m ³
TANGO 20/15	5	12,0
TANGO 25/20		10,5
TANGO 30/25		9,0
TANGO 35/30		7,5
TANGO 40/35		6,5
TDPS 20/15	6,5	12,0
TDPS 25/20		10,5
TDPS 30/25		9,0
TDPS 35/30		7,5
TDPS 45/40		6,0
TDPT 15/15	10	22
TDPT 20/20		19,5
TDPT 25/25		16,0
TDPT 30/30		13,0
TDPT 35/35		11,5
TDPT 50/50		10,0

P_{max} terhelhetőség.

8.15. táblázat. Austrotherm gyártmányú, expandált polisztirolhab úszatórétegek akusztikai adatai gyári termékismertető alapján

Megnevezés	P_{max} kN/m ²	Fajlagos dinamikai merevség, s'' , MN/m ³
AT-L2 18/15	2	≤ 20
AT-L2 23/20		≤ 20
AT-L2 29/23		≤ 15
AT-L2 34/30		≤ 15
AT-L2 45/40		≤ 10
AT-L4 27/25	4	≤ 30
AT-L4 32/30		≤ 20
AT-L4 52/50		≤ 15

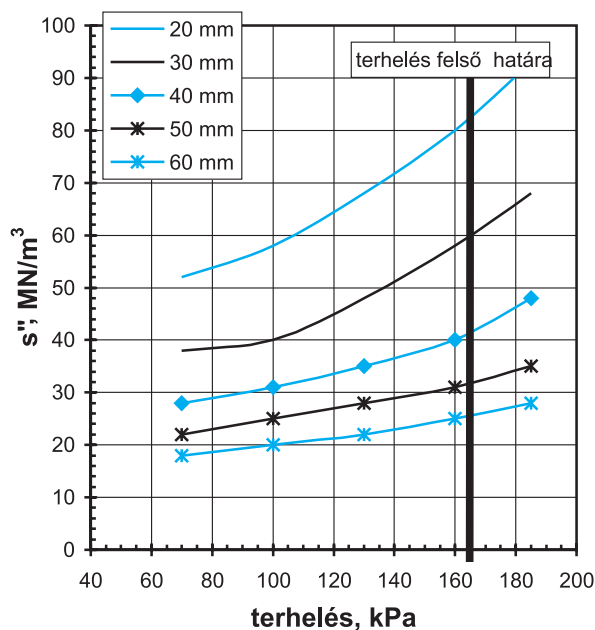
P_{max} terhelhetőség.

vány mechanikus alkalmazása. A számítást segítő grafikon a 4.39. ábrán található. Ilyen jellegű adatot csak nagy körültekintéssel szabad alkalmazni!

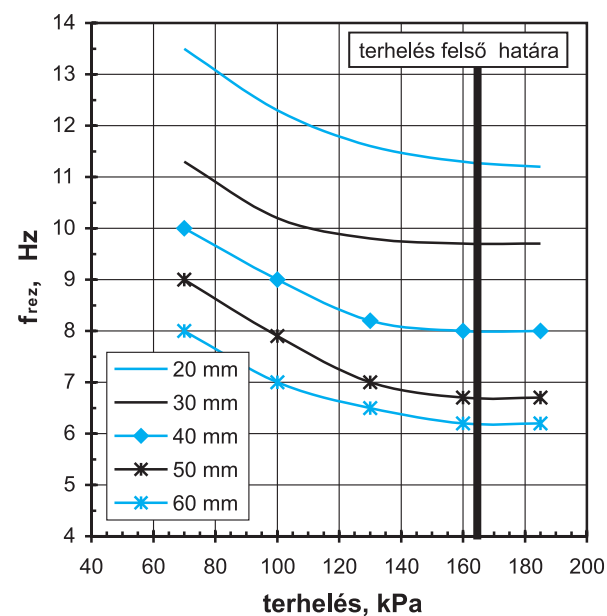
A 8.15. táblázat példákat mutat Austrotherm gyártmányú, expandált polisztirolhabból készült úszatórétegek dinamikai merevségére. Az adatmegadás a [II.34] szabvány alapján történt.

8.7. Rezgésszigetelő lemezek akusztikai adatai

A rezgésszigetelő lemezek fajlagos dinamikai merevsége általában terhelésfüggő. Ezért az adatmegadás alapja a fajlagos dinamikai merevség terhelésfüggő értékeinek megadása. Ezzel egyenértékű és a méretezést jobban segíti, ha a terhelés, a rugal-



8.5. ábra. CDM-01 típusú rezgésszigetelő lemez fajlagos dinamikai merevsége a rétegvastagság és a terhelés függvényében



8.6. ábra. CDM-01 típusú rezgésszigetelő lemezzel elérhető rezonanciafrekvencia a rétegvastagság és a terhelés függvényében

mas réteg vastagsága és az elérhető rezonanciafrekvencia összetartozó értékei szerepelnek az adatközlésben.

A 8.5. ábra a CDM 01 típusú rezgésszigetelő lemez fajlagos dinamikai merevségét, a 8.6. ábra pedig a keletkező rendszer rezonanciafrekvenciáját mutatja a statikus terhelés és a rétegvastagság függvényében.

8.8. Ablakok, erkélyajtók léghanggátlása

Az ablakok, erkélyajtók összetett, több szerkezeti elemből álló, mozgó alkatrészeket is tartalmazó épületszerkezetek. Léghanggátlásuk valamennyi szerkezeti elemtől függ, ezek összetartozó, kiegyenlített minőséget eredményező értékei nagyszámú mérési tapasztalat alapján alakultak ki. A különböző hangszigetelési kategóriákat és az ezekhez tartozó szerkezeti jellemzőket a 8.16. táblázat foglalja össze.

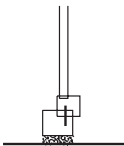
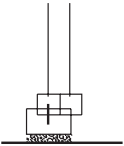
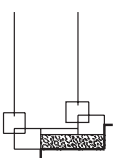
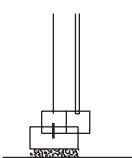
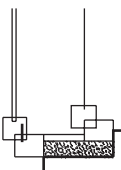
A táblázat lényeges szerkezeti összetevőkre utaló jelölései és értelmezésük:

■ *szerkezeti rendszer, SZ*: napjainkban a hőszigetelő üvegezésű ablakok – **HŐ** – alkalmazása általánosan elterjedt, a korábbi évtizedekben az egyesített szárnyú – **ES** – és a kapcsolt gerébtokos

– **KG** – rendszer volt a jellemző; kifejezetten az akusztikai igények miatt jött létre a hőszigetelő üvegezés továbbfejlesztésével a háromrétegű üvegezésű szerkezetek családja, ha a kiindulási szerkezet az üvegezés rétegrendje és a szerkezeti megoldások miatt az egyesített szárnyúra emlékeztet, akkor **EH**, ha a kapcsolt gerébtokos ablakra emlékeztet, akkor **KH** a jele;

■ *ablakszerkezet anyaga, SA*: fém, fa, műanyag vagy ezek közül kettő kombinációja, jelölésük sorrendben, **FÉ, FA, MŰ, KO**; a hangszigetelésre a szerkezet anyagának nincs közvetlen hatása, közvetve a mérettartósság, pontos illeszkedés, záródás miatt a szerkezet anyaga fontos szerepet játszik;

8.16. táblázat. Ablakok léghanggátlása

SZ		SA	ÜÖ, mm	ÜS, mm	LK	TF	TS	NY	R _w , dB
	HŐ	FA, MU, KO	8	20	levegő	PU	1*	NO	31–34
	HŐ	FA, MU, KO	8	24	levegő	PU	1*	NO	35–36
	HŐ	FA, MU, KO	11–15	30–36	levegő	PU	1*, 2*	NO	<38
	HŐ	FA	15	27	SF ₆	PU	2*	NO	39
	HŐ	MU	10	24	SF ₆	PU	2*	NO	40
	HŐ	MU	12	32	SF ₆	PU	2*	NO	42
	ES	FA	6–8	46–50	levegő	PU	nincs	NO, NK	20–28
	ES	FA	6–8	46–50	levegő	PU	1*	NO, NK	29–32
	KG	FA	6–8	126–136	levegő	PU	nincs	NK	30–38
	KG	FA	6–8	126–136	levegő	PU	1*	NK	40–42
	KH	FA	12	154	levegő	PU	1* + 1*	NO, NK	43
		FA	22	170	levegő	PU	1* + 1*	NO, NK	46
		FA	12	204	levegő	PU	1*	NK	43
	EH	FA	12	62	levegő	PU	2*	NO	38
		FA	17	75	levegő	PU	2*	NO	42

- **összes üvegvastagság, ÜÖ:** a hőszigetelő üvegszerkezetben vagy más ablakszerkezetben levő üvegtáblák összes vastagsága; ha valamelyik tábla laminált, ragasztott felépítésű, akkor azt jelölni kell, pl. a (4+4) jelölés azt fejezi ki, hogy valamelyik üvegtábla két darab, egyenként 4 mm vastag üvegtáblából lett összeragasztva;
- **az üvegszerkezet teljes vastagsága, ÜS:** a szerkezetet határoló külső üvegtáblák külső oldala által meghatározott vastagság, amely a légrések és az üvegtáblák összvastagsága;
- **légréskitöltés, LK:** akusztikai okok miatt a fokozott hanggátlású, hőszigetelő üvegezésű szerkezetek belső légrését nem levegő, hanem gáz vagy gázkeverék tölti ki; a kitöltés a gyakorlatban SF₆, Ar vagy ezek keveréke; ha nincs megadva vagy az ablak nem tartalmaz hőszigetelő üvegezést, akkor értelemszerűen levegő a kitöltés; ha a gáztöltés anyaga ismeretlen volt, csak a ténye volt ismert, azt gáz jelölés fejezi ki;
- **tömítés a falnyílás és a tok között, TF:** anyaga szálás szigetelőanyag, SZ, vagy PU-hab, a felületen a réseket tartósan rugalmas, vízzáró kitta zárja le; a laboratóriumi vizsgálatokban általában PU-habot alkalmaznak;
- **tömítés a szárnykeret és a tok között, TS:** rugalmas gumiprofil, többféle méretben és belső szerkezettel kapható; a tömítések száma fontos jellemző (egyszeres, kétszeres stb.);
- **nyílásmód, NY:** oldalt felnyíló, NO középen felnyíló, NK, bukó-nyíló, NB lehet, elsődleges szerepük nincs; azonban a méretpontosságok miatt a legkedvezőbb az oldalt felnyíló, legkevésbé jó

a bukó-nyíló rendszerű szerkezet; egy hangszigetelési kategória csak a vizsgált nyílásmódú szerkezetre vagy az annál kedvezőbb szerkezet-re vonatkozik.

Az erkélyajtók szerkezeti rendszere megegyezik az ablakokkal, a lényeges eltérés a méreteken és a küszöbmegoldásban van. Ennek ellenére kiindulásként a 8.16. táblázat adatai alkalmazhatók.

8.9. Ajtók hangszigetelése

Az ajtók hangszigetelése szintén erősen szerkezeti és beállításfüggő. Nem gyűlt még össze annyi tapasztalat, hogy a hangszigetelés különböző minőségi kategóriáihoz az általános, gyártmánytól független szerkezeti jellemzőket meg lehessen adni. Természetesen például egy lakásbejárati ajtó hangszigetelését meghatározó szerkezeti részletek specifikálásához elegendő ismeret áll rendelkezésre, a gyakorlat azt mutatja, hogy ezekkel a szerkezetgyártók is rendelkeznek.

8.10. Berendezési tárgyak, burkolatok, határolószerkezetek személyek hangelnyelési tényezője és egyenértékű hangelnyelési felülete

A beszédcélú, kisebb térfogatú, szabályos alakú helyiségek utózengei idejének beállításához számításba kell venni a bútort, a személyek hangelnyelési tényezőjét is. A 8.17.–8.19. táblázatok ezekből közölnek néhány példát a [III.10] szabványtervezetben található, sokirányú adatgyűjtés alapján.

8.17. táblázat. Különböző anyagú határolószerkezetek hangelnyelési tényezője a [III.10] alapján

Határolószerkezet anyaga	α					
	f, Hz					
	125	250	500	1000	2000	4000
Beton, vakolt tégl	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03
Vakolatlan tégl	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,07
Kemény felületű padlóburkolatok nehéz födémen	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05	0,06
5 mm-nél vékonyabb szőnyegpadló	0,02	0,03	0,06	0,15	0,3	0,4
10 mm-nél vastagabb szőnyegpadló	0,04	0,08	0,15	0,3	0,45	0,55
Párnafákra fektetett faparketta	0,12	0,1	0,06	0,05	0,05	0,06
Üvegezett felületű homlokzat vagy homlokzati rész	0,12	0,08	0,05	0,04	0,03	0,02
Faajtó	0,14	0,1	0,08	0,08	0,08	0,08
Sima függöny kemény felülettől 0–20 cm távolságra, a függöny fajlagos tömege 0,2 kg/m ² -nél kisebb	0,05	0,06	0,09	0,12	0,18	0,22
Gyapjú alapanyagú függöny, fajlagos tömege $\geq 1,4 \text{ kg/m}^2$, redőzve függ a kemény felület előtt 0–20 cm távolságra	0,1	0,4	0,7	0,9	0,95	1
Nagyméretű nyílás	1	1	1	1	1	1
50%-ban áttört felületű szellőzőrács	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5

8.18. táblázat. A bútorzat és a személyek hangelnyelési tényezője az elfoglalt alapterületre vonatkoztatva a [III.10] alapján

Személy, bútorzat, objektum	f , Hz					
	125	250	500	1000	2000	4000
Fa, műanyag széksorok 0,9–1,2 m sortávolsággal	0,06	0,08	0,1	0,12	0,14	0,16
Széksor kárpitozott székekből 0,9–1,2 m sortávolsággal (tipikus minimum)	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,5
Széksor kárpitozott székekből 0,9–1,2 m sortávolsággal (tipikus maximum)	0,5	0,7	0,8	0,9	1,0	1,0
Ülő személyek 0,9–1,2 m sortávolsággal (tipikus minimum)	0,2	0,4	0,5	0,6	0,7	0,7
Ülő személyek 0,9–1,2 m sortávolsággal (tipikus maximum)	0,6	0,7	0,8	0,9	0,9	0,9
Kemény bútorzatú osztályteremben 1 m ² /fő sűrűséggel ülő gyerekek	0,1	0,2	0,25	0,35	0,4	0,4

8.19. táblázat. Egyes emberek és bútorok egyenértékű hangelnyelési felülete a [III.10] alapján

Személy, bútor, objektum	f , Hz					
	125	250	500	1000	2000	4000
Faszék	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04	0,04
Kárpitozott szék	0,1	0,2	0,25	0,3	0,35	0,35
Álló személy 1 fő/6 m ² , tipikus minimum	0,12	0,45	0,8	0,9	0,95	1
Álló személy 1 fő/6 m ² , tipikus maximum	0,12	0,45	0,8	1,2	1,3	1,4

9.

MÉRETEZÉSI MÓDSZEREK ÉS ELVI ALAPJAIK

9.1. A méretezési módszerek célja, alkalmazási területei

A 9. fejezetben olyan méretezési módszerekről lesz szó, amelyek számszerűen kifejezett akusztikai tervezési célok teljesülésének előzetes ellenőrzését teszi lehetővé. E méretezési módszerek elméleti alapjai a korábbi fejezetekben találhatók, különösen a 2., 3. és 4. fejezetben, a felhasznált építési termékek (anyagok, szerkezetek, berendezések) akusztikai jellemzőit az 5. fejezet ismertette, a helyszíni szituációk akusztikai jellemzőit pedig a 6. fejezet foglalta össze. A számszerű tervezési célok legfontosabb elemeit a 7. fejezet írta le.

A méretezési módszerek alapvetően a szabad- és diffúz téri hang- és rezgésterjedés, a csatolás és hangsugárzás elméletén alapulnak, amit tapasztalati korrekciók tesznek biztonságossá.

A méretezési módszerek alkalmazásának legcélszerűbb helye az engedélyezési és a tenderterv kidolgozásának ideje, ekkorra már rendelkezésre állnak azon adatok és információk, amelyek alapján a konkrét méretezések elvégezhetők. Az egyes akusztikai feladatok elvileg önmagukban, egymástól függetlenül megoldhatók, azonban az eredményeken, tehát például a kiválasztott szerkezeteken keresztül az önálló feladatok kapcsolatban vannak egymással.

A számításokon alapuló méretezési módszerek tervezési folyamatban célszerű elhelyezkedése nem jelenti azt, hogy az engedélyezési terv kidolgozása előtt ne lennének akusztikai részfeladatok. E munkarészek azonban az akusztikai feladatok szempontjából inkább a feladatszabást jelentik, amit az engedélyezési terv és a tenderterv (esetleg kiviteli terv) kidolgozása során kell megoldani. A település léptékű tervezéshez egyébként több akusztikai munkarész kapcsolódik, ezeket azonban a könyv nem tárgyalja.

A méretezési módszerek végeredménye az egyes szerkezetekre vagy berendezésekre a terv szerinti szituációban vonatkozó számszerű előírás, például

egy meghatározott esetben olyan falszerkezetre van szükség, amelynek fajlagos tömege 250 kg/m^2 és hangszigetelési termékjellemzője $R_w \geq 45 \text{ dB}$. A szerkezetet gyártmány szerint ezen értékek alapján lehet kiválasztani.

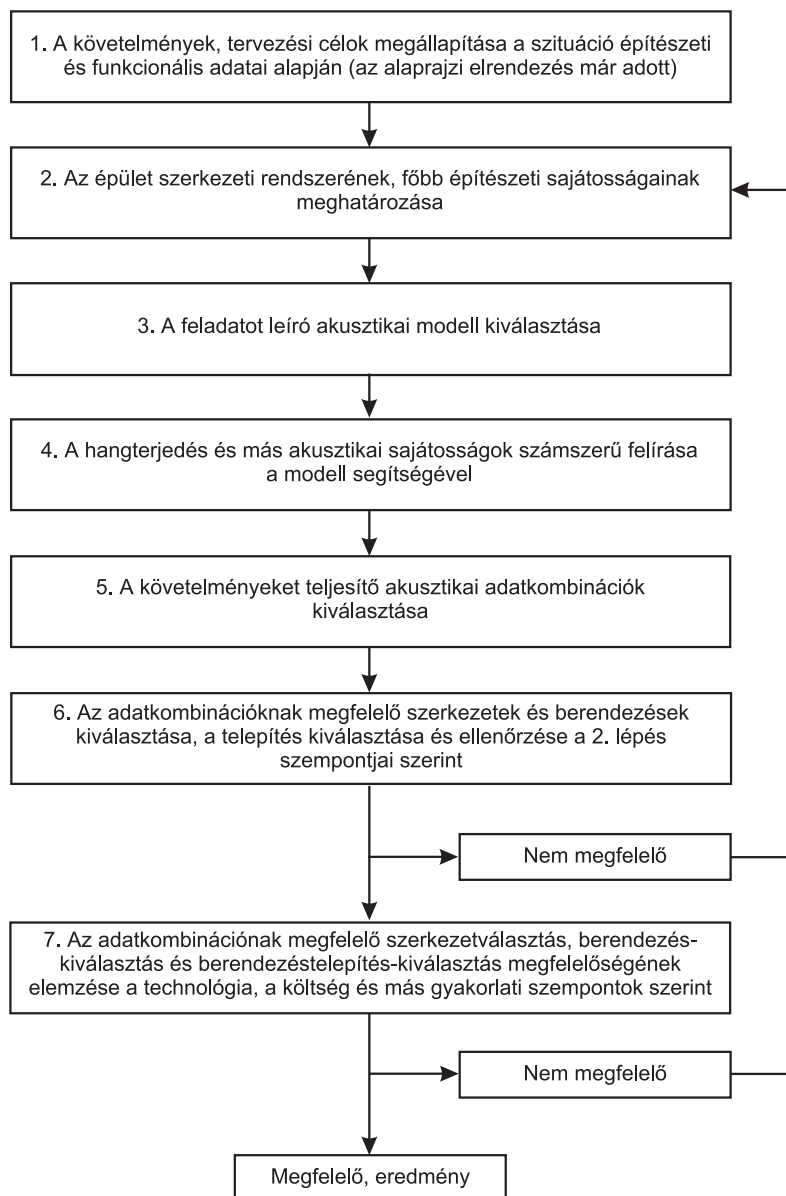
Az akusztikai tervezésnek van egy meglehetősen népszerű és általánosan elterjedt empirikus formája, amely lényegében a gyakorlati tapasztalatok adaptálásán alapul. Azonban napjainkban egyre inkább (bár inkább csak Európa fejlett ipari országai-ban) elterjedt az a határozott igény, hogy a különböző megoldási javaslatok helyességét számításokkal támasszák alá. Az [I.13] rendelet tételelesen, más dokumentumok utalásokkal [I.6] vagy egyelőre inkább a szellemükön keresztül, pl. az [I.14] azt a világos igényt fejezik ki a hazai építési gyakorlatban is, hogy a javasolt megoldásokat számításokkal is ellenőrizzék. Más tervezési szakágakban, statika, talajmechanika, energetikai méretezés, fűtésméretezés stb. ez nagyon rég óta természetes sajátosság. Az akusztikai tervezés méretezési módszereken alapuló gyakorlata azért is napjaink és a közeljövő útja, mert a tisztán empirikus feladatmegoldás nem képes felfedni az új szerkezetek és berendezések sajátosságainak hatását.

Ebben a fejezetben részletesebben ismertetett méretezési módszerek az épületléptékű tervezés feladataihoz kapcsolódnak. Az akusztikai méretezés általános lépéseit a 9.1. folyamatábra foglalja össze.

A visszacsatolási ágakra az akusztikai méretezés ellenőrzése során kerülhet sor, ha a kapott eredmény valamilyen gyakorlati szempont szerint nem felel meg.

A méretezési módszerek sorrendben a következő feladatok megoldását segítik:

- homlokzati szerkezetek kiválasztása a külső, közlekedési zaj elleni védelem céljából (9.2. alfejezet);
- épületek határolószerkezeteinek kiválasztása a helyiségek közötti léghangszigetelés szempontjából, ha a határolószerkezetek nehéz, falazott, előre gyártott, öntött szerkezetek; e feladatra több



9.1. ábra. Az akusztikai méretezés folyamata

- módszer ismertetése megtalálható, mert ezek alkalmazási területe csak részben vagy egyáltalán nem fedik át egymást (9.3. és 9.4. alfejezet);
- épületek egymás melletti helyiségei közötti lég-hangszigetelés méretezése, ha a helyiséget elválasztó falszerkezet szerelt jellegű (9.5. alfejezet);
- épületek határolószerkezeteinek kiválasztása a helyiségek közötti lépéshang elleni hangszigetelés szempontjából, különböző megközelítésekkel (9.6., 9.7. és 9.8. alfejezet);
- vízellátási berendezések típusának kiválasztása jelenlegi ismereteink szerint (9.9. alfejezet);
- üzemi létesítmények zajkibocsátásának méretezése; több módszer egyesített alkalmazásával (9.10. alfejezet);

- helyiségek utószigetelési idejének és egyenértékű hangelnyelési felületének meghatározása diffúz téri közelítéssel (9.11. alfejezet).

9.2. Helyiségek külső határolószerkezeteinek méretezése a közlekedési zaj elleni védelem szempontjából

9.2.1. A méretezés elvi alapjai

Épületek helyiségeibe a külső határolószerkezeteiken keresztül jut a közlekedési zaj. Minél kisebb egy határolószerkezet hangszigetelése, és minél nagyobb e szerkezet felülete, annál nagyobb a helyi-

ségekbe bejutó akusztikai teljesítmény. Ezért a helyiségek közlekedési zaj elleni védelmét a határoló-szerkezetek hangszigetelésével lehet elérni.

A méretezés célja a helyiségek külső határoló-szerkezeteinek – méretek, szerkezetek, hangszigetelési sajátosságok – kiválasztása úgy, hogy a közlekedési zaj elleni védelem szempontjából a szükséges hangszigeteléssel rendelkezzenek.

A méretezés kiindulási adatai a következők:

- a közlekedés okozta zajterhelés a határolószerkezet külső oldalán; nagysága a forgalom erősségétől, a védendő épület és a járművek pályája közötti távolságtól, a járművek pályája és a védendő épület közötti terepakadályoktól függ; a méretezés során azt is pontosan ismerni kell, hogy az épület külső határolószerkezeteihez képest a terhelésre jellemző mérési adatok milyen térbeli helyekre vonatkoznak;
- a külső határolószerkezetek felülete és hangszigetelésükre jellemző akusztikai mennyiségek (pl. léghanggátlási szám, szabványos hangnyomásszint különbség, súlyozott léghanggátlási szám, színeképillesztési tényező stb.);
- a zaj ellen védendő helyiség rendeltetése és/vagy a közlekedési zaj megengedhető mértéke e helyiségekben.

A méretezés lényegében két feladatrészből áll:

- a) a feladatra vonatkozó akusztikai követelmény megállapítása;
- b) a követelményt teljesítő külső határolószerkezetek kiválasztása.

Számos európai ország nemzeti szabványaiban található méretezési módszerek – pl. [I.11], [I.15] stb. – a szituáció felsorolt adataiból közvetlenül megadják a zaj ellen védendő helyiség homlokzati szerkezete szükséges eredő léghanggátlási számát. Ez tehát a követelmény. A méretezési módszerek további lépései a b) feladatrészt oldják meg a méretek figyelembevételével. Ily módon a követelmény és a méretezés szorosan illeszkednek egymáshoz, és egyúttal az ellenőrizhetőség is jól megoldott a helyszíni léghanggátlás mérésével. Az [I.16] a b) lépésre ad algoritmizált megoldást, feltételezve, hogy a követelmény a homlokzat eredő súlyozott léghanggátlási száma.

A magyar szabályozás e könyv megírásának idején sajnos még nem jutott el addig, hogy a fenti rendbe illeszkedve fejezze ki a követelményeket: a közlekedési zajra zajhatárértéket ad meg (l. a 6. fejezetet). A zajhatárérték értelmezése nem egyezik meg szorosan a közlekedési zajterhelés szabványos mértékével, és nem is illeszkedik a méretezés le-

hetséges elvéhez. Ezért a követelmény megállapítása némi bizonytalanságot tartalmazhat. Ennek ellenére a hazai szabályozás szintjén is megoldható a feladat, de biztonsági tartalékot kell hagyni az összehangolatlanságok áthidalására, ill. az értelmezéseket szorosan össze kell hangolni.

9.2.2. A homlokzati szerkezet szükséges hanggátlásának kiszámítása [III.5] alapján

A homlokzati szerkezet szükséges helyszíni súlyozott léghanggátlási száma kiszámításának fizikai alapja a helyszíni léghanggátlási szám meghatározásának 6.12. alfejezetben ismertetett módszere. A szigetelési igény – követelmény – méretezési összefüggése e módszeren alapul. Célja a zaj ellen védendő helyiség homlokzati szerkezetei eredő helyszíni súlyozott léghanggátlási számának, R'_{wh} -nak mint követelménynek a megadása. A homlokzatot terhelő közlekedési zaj egyenértékű A hangnyomásszintje, L_{1A} , a mérési helytől is függ, ezt az M korrekciós tényező veszi figyelembe, a helyiségben megengedhető egyenértékű A hangnyomásszint átlagos értéke, L_{2A} , a homlokzat eredő felülete S_h és a helyiség egyenértékű hangelnyelési felülete, A -nak a függvényében. A méretezési összefüggésben három korrekciós tényező szerepel. K a homlokzati szerkezetek hanggátlása frekvenciamenete és a közlekedési zaj frekvenciamenete közötti eltérések miatt jelenik meg, W a beesési szög miatti korrekció, általános esetben értéke 0. Az M korrekciós tényező a külső mikrofonhelyzet hatását tükrözi: ha a külső mikrofon közvetlenül a homlokzat felületén van, akkor M értéke -3 dB, míg ha a külső mikrofon oly módon mér, hogy a homlokzat hangvisszaverő hatása nem érvényesül, akkor M értéke $+3$ dB (l. a 2.14. ábrát). A méretezési módszerek nem térnek ki olyan esetre, amely a homlokzatot terhelő közlekedési zaj nagyságát szabványos módszer szerint határozná meg: a [II.1] és [II.6]–[II.9] szabványok szerint a mérési távolság a homlokzat felületétől 2 m, mert itt a hangvisszaverődések miatt a kialakuló hangnyomásszint erősen hely- és frekvenciafüggő (l. ismét a 2.14. ábrát).

$$R'_{wh} = L_{1Asz} - L_{2A} + 10 \cdot \lg \left(\frac{S_h}{A} \right) + K + W + M. \quad (9.1)$$

A K korrekciós tényező személyvasúti forgalomhoz 0 dB, általános vasúti forgalomhoz 3 dB, városi közlekedési zajhoz 6 dB, városon kívüli közúti közlekedési zajhoz pedig 3 dB.

A méretezett homlokzat laboratóriumi eredő súlyozott léghanggátlási száma 2 dB-lel nagyobb lehet, mint a (9.1) összefüggéssel meghatározott helyszíni követelmény.

9.2.3. A hazai határértékrendszerhez illeszkedő, a zaj ellen védendő helyiség homlokzatára vonatkozó szigetelési igény meghatározásának fizikai alapjai

Az [I.10] szabvány úgy ad meg a homlokzatok helyszíni súlyozott léghanggátlási számára követelményt – szigetelési igényt –, hogy nem mérlegeli a homlokzat felületének és a helyiség térfogatának arányát, már csak ezért sem célszerű alkalmazni.

Az újként e fejezetben ismertetendő méretezés fizikai alapja szintén a helyszíni léghanggátlási szám fogalmának meghatározásában található (l. a 6. fejezet 12. pontját). Az A szintek és súlyozott léghanggátlási szám közötti kapcsolatban 60°-os beesési szöget kell feltételezni, más méretezési módszerekkel egyezően. Új elem a színeképillesztési tényező bevezetése és hasznosítása. A módszer részletesebb kifejtése a [9.3] anyagban található.

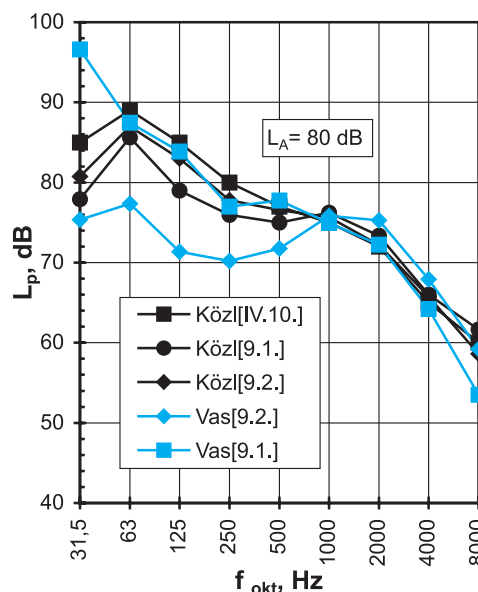
A külső zaj terhelőhatását és a helyiségben kialakuló átlagos hangnyomásszintet is egyenértékű A hangnyomásszintben (L_{1A} , L_{2A}), a határolószervezet eredő hangszigetelését pedig súlyozott léghanggátlási számban (R'_{wh}) fejezik ki, a mikrofonhelyzet miatti korrekciós tényező M , S_h a homlokzat teljes felülete, A pedig a zaj ellen védendő helyiség egyenértékű hangelnyelési felülete. A védendő helyiség homlokzatának eredő színeképillesztési tényezője C_{tr} , ill. C az 5.14. alfejezetnek megfelelően:

$$R'_{wh} + C_{tr} \geq L_{1A} - L_{2A} + 10 \cdot \lg\left(\frac{S_h}{A}\right) + 6 + M; \quad (9.2a)$$

$$R'_{wh} + C \geq L_{1A} - L_{2A} + 10 \cdot \lg\left(\frac{S_h}{A}\right) + 6 + M. \quad (9.2b)$$

Mindkét zajadat (L_{1A} , L_{2A}) vagy a nappali 16 órás, vagy az éjszakai 8 órás egyenértékű A hangnyomásszint, azonos időben és azonos forgalmi szituációban. Célszerű a forgalmi szituációt a mértékadó forgalommal azonosnak tekinteni.

A színeképillesztési tényező alkalmazásának indoklását a 9.2. ábra, valamint a 9.3. ábra mutatja. A 9.2. ábra többféle, eltérő időpontban és mérési helyen meghatározott közlekedési zaj spektrumát mutatja úgy, hogy mindegyikük A hangnyomásszintje 80 dB. Látható, hogy a jellemző eltérés a mély hangok tartományában tapasztalható.



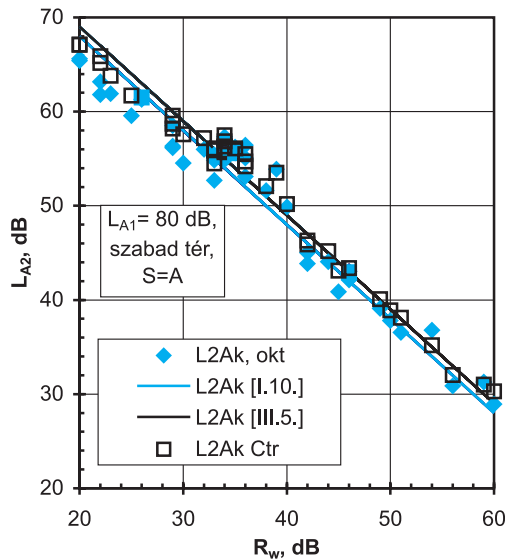
9.2. ábra. Közlekedési zajspektrum példák
Közl közúti közlekedési zaj a hivatkozás szerint; vas vasúti közlekedés zaj a hivatkozás szerint

A 9.3a–c ábra a háromféle közúti közlekedési zaj példáján mutatja be a (9.2a) méretezési összefüggést. A grafikon meghatározása során a terhelő zaj, L_{1A} , közúti közlekedéstől származik, értéke 80 dB, nem tartalmazza a határolószervezetek hangvisszaverő hatását – szabadterei hangterjedés –, és $S_h = A$. A grafikon adatai valóságos szerkezetek – 42 darab különböző ablak, erkélyajtó és falazat – vizsgálati eredményeiből származnak, tehát a hanggátlások mért oktávssávok adatok és mérésekből meghatározott súlyozott léghanggátlási értékek. A grafikon egyes jelöléseinek jelentése:

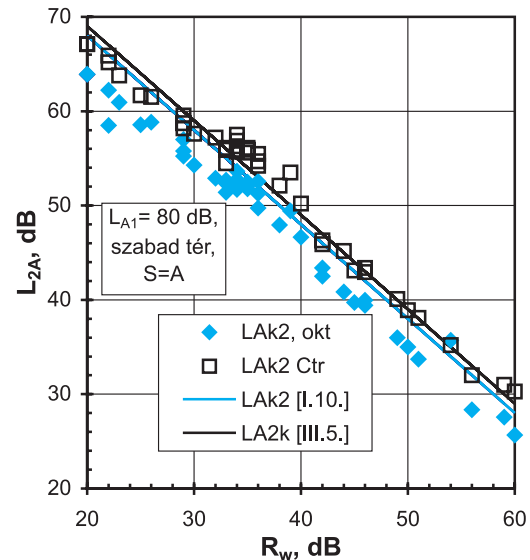
- R_w a 42 darab külső határolószervezet súlyozott léghanggátlási száma;
- $L_{2Ak,okt}$ a közlekedési zaj oktávssávonként számított értéke;
- $L_{2A[I.10]}$ az [I.10] hivatkozás szerint a zaj ellen védendő helyiségben számított, egyenértékű A hangnyomásszint;
- $L_{2A[III.5]}$ a [III.5] hivatkozás szerint a zaj ellen védendő helyiségben számított, egyenértékű A hangnyomásszint; a számítás a (9.1) összefüggés átrendezésével végezhető, $M = 3$ a kültéri mikrofonhelyzet miatt, $K = 6$ a forgalmi szituáció miatt (városi környezetben közlekedési zaj elleni védelem);
- L_{2ACtr} a jelen fejezet alapján a zaj ellen védendő helyiségben számított egyenértékű A hangnyomásszint; a számítás a (9.2a) összefüggés átrendezésével végezhető, $M = 3$ a kültéri mikrofonhelyzet miatt, $R_w + C_{tr}$ értéke a próbaszámításokban figyelembe vett tényleges szerkezetek eredményéből származik.

A méretezési összefüggés akkor ad jó eredményt, ha az alkalmazásával számított L_{2A} hangnyomásszint nagyobb, mint az oktávssávok számítás eredménye.

Az eredmények értékelése azt a következtetést támasztja alá, hogy a színeképillesztési tényező alkalmazása indokolt, javítja a méretezés, tehát a külső határolószervezetek eredő szükséges hanggátlása meghatározásának biztonságát. Természetesen a biztonság a három spektrum alkalmazása során eltérő mértékű.



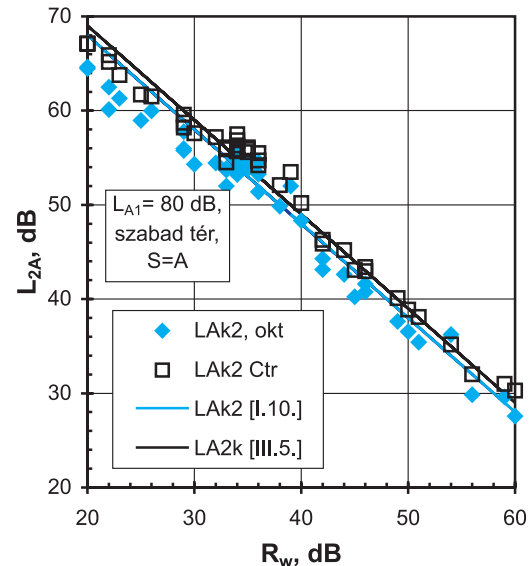
9.3a ábra. Közúti közlekedési zaj elleni méretezési módszerek összehasonlítása a [IV.10]-ben található zajspektrum alkalmazásával



9.3b ábra. Közúti közlekedési zaj elleni méretezési módszerek összehasonlítása a [9.2]-ben található zajspektrum alkalmazásával

$L_{2Ak,okt}$ oktávsváru számításból meghatározott A hangnyomásszint a zaj ellen védendő helyiségben; L_{2Ak} [I.10], L_{2Ak} [III.5] a hivatkozás szerint meghatározott A hangnyomásszint a zaj ellen védendő helyiségben; $L_{2Ak Ctr}$ A hangnyomásszint a zaj ellen védendő helyiségben a szinképpillesztési tényező felhasználásával; $L_{A1} = 80$ dB a homlokzatot terhelő zaj nagysága; S a homlokzat felülete; A a zaj ellen védendő helyiség egyenértékű hangelnyelési felülete

9.3c ábra. Közúti közlekedési zaj elleni méretezési módszerek összehasonlítása a [9.1]-ben található zajspektrum alkalmazásával



9.2.4. A szigetelési igény realizálásának módszere

A zaj ellen védendő helyiség homlokzati szerkezeteire vonatkozó szigetelési igény létrehozásának módszere – azaz annak módszere, hogyan kell az eredő hanggátlást az összetevők, a homlokzat szerkezeti elemei célszerű kiválasztásával elérni – az eredő hanggátlás meghatározásán alapul (l. a 4.12. alfejezetet).

Az [I.10] magyar szabvány e feladatra semmiféle információt nem ad.

A [III.5] VDI irányelv kerülőutak nélküli laboratóriumban végzett mérésekre értelmezve azt állapította meg, hogy a helyszíni homlokzati eredő és azonos szerkezet kerülőutak nélküli, laboratóriumban

mért eredő súlyozott léghanggátlási száma között 2 dB eltérés van, ez tehát áttérést jelent a laboratóriumi eredményekkel végezhető számításokra.

A 2 dB eltérés mint általánosan használható különbség a helyszíni szituáció és a termékjellemzőkkel számítható eredő súlyozott léghanggátlási szám a [III.6] EN szabványban is megjelenik.

Ezért a homlokzati szerkezetek hangszigetelési méretezésének második lépése képletben:

$$R_{wh} = R'_{wh} + 2, \quad (9.3)$$

ahol R'_{wh} a homlokzati szerkezet helyszíni körülmények között szükséges súlyozott léghanggátlási

száma; R_{wh} ugyanannak a homlokzati szerkezetnek a kerülőutak nélküli laboratóriumban mérhető, vagy az egyes homlokzati elemekből számítható súlyozott léghanggátlási száma.

Az eredő számítás egyes építési termékek adatmegadása miatt (l. a 4.12. alfejezetet), valamint a színeképillesztési tényező figyelembevétele érdekében a (9.4) képlet szerint kell elvégezni, R_{wi} és C_{tri} jelenti az i -edik szerkezeti összetevő súlyozott léghanggátlási számát és színeképillesztési tényezőjét, S_i pedig a tényleges felületét. Amennyiben a terhelő zaj nem közüti közlekedéstől származik, ezért nem C_{tr} -t, hanem C -t kell alkalmazni, akkor azt következetesen minden a terméknel el kell végezni. Így az eredményben is C értéke jelenik meg:

$$(R_w + C_{tr})_{eredő} = 10 \cdot \lg \left(\frac{\sum S_i}{\sum S_i \cdot 10^{-0,1 \cdot (R_{wi} + C_{tri})}} \right) \quad (9.4)$$

Valóságos szerkezetek adataival végzett próbaszámítások azt az eredményt adták, hogy a szerkezetek súlyozott léghanggátlási számának és színeképillesztési tényezőjének eredője a (9.4) összefüggés szerint számítható, 1 dB-nél kisebb hibával. Az összehasonlítás frekvenciafüggő számítással történt.

Ha a homlokzati szerkezetek között olyan elem szerepel, amelynek hangszigetelését szabványos hangnyomásszintben vagy $1,9 \text{ m}^2$ névleges felületű szerkezet léghanggátlási számában adták meg – szellőzőelemek, sorolóelemek stb. –, akkor azok súlyozott léghanggátlási számát át kell számítani a tényleges elfoglalt homlokzat felületre. C vagy C_{tr} értéke azonos értelemben fog változni.

A méretezés harmadik lépése tehát a (9.4) összefüggés alkalmazásával a szerkezetválasztás. A gyakorlatban a falazat kiválasztása több kötöttséget tartalmaz, mint az ablakok, erkélyajtók, szellőzőelemek kiválasztása. Ezért célszerű a falazatot adottnak tekinteni, és azt meghatározni, hogy milyen ablak, erkélyajtó, szellőzőelem szükséges a megoldandó feladatban. Ha a számítás irreális eredményre vezetne, akkor a 9.1. ábrán látható folyamatábra 6. vagy 7. lépését követő ellenőrzés során a visszacsatoló ág kerülhet sorra. Ilyen esetre többi között városi főútvonalak mentén tervezendő épületek homlokzati szerkezeteinek kiválasztása során kerülhet sor.

9.2.5. Illeszkedés a hazai zajhatárértékekhez

A homlokzati szerkezetek hangszigetelésének kiválasztása a külső zaj elleni védelem céljából – bár milyen módszert is választ a tervező – azért proble-

matikus feladat, mert a tervezési cél nem kellően körülhatárolt zajhatárérték teljesítése. A következőket kell szem előtt tartani:

- a méretezési módszerek a helyiségekben a diffúz téri közelítést alkalmazzák, a zajmérés alapján való esetleges ellenőrzés azonban a legkedvezőtlenebb mérési ponton történik; nem ismert, hogy ennek mik a következményei;
- a forgalmi szituáció a helyiségek a helyiségekre érvényes zajhatárértékek megállapítása során nem meghatározott; nem ismert, hogy ennek mik a következményei.

A probléma a tervező- és kivitelezőszervek szempontjából hangsúlyos, a legegyszerűbb megoldást többi között az [I.11]-ben található határérték-megadás követése jelenti: a közlekedési zaj elleni védelmet *nem* zajhatárértékekben, hanem *hangszigetelési követelményekben* fejezik ki a szabályozási dokumentumok. Sajnos a hazai szabályozási rendben (bár történt már ilyen irányú kezdeményezés és az eredmény megalapozott) még nem indult el a szükséges áttérés.

9.3. Helyiségek közötti léghangszigetelés méretezése a hazai szerkezetválaszték figyelembevételével a [III.2] továbbfejlesztése alapján

9.3.1. A méretezési módszer alkalmazási területei

A módszer nehéz szerkezetekből – falazott, öntött monolit, előre gyártott stb. – készült épületek egymás melletti, vagy egymás feletti, szomszédos helyiségei közötti helyszíni súlyozott léghanggátlási szám meghatározásának módját adja meg. A szomszédság iránya, azaz a hangterjedés iránya nem jelent elvi különbséget. A példák azért vízszintesen szomszédos helyiségeket mutatnak, mert itt többféle változat előfordulhat. A helyiségekben burkolat jellegű szerkezetek, álmennyezet, szárazvakolat stb. lehetnek.

A méretezési módszer az egyszerűsített közelítést tartalmazza, tehát nem a frekvencia függvényében számol, hanem egyadatos akusztikai mennyiségekkel dolgozik. Az egyadatos mennyiségek a következők:

- a határolószerkezetek súlyozott léghanggátlási száma, R_{wi} termékjellemző, katalógusadat;
- a szerkezeti elemek felülete S_i ;
- egyes elemek közötti csatolási élhossz l_{ij} ;

- a szerkezeti csomópontok alakja és elemeinek fajlagos tömege; e két adatból kell az elemek közötti rezgésebbességszint-különbségek frekvenciaátlagát, D_{vij} -t meghatározni;
- a burkolatok – álmennyezet, álpadló, falburkolat, úszópadló – léghanggátlást javító hatása, ΔR_{wi} termékjellemző, katalógusadat, esetleg méretezhető a 4.8. alfejezet szerint;
- rések, nyílások, légcsatornák súlyozott szabványos hangnyomásszint különbsége, D_{mw} termékjellemző, katalógusadat;
- a szerkezetek sugárzási foka az átlagolás miatt a közelítésben 1;
- a határolószerkezetek laboratóriumban mért átlagos η_l veszteségi tényezője katalógusadat;
- a határolószerkezetek helyszíni beépítésben kialakuló η_h veszteségi tényezője becslés jellegű, átlagos, a határolószerkezetektől és építési módoktól függő helyszíni adatok alkalmazhatók.

Az egyszerűsített közelítés természetesen csökkenti a méretezés pontosságát, viszont áttekinthetőbbé teszi az eljárást.

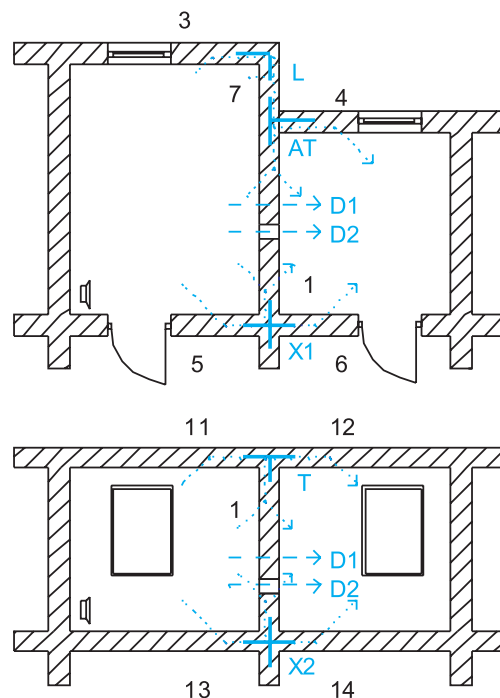
A további kiindulási adatok általában az engedélyezéstervezési szintű dokumentációból már leolvashatók, a dokumentáció rajzi része és a műszaki leírás megadja a szükséges anyagféléseket, méreteket.

A jelen módszerről, ill. egyes elemeiről több publikáció jelent meg, pl. [9.4], [9.5], [9.6].

9.3.2. A méretezési módszer elvi alapjai

1. Hangátviteli irányok

A helyiségek közötti léghanggátlás méretezésének elvi alapja a különböző szerkezeteken keresztül lejátszódó hangátvitel során, tehát a különböző hangterjedési utakon a zaj ellen védendő helyiségbe átvitt akusztikai teljesítmény összegzése (l. a 4.12. alfejezetet). A hangterjedés mechanizmusa testhang jellegű vagy léghang jellegű lehet. A hangterjedési utakat a 9.4. ábra szemlélteti egy lehetséges, egyhjú szerkezetekből álló alaprajzon és metszeten. A határolószerkezeteket számok jelölik. A példában 1 a két helyiséget elválasztó fal, a 3, 4, 7 homlokzatok, az 5 és 6 belső fal, a földem pedig a 11–14 szerkezet. Bármelyik elemet takarhatja a helyiségek felől olyan akusztikai burkolat – falburkolat, álmennyezet, padlóburkolat –, amely a szerkezet hangszigetelését megváltoztatja. Természetesen egyszerűbb alaprajz is megoldható, amelyben pl. a homlokzat sík, tagozódást nem tartalmaz. Így ott szimmetrikus T csomópont alakul ki. A metszet a legfelső szinten kialakuló helyzetet mutatja, ahol a



9.4. ábra. Alaprajz és metszet helyszíni léghanggátlás meghatározásához, ha a két helyiséget egyhjú falazat választja el egymástól

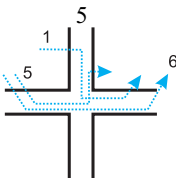
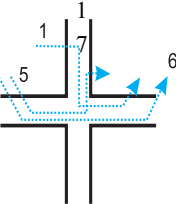
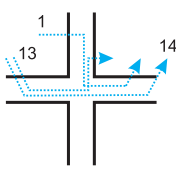
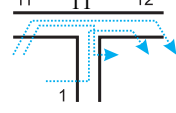
D1, D2: közvetlen hangterjedési utak; L, AT, X1, X2, T: szerkezeti csomópontok; 1...14 határoló szerkezetek sorszáma

felső csomópont szintén T alakú. Általános emeleti helyiségkapcsolatnál a függőleges metszeten látható mindkét csomópont X alakú.

A két helyiséget elválasztó szerkezeten keresztül – a példa kedvéért – két hangterjedés alakul ki. A D1 a tömör falon keresztül, a D2 pedig egy részen, nyíláson keresztül. Ezek a közvetlen hangterjedési utak.

A kerülő hangátviteli utak az 1 falat határoló szerkezeti csomóvonalakon – az alaprajzon és a metszeten csomópontokon – vezetnek keresztül. A belső falnál látható X1 csomóponton keresztül pl. három hangterjedési út azonosítható. A hangátviteli utakat annak a két szerkezetnek a számával jelölve, amelyből indul, és amely a hangot lesugározza az X1 csomóponton keresztül az 5–1, 5–6 és 1–6 hangterjedési utak vezetnek keresztül. Az 5–1 hangterjedési út részletesebben azt jelenti, hogy a hangforrás által a helyiségbe lesugárzott akusztikai teljesítmény egy része az 5 belső falra esik, azt rezgésbe hozza. A rezgés a szerkezeti csomóponton keresztül átkerül az 1 falba is. Az 1 fal rezgése következtében hangot sugároz a zaj ellen védendő helyiségben. A 9.1. táblázat csomópontként és szerkezetenként foglalja össze a hangterjedési utakat.

9.1. táblázat. Hangátviteli irányok a 9.4. ábra mintapéldáján

Hangátviteli irány	Csomópont azonosítása	Adóhelyiségben levő szerkezet	Vevőhelyiségben levő szerkezet
Közvetlen, <i>D1</i>		1	1
Közvetlen, <i>D2</i>		1-en levő nyílás	1-en levő nyílás
<i>X1</i> csomóponton keresztül		1	
		5	6
		1	6
<i>L</i> és <i>AT</i> csomóponton keresztül, egyszeres és kétszeres átmenetekkel		4	
		4	
		7	1
		3 (-7)	4
		3 (-7)	1
<i>X2</i> csomóponton keresztül		13	1
		13	14
		1	14
<i>T</i> csomóponton keresztül		1	
		11	12
		1	12

A csomópontok betűjele a csomópont formájára utal:

- **X** szimmetrikus, kereszt alakú csomópont (a szemközti elemek anyaga és vastagsága megegyezik); leggyakrabban általános helyen fordul elő (födém–fal csatlakozás, fal–fal csatlakozás);
- **T** szimmetrikus, T alakú csomópont (a T tetejének megfelelő két elem anyaga és vastagsága megegyezik); jellemzően homlokzatoknál fordul elő mind az alaprajzon, mind a metszeten;
- **L** L alakú csomópont;
- **AT** aszimmetrikus, T alakú csomópont, a T egyik oldali tetejének és szárának egyezik meg a vastagsága és anyaga, a T alak tetejének másik szára eltérő.

A 9.5. ábra olyan mintapéldát mutat, ahol a két egymás melletti helyiséget szokványos kéthéjú falszerkezet választja el egymástól. A homlokzatnál levő 3 és 4 elemek és a kettős fal 1 és 2 eleme Π alakú csomópontot hoz létre. A belső falaknál, ill. a válaszfal–födém kapcsolatnál kettős Π alakú csomópont keletkezik. a 9.2. táblázat e példához tartozó hangterjedési irányokat ismerteti.

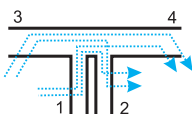
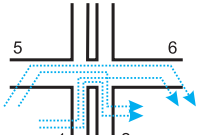
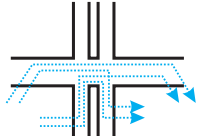
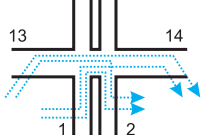
A kettős fal 1–2 terjedési iránya azért kapott * jelet, mert egy falszerkezetnél négy ilyen terjedési utat kell figyelembe venni: mind a négy falperemnél egyet-egyét (l. a 4.11. alfejezetet). A *D0* irány jelentősége csupán elvi jellegű, hiszen a hangterjedési mechanizmusok fizikai tartalma miatt a légrésen keresztül vezető átviteli út nagy hanggátlása miatt elhanyagolható a többihez képest. Ezért a 9.2. táblázatban e terjedési út nem is szerepel.

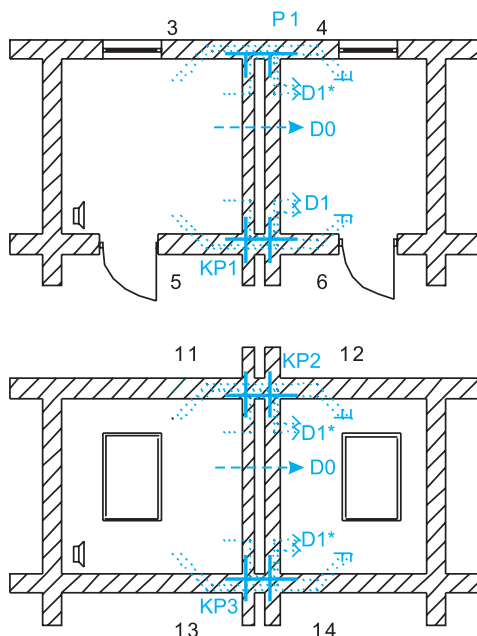
A csomópontok a példában a következők:

- **PI** Π alakú, szimmetrikus csomópont, a Π tetejének két eleme megegyezik egymással, a Π szárának két eleme lehet különböző is;
- **KP** kettős Π alakú, szimmetrikus csomópont, a Π tetejének két eleme megegyezik egymással, a két szár azonos oldalon levő elemeinek együttes fajlagos tömege is egyenlő.

A 9.6. ábrán látható példa szintén kéthéjú falszerkezetet mutat. Az előző ábrán látható példához képest az az eltérés, hogy a kettős fal peremei mentén *jól méretezett*, rugalmas rétegek találhatók, amelyek leválasztják a kettős falat az átmenő szerkezetektől. Ezért azoknak az átviteli utaknak, amelyek

9.2. táblázat. Hangátviteli irányok a 9.5. ábra mintapéldájához

Hangátviteli irány	Csomópont azonosítása	Adóhelyiségben levő szerkezet	Vevőhelyiségben levő szerkezet
PI csomóponton keresztül		1	4
		3	2
		3	4
		1	2*
Kettős PI (KP1) csomóponton keresztül		1	6
		5	2
		5	6
		1	2*
Kettős PI (KP2) csomóponton keresztül		1	12
		11	2
		11	12
		1	2*
Kettős PI (KP3) csomóponton keresztül		1	14
		13	2
		13	14
		1	2*



9.5. ábra. Alaprajz és metszet helyszíni léghangtálas meghatározásához, ha a két helyiséget szokványos kéthéjű falazat választja el egymástól

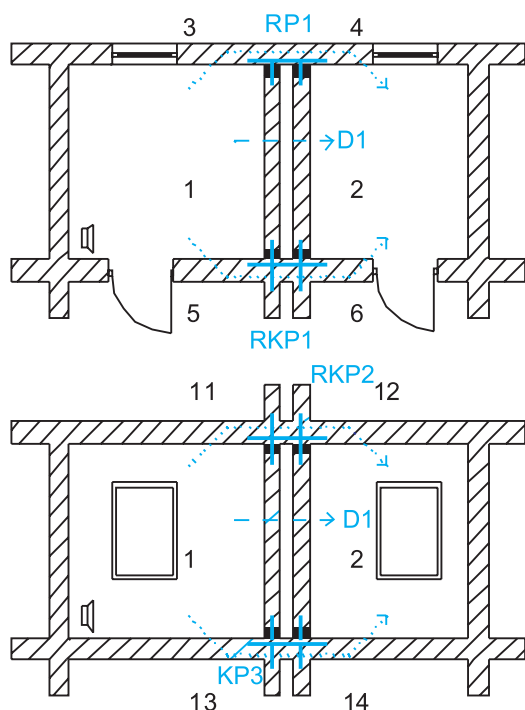
D0 közvetlen hangterjedési út; D1*...D4* peremkapcsolatokon keresztül vezető hangterjedési utak; P1, KP1, KP2, KP3 szerkezeti csomópontok; 1...14 határoló szerkezetek sorszáma;

mind a kéthéjű falon, mind az átmenő falon, vagy födémén átvezetnek, olyan nagy lesz a hanggátlása, hogy elhanyagolhatók lesznek. A D1 közvetlen terjedési út tartalmazza a légrésen keresztül vezető, ideális kéthéjű szerkezet, valamint a rugalmasan elválasztott peremkapcsolatok együttes hatását, ami megegyezik a kerülőutak nélküli laboratóriumban meghatározott átvitelrel. A helyszíni beépítésben csak az átmenő szerkezeteken keresztül vezető terjedési irányok hatásosak. Az elméleti ismeretek szintén a 4.11. alfejezetben találhatók,

Az egymás felett elhelyezkedő helyiségek közötti hanggátlás vizsgálata ugyanolyan mechanizmusokat és ugyanolyan átviteli irányokat eredményez, mint az előbbi példák, ezért nem kell külön részletezni őket.

II. A hangátviteli utak hanggátlása

A 9.4. ábra példájában D1 hangátviteli út hangszigetelését a két helyiséget elválasztó szerkezet hanggátlása, R_{wI} , e szerkezet laboratóriumban mért, ill. helyszíni körülmények között kialakuló átlagos veszteségi tényezője, η_i és η_h , valamint az adó- és



9.6. ábra. Alaprajz és metszet helyszíni léghanggátlás meghatározásához, ha a két helyiséget rugalmas peremkapcsolatokkal kivitelezett szokványos kéthéjű falazat választja el egymástól

RP1, RKP1...RKP3: szerkezeti csomópontok; 1....14: határoló szerkezetek sorszáma

vevőoldalról felszerelt, burkolat jellegű szerkezetek hanggátlásjavítása, ΔR_{w1A} és ΔR_{w1V} határozza meg, a következő összefüggés szerint:

$$R_{wD1} = R_{w1} + 10 \cdot \lg \frac{\eta_h}{\eta_l} + \Delta R_{w1A} + \Delta R_{w1V} \quad (9.5)$$

A laboratóriumi veszteségi tényező termékjellemző, a helyszíni normatív adat lehet. Ha az adatok nem állnak rendelkezésre, akkor hatásuk a biztonság javára elhanyagolható. A D2 hangátviteli út hanggátlása:

$$R_{wD2} = D_{nw} + 10 \cdot \lg \left(\frac{S_n}{10} \right) \quad (9.6)$$

ahol S_n a nyílás tényleges felülete.

A 9.5. ábra példájában a kéthéjű fal merev kapcsolatokon keresztül csatlakozik a födémekhez és a belső, külső falakhoz. Ebben az esetben a kettős fallal elválasztott két helyiség közötti helyszíni léghanggátlás úgy is meghatározható, mintha a kettős fal helyett azonos össztömegű, egyhéjű fal szerepelne. A kettős falnál megállapított D0 és négy darab D1 átviteli irány helyettesíthető a kettős fallal azonos fajlagos tömegű, egyhéjű falnál megál-

9.3. táblázat. Hangátviteli irányok a 9.6. ábrán látható példában

Hangátviteli irány	Csomópont azonosítása	Adóhelyiségben levő szerkezet	Vevőhelyiségben levő szerkezet
Közvetlen, D1		1	1
RPI csomóponton keresztül		3	4
RKPI1 csomóponton keresztül		5	6
RKPI2 csomóponton keresztül		11	12
RKPI3 csomóponton keresztül		13	14

lapított $D1$ átviteli iránnyal, ill. annak hanggátlásával. Így a (9.5) összefüggés értelemszerűen alkalmazható ez esetben is. A burkolatok, rések is azonos módon vehetők figyelembe. Az elméleti ismeretek a 4.11. alfejezetben találhatók.

A jól méretezett, rugalmas peremkapcsolatokkal ellátott kéthéjú szerkezeteknél (l. a 9.6. ábra példáját) a közvetlen út, $D1$ hanggátlása a kerülőutak nélküli laboratóriumi vizsgálat eredménye. Így a (9.5) összefüggés ez esetben is alkalmazható.

A további hangátviteli utak hanggátlásának kiszámítása a testhangterjedés szemléletének alkalmazásán alapul mind az egyhéjú, mint a kéthéjú elválasztószerkezetnél.

Egy hangátviteli út R_{wij} léghanggátlását a (9.7) összefüggés definiálja. A hangátvitel az i indexű adóoldali szerkezettel kezdődik, és a j indexű, a vevőhelyiség felőli szerkezettel végződik. Az adóoldali szerkezetre beeső akusztikai teljesítmény W_{ibe} , a vevőhelyiségben levő szerkezet által lesugárzott akusztikai teljesítmény W_{jsug} . A definícióból azonos átalakítással értelmezhető összefüggésrészek vezethetők le:

$$R_{wij} = 10 \cdot \lg \left(\frac{W_{ibe}}{W_{jsug}} \right) = 10 \cdot \lg \left(\frac{W_{ibe}}{W_{isug}} \cdot \frac{W_{isug}}{W_{jsug}} \right). \quad (9.7)$$

Az első hánnyados az i jelű szerkezet helyszíni léghanggátlási száma, amit a helyszíni veszteségi tényező, η_h és a laboratóriumi veszteségi tényező, η_l arányával lehet termékjellemzővé, tehát kerülőutak nélküli laboratóriumban mért léghanggátlási számmá viaszszámolni. A hőszigetelési célból kifejlesztett üreges, kerámia alapanyagú homlokzati falazóelemek hangszigetelési sajátosságai azonban arra vezettek, hogy ez az elem a kerülőutak nélküli laboratóriumra vonatkoztatott, fajlagos tömeg alapján számítható súlyozott léghanggátlási szám legyen. A lesugárzott akusztikai teljesítmény a szerkezetek felületétől, (S_i, S_j), a felület átlagos rezgésebességeinek négyzetétől függ, l. a fejezetben a összefüggést és az ehhez tartozó magyarázatot. Az i -edik és j -edik szerkezet átlagos rezgésebesség-négyzeteinek aránya logaritmikus egységben a rezgésebességszint-különbség, D_{vij} .

A vizsgált terjedési irányban a födém csatolási élhossza a fal két oldaláról nézve eltérő. Szemléletesen az állapítható meg, hogy a nagyobb alapterületű födémről a kisebb alapterületű födém felé a csomóvonalon átjutó akusztikai teljesítmény két-felé oszlik, egyik rész a zaj ellen védendő helyiség födémébe jut, a másik rész az erkélylemezbe. Más példák az erkélylemez helyett egy másik helyiség födémje helyezkedhet el. Ez a jelenség a hangszigetelésben nyereség: a csatolási élhosszak arányának tízszeres logaritmusával növekszik ennek a hangterjedési útnak a hanggátlása. Fordított irányban a jelenség nem játszódik le, hiszen a kisebb födémű helyiség felől érkező akusztikai teljesítmény a csomóvonalon átjutva teljes egészében a nagyobb helyiség födémjébe jut.

Ha a hangátviteli út áthalad olyan szerkezeten, amely az alapszerkezet léghanggátlását megnöveli, akkor ez a hatás a kerülőutas léghanggátlásban is megjelenik. Mind az i indexű, mind a j indexű szerkezetet takaró burkolat hatását ($\Delta R_{wi}, \Delta R_{wj}$) figyelembe kell venni.

Mindezeket a hatásokat összefoglalva az i - j hangátviteli út kerülőutas léghanggátlási száma a következő lesz:

$$R_{wij} = R_{wilt} + 10 \cdot \lg \left(\frac{\eta_h}{\eta_l} \right) + 10 \cdot \lg \left(\frac{S_i}{S_j} \right) + D_{vij} + K_{ij} + \Delta R_{wi} + \Delta R_{wj}; \quad (9.8)$$

$$K_{ij} = ha(l_i > l_j; 10 \cdot \lg \left(\frac{l_i}{l_j} \right); 0). \quad (9.9)$$

A (9.8)–(9.9) képletekben R_{wilt} az i indexű szerkezet – adóhelyiség felőli – laboratóriumban mért súlyozott léghanggátlási száma, ha a két helyiséget elválasztó falról vagy födémről van szó, egyébként pedig a fajlagos tömegből meghatározott súlyozott léghanggátlási szám [9.7]; η_h és η_l a szerkezet veszteségi tényezője a helyszíni körülmények között, ill. laboratóriumi beépítésben; a két szerkezet felülete S_i és S_j ; a csatolási élhossz az elválasztó szerkezet két oldalán l_i és l_j ; a rezgésebességszint-különbség D_{vij} ; az i -edik és j -edik szerkezetet takaró burkolat hanggátlás-javító hatása ΔR_{wi} és ΔR_{wj} . Adatok hiányában a veszteségi tényezők hatása elhanyagolható, ez a számított eredményt csökkenti, tehát a biztonság javára tolja. Ha olyan hangterjedési utak kerülőutas léghanggátlását kell meghatározni, amelyek két csomóponti átmenetet tartalmaznak, akkor a két csomópont rezgésszintkülönbségét a közelítésben össze kell adni. A 9.4. ábra mintapéldájában ilyen többek között a 3–4 átmenet, amelynek megoldása:

$$D_{v34} = D_{v37} + D_{v74} \quad (9.10)$$

A jól méretezett, rugalmas peremkapcsolatokkal elválasztott kéthéjú szerkezeteknél a számításba vendő hangátviteli irányok hanggátlása szintén a (9.8) összefüggés alapján határozható meg, de a rugalmas elválasztás miatt:

$$D_{v3,4} = D_{v5,6} = D_{v11,12} = D_{v13,14} = 0 \quad (9.11)$$

III. Rezgésebességszint-különbség meghatározása merev peremkapcsolatok esetén

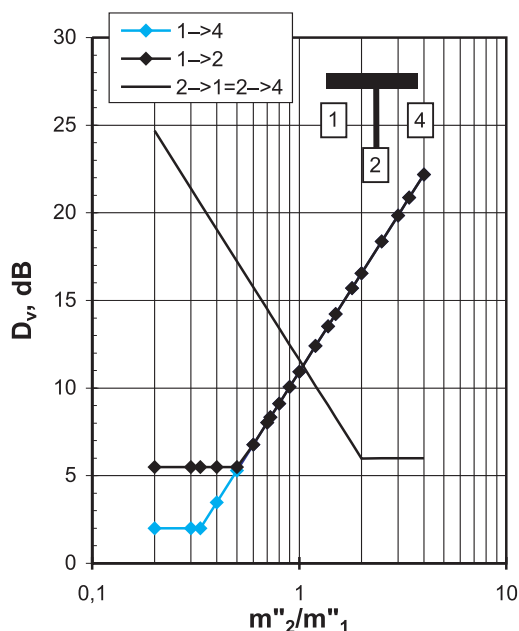
A szerkezeti csomópontok elemei közötti rezgésebességszint-különbségeket merev szerkezeti kapcsolatok esetén az elemek fajlagos tömegeinek aránya segítségével kell kiszámítani. A 9.7. ábrán látható példában szereplő számozással a rezgésebességszint-különbségeket a 9.4. táblázat foglalja össze. A csomópont elemeinek fajlagos tömegét m''_1, m''_3 stb. jelöli. Az egyhéjú, szimmetrikus cso-

móponi elrendezések adatai [IV.2]-ből származnak, a kéthéjú szerkezetek – Π és kettős Π – rezgéssebességszint-különbsége [9.10]-ben található. Az aszimmetrikus T csomópont adatai [9.11]-ben jelentek meg, a rugalmas peremkapcsolatok rezgéssebességszint-különbségének meghatározása [9.10]-ben szerepel.

Az aszimmetrikus T csomópont jelen példában nem szereplő további átviteli irányaihoz tartozó rezgéssebességszint-különbségeket a 9.5. táblázat foglalja össze. Ezek az átviteli irányok akkor figyelhetők meg, ha az adó- és vevőhelyiséget felcseréljük.

A 9.6. táblázatban a 9.6. ábrán látható példa – szokványos kettős fal – szerkezeti csomópontjai rezgéssebességszint-különbségei található. A számítás felhasználja, hogy a szokványos kettős falak egyhéjú falként működnek.

Az egyszerűbb alkalmazás elősegítésére a 9.7–9.12. ábra grafikonjai a különböző geometriájú szerkezeti csomópontok rezgéssebességszint-különbségét mutatják általános jelölésekkel.



9.7. ábra. Szimmetrikus elrendezésű, T alakú csomópont rezgéssebességszint-különbségei

A szimmetrikus elrendezés azt jelenti, hogy $m''_1 = m''_4$ T tetejéhez tartozó épületszerkezetek fajlagos tömege megegyezik

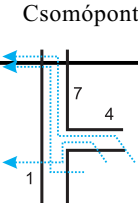
9.4. táblázat. Rezgéssebességszint-különbségek a 9.4. ábra példájához

Csomópont	Terjedési irány	Elemek fajlagos tömegének aránya, Q	D_{vij} , dB
	$5 \Rightarrow 6$	$Q = m''_1 / m''_5$	$D_{v5,6} = Ha(Q > 0,33; 18,71 \cdot \lg(Q) + 11,93; 3)$
	$5 \Rightarrow 1$	$Q = m''_1 / m''_5$	$D_{v5,1} = Ha(Q > 0,73; 18,71 \cdot \lg(Q) + 11,93; 9,5)$
	$1 \Rightarrow 6$	$Q = m''_5 / m''_1$	$D_{v1,6} = Ha(Q > 0,73; 18,71 \cdot \lg(Q) + 11,93; 9,5)$
	$3 \Rightarrow 7$	$Q = m''_7 / m''_3$	$D_{v7,3} = Ha(Q > 0,63; 18,71 \cdot \lg(Q) + 6; 2)$
	$7 \Rightarrow 4$	$Q = m''_4 / m''_1$	$D_{v7,4} = 19,28 \cdot \lg(Q) + 9,49 \quad (*)$
	$7 \Rightarrow 1$	$Q = m''_4 / m''_1$	$D_{v7,1} = 11,6 \cdot \lg(Q) + 11,93 \quad (*)$
	$1 \Rightarrow 4$	$Q = m''_4 / m''_1$	$D_{v1,4} = 25,47 \cdot \lg(Q) + 11,5 \quad (*)$
	$13 \Rightarrow 1$	$Q = m''_1 / m''_{13}$	$D_{v13,1} = Ha(Q > 0,73; 18,71 \cdot \lg(Q) + 11,93; 9,5)$
	$13 \Rightarrow 14$	$Q = m''_1 / m''_{13}$	$D_{v13,14} = Ha(Q > 0,33; 18,71 \cdot \lg(Q) + 11,93; 3)$
	$1 \Rightarrow 14$	$Q = m''_{13} / m''_1$	$D_{v1,14} = Ha(Q > 0,73; 18,71 \cdot \lg(Q) + 11,93; 9,5)$
	$11 \Rightarrow 1$	$Q = m''_1 / m''_{11}$	$D_{v11,1} = Ha(Q > 0,5; 18,71 \cdot \lg(Q) + 10,93; 5,5)$
	$11 \Rightarrow 12$	$Q = m''_1 / m''_{11}$	$D_{v11,12} = Ha(Q > 0,33; 18,71 \cdot \lg(Q) + 10,93; 2)$
	$1 \Rightarrow 12$	$Q = m''_1 / m''_{11}$	$D_{v1,12} = Ha(Q > 2; 6; 18,71 \cdot \lg(Q) + 10,93)$

A *-gal jelölt rezgéssebességszint-különbségek összefüggése a $0,5 < Q < 2$ értéktartományban alkalmazhatók.

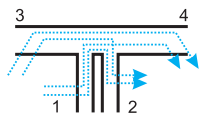
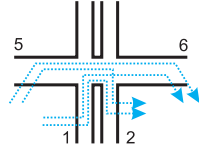
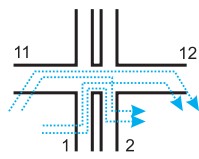
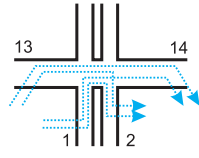
A D_v kifejezés értelmezése a 9.4.–9.6. táblázatokban: $D_v = Ha(Q \text{ feltétel}; \text{feltétel igaz}; \text{feltétel hamis})$; tehát előbb van a feltétel igaz esetén elvégzendő művelet, azután a hamis feltétel esetén elvégzendő művelet; a kifejezés tehát egy feltételes értékadás.

9.5. táblázat. Rezgésebbesszint-különbségek aszimmetrikus T csomóponthoz, ellentétes terjedési irány esetén [9.10], [9.11]

Csomópont	Terjedési irány	Elemek fajlagos tömegének aránya, Q	D_{vij} dB
	$4 \Rightarrow 1$	$Q = m_4'' / m_1''$	$D_{v4,1} = 4,01 \cdot \lg(Q) + 11,5 \quad (*)$
	$4 \Rightarrow 7$	$Q = m_4'' / m_7''$	$D_{v4,7} = 15,67 \cdot \lg(Q) + 9,18 \quad (*)$
	$1 \Rightarrow 7$	$Q = m_4'' / m_1''$	$D_{v1,7} = 14,17 \cdot \lg(Q) + 12,41 \quad (*)$

A *-gal jelölt rezgésebbesszint-különbségek összefüggése a $0,5 < Q < 2$ értéktartományban alkalmazhatók.; a D_v kifejezések értelmezését l. előbb.

9.6. táblázat. Szokványos kettős fal szerkezeti csomópontjai rezgésebbesszint-különbségeinek meghatározása a 9.6. ábra példájához [9.10]

Csomópont	Terjedési irány	Elemek fajlagos tömegének aránya, Q	D_{vij} dB
	$1 \Rightarrow 4$	$Q = m_2'' / m_4''$	$D_{v1,4} = Ha(Q > 2; 6; -18,71 \cdot \lg(Q) + 11,61)$
	$3 \Rightarrow 2$	$Q = m_2'' / m_4''$	$D_{v3,2} = Ha(Q > 0,5; 18,71 \cdot \lg(Q) + 10,93; 5,5)$
	$3 \Rightarrow 4$	$Q = (m_1'' + m_2'') / m_4''$	$D_{v3,4} = Ha(Q > 0,33; 18,71 \cdot \lg(Q) + 10,93; 5,2)$
	$1 \Rightarrow 6$	$Q = m_2'' / m_6''$	$D_{v1,6} = Ha(Q > 1,38; 9,5; -18,71 \cdot \lg(Q) + 11,93)$
	$5 \Rightarrow 2$	$Q = m_2'' / m_6''$	$D_{v5,2} = Ha(Q > (1/1,38); 18,71 \cdot \lg(Q) + 11,93; 9,5)$
	$5 \Rightarrow 6$	$Q = (m_1'' + m_2'') / m_6''$	$D_{v5,6} = Ha(Q > 0,33; 18,71 \cdot \lg(Q) + 11,93; 3)$
	$1 \Rightarrow 12$	$Q = m_2'' / m_{12}''$	$D_{v1,12} = Ha(Q > 1,38; 9,5; -18,71 \cdot \lg(Q) + 11,93)$
	$11 \Rightarrow 2$	$Q = m_2'' / m_{12}''$	$D_{v11,2} = Ha(Q > (1/1,38); 18,71 \cdot \lg(Q) + 11,93; 9,5)$
	$11 \Rightarrow 12$	$Q = (m_1'' + m_2'') / m_{12}''$	$D_{v11,12} = Ha(Q > 0,33; 18,71 \cdot \lg(Q) + 11,93; 3)$
	$1 \Rightarrow 14$	$Q = m_2'' / m_{14}''$	$D_{v1,14} = Ha(Q > 1,38; 9,5; -18,71 \cdot \lg(Q) + 11,93)$
	$13 \Rightarrow 2$	$Q = m_2'' / m_{14}''$	$D_{v13,2} = Ha(Q > (1/1,38); 18,71 \cdot \lg(Q) + 11,93; 9,5)$
	$13 \Rightarrow 14$	$Q = (m_1'' + m_2'') / m_{14}''$	$D_{v13,14} = Ha(Q > 0,33; 18,71 \cdot \lg(Q) + 11,93; 3)$

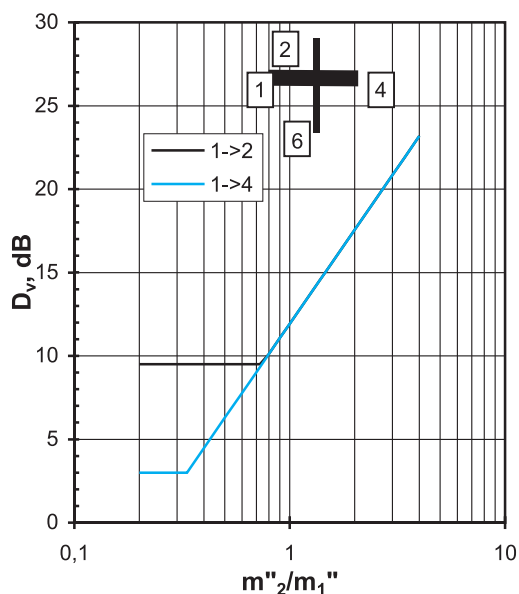
A kettős falakat tartalmazó csomópontok szimmetrikusak, tehát $m_1'' = m_2''$; és a hosszági elemek fajlagos tömege is egyenlő, pl. $m_3'' = m_4''$, $m_{13}'' = m_{14}''$.
A D_v kifejezések értelmezését l. előbb.

IV. Az eredő hanggátlás meghatározása a hangátviteli irányok teljesítményének összegzése alapján
A két helyiség közötti helyszíni súlyozott léghanggátlási számot, R'_{wer} -t hangterjedési utakon átjutott teljesítmények összegzésével lehet meghatározni (részletesen a 4.12. alfejezetet).

A 9.4. ábra példáján az összegzés 14 kerülőutas tagot és 2 közvetlen terjedéshez tartozó tagot tartalmaz. A 9.5. ábrán látható példa megoldásához 12 kerülőutas irány és az $1 \rightarrow 2$ terjedési irányokat a kettős fal laboratóriumi mérésével helyettesítve egy közvetlen terjedési irány tartozik. A 9.6. ábra pél-

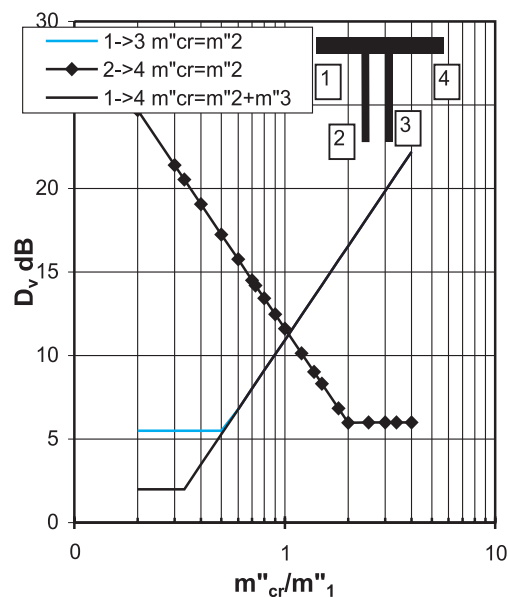
dájának számításához 1 közvetlen hangterjedést és 4 kerülőutas hangterjedést kell figyelembe venni. A (9.12) eredő hanggátlási képletben k jelöli a hangterjedési utak sorszámát, i a k -adik terjedési úthoz tartozó zajforrás oldali határolószervezet sorszámát, S_i annak felületét, R_{wij} a k -adik terjedési úthoz tartozó az i és j indexű elemek közötti terjedési út súlyozott léghanggátlási számát:

$$R'_{wer} = 10 \cdot \lg \left(\frac{S_1}{\sum_k S_i \cdot 10^{-0,1 \cdot R_{wij}}} \right) \quad (9.12)$$



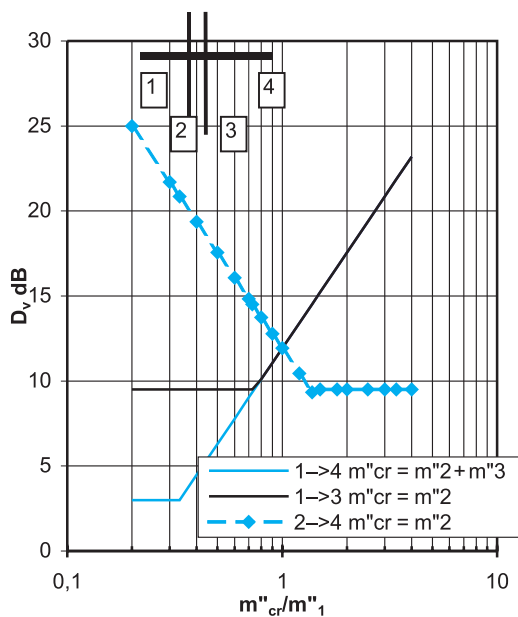
9.8. ábra. Szimmetrikus elrendezésű, X alakú csomópont rezgésebbesszint-különbségei

Az X alaknak megfelelő szemközti épületszerkezetek fajlagos tömege megegyezik, tehát $m''_1 = m''_4$, és $m''_2 = m''_6$. A 2→1 terjedési irányhoz az m''_1/m''_2 fajlagos tömegarányból lehet D_v értékét meghatározni

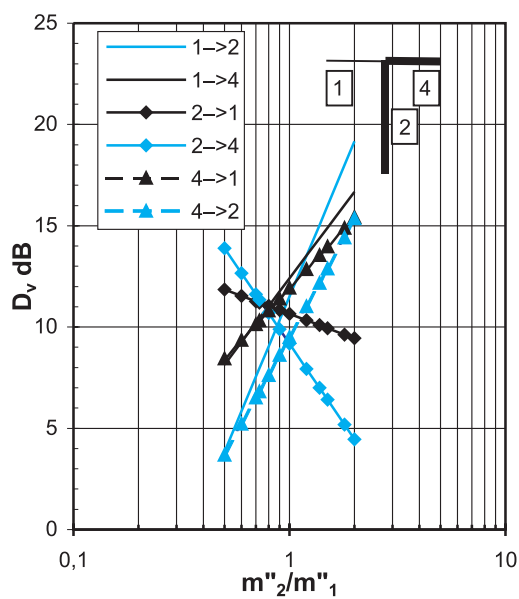


9.9. ábra. Szimmetrikus elrendezésű, II alakú csomópont rezgésebbesszint-különbségei

A szimmetrikus elrendezés azt jelenti, hogy $m''_1 = m''_4$, $m''_2 = m''_3$; tehát a II két szárának megfelelő épületszerkezetek fajlagos tömege, ill. a tetejének megfelelő épületszerkezetek fajlagos tömege megegyezik

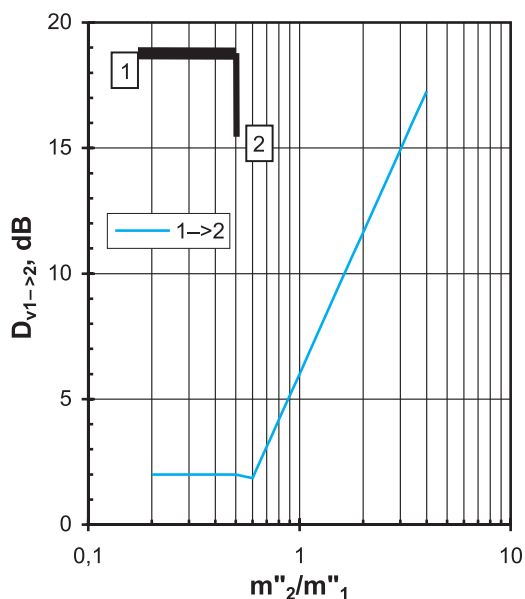


9.10. ábra. Szimmetrikus elrendezésű kettős II alakú csomópont rezgésebbesség-szint különbségei



9.11. ábra. Aszimmetrikus elrendezésű, T alakú csomópont rezgésebbesszint-különbségei

Az aszimmetrikus elrendezés azt jelenti, hogy $m''_2 = m''_4$; a csomópont jellemzően homlokzat-belső fal csatlakozásnál fordul elő; az 1. elem belső épületszerkezetnek, a 2. és 4. leggyakrabban homlokzati szerkezetnek felel meg



9.12. ábra. L alakú csomópont rezgésebbesszint-különbségei

9.3.3. A méretezés lépései

A gyakorlati tapasztalatok azt mutatják, hogy a 9.1. ábra sorrendjében haladva célszerű az akusztikai méretezést elvégezni. Azonban szintén a gyakorlat mutatja azt, hogy mire az akusztikai méretezés munkarésze sorra kerül, számos korábban született, az épület szerkezeti rendszerére és szerkezeteire vonatkozó döntés a mozgási lehetőségeket leszűkítette. Ha a kiindulásierkeztválasztás nem vette figyelembe a hangszigetelés iránti igényt, csak a burkolatok kiválasztása a szükséges minőség elérésének eszköze.

9.3.4. A számított eredmények értékelése

Az eredmények megbízhatósága alapvetően függ attól, hogy a felhasznált adatok milyen mértékben egyeztek meg az épületben felhasznált anyagok és szerkezetek adataival. A megbízható eredmények elérése érdekében az építkezésen a felhasznált anyagokat és kivitelezett szerkezeteket ellenőrizni kell. Az ismeretek és tapasztalatok jelenlegi szintjén a hangszigetelési követelmények számításos ellenőrzésének eredményét a következők szerint kell értékelni:

- ha a számított eredmény kisebb, mint a tervezési cél (követelmény), akkor a szituáció biztosan nem lesz megfelelő;
- ha a számított eredmény legalább 2 dB-lel haladja a követelményt, akkor a szituáció biztosan megfelelő lesz;

- a fennmaradó 2 dB széles, bizonytalan értékelésű sávban részletes, frekvencia függvényében végzett számítás, vagy analóg szituációkon végzett mérés és számítás eredményeinek összevetésére van szükség.

Az eredmények megbízhatóságát növeli, ha a számítást mindkét értelmezhető hangterjedési irányban elvégzik, hiszen a hangszigetelési követelményeknek mindkét terjedési irányban teljesülniük kell.

9.4. Helyiségek közötti léghangszigetelés méretezése a [III.7] szabvány szerint

9.4.1. A méretezési módszer alkalmazási területei

A módszer nehéz szerkezetekből – falazott, öntött monolit, előre gyártott stb. – és szerelt szerkezetekből készült épületek egymás melletti vagy egymás feletti helyiségei közötti helyszíni súlyozott léghanggátlási szám meghatározásának módja. A példák azért vízszintesen szomszédos helyiségeket mutatnak, mert itt többféle alaprajzi és csomóponti változat előfordulhat. A helyiségekben burkolat jellegű szerkezetek – álmennyezet, száraz vakolat stb. – lehetnek. A hangátvitel mechanizmusa alapvetően testhang átvitel, de a réseken keresztüli átvitel, illetve a burkolat jellegű szerkezetek összetett hangátvitelére illeszkedik a számítási módszerhez. A számítás elvégzésére akkor nyílik lehetőség, ha a tervezési folyamatban a helyiségkapcsolatok már kialakultak, és a szerkezetek kiválasztásának ideje vagy a kiválasztás leellenőrzésének ideje érkezett el.

A keletkező eredmény a szomszédos helyiségek között két irányban kialakuló léghanggátlás átlagát, tehát nem az irányfüggő léghanggátlás eredményét adja meg. Ennek a megoldásnak elvi okai vannak: a két terjedési irány számszerűen eltérő hanggátlási eredményt ad, és a módszer a reciprocitás elvét ily módon érvényesíti.

A [III.7] szabvány az egyes szerkezeti elemek azonosítására nemcsak a 9.3. alfejezetben alkalmazott jelölési módot, hanem a német szabványosításban nagyon rég óta meghonosodott rendszert is alkalmazza. Ez a kevert rendszer azonban nem ad többletinformációt, ezért az ismertetés úgy készült, hogy az egyes épületszerkezeteket az előző részhez hasonlóan *i, j stb.* indexek különböztetik meg egymástól.

A méretezési módszer mind a frekvenciafüggő, mind az egyszerűsített közelítést tartalmazza, A ki-

induló akusztikai adatok a következők (a zárójelben az adat forrása szerepel):

- a határolószerkezetek frekvenciafüggő és súlyozott léghanggátlási száma, R_i , R_{wi} (termékjellemző, katalógusadat);
- egyes elemek felülete, S_i (építészeti tervdokumentáció, pl. engedélyezési terv);
- szerkezetek utózengési ideje a helyszíni beépítésben és laboratóriumban, $T_{is,situ}$ (átlagos helyszíni szituációra becsült adat), $T_{is,lab}$ (termékjellemző, katalógusadat, a laborszerkezetektől is függ);
- a szerkezeti csomópontok alakja és elemeinek fajlagos tömege; e két adatból kell az elemek közötti rezgéscsillapítási tényezőt, K_{ij} -t meghatározni;
- a burkolatok – álmennyezet, álpadló, falburkolat, úszópadló – hanggátlásjavító hatása, ΔR_w , ΔR_{wi} (szerkezetjellemző, ha a burkolat termék, akkor katalógusadat, egyedi szerkezet esetén a 4.8. alfejezet alapján méretezhető);
- rések, nyílások, légszűrőknél frekvenciafüggő és súlyozott, szabványos hangnyomásszint-különbsége, D_n , D_{nw} (termék esetén katalógusadat, tervezési, kivitelezési sajátosság esetén tapasztalati, szakirodalmi adat).

Az egyszerűsített közelítés természetesen csökkenti a méretezés pontosságát, de áttekinthetőbbé teszi az eljárást.

A további kiindulási adatok általában az engedélyezéstervezési szintű dokumentációból már leolvashatók, a dokumentáció rajzi része és a műszaki leírás megadja a szükséges anyagféléseket, méreteket, rétegrendeket.

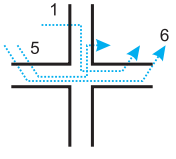
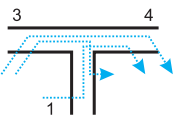
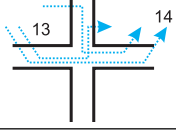
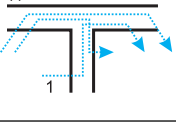
A méretezési módszer újként jelent meg, elvi alapjai elsősorban [IV.7]-ben találhatóak, egyes elemeit pedig korábban már publikálták, l. pl. a [9.8], [9.9] cikkeket.

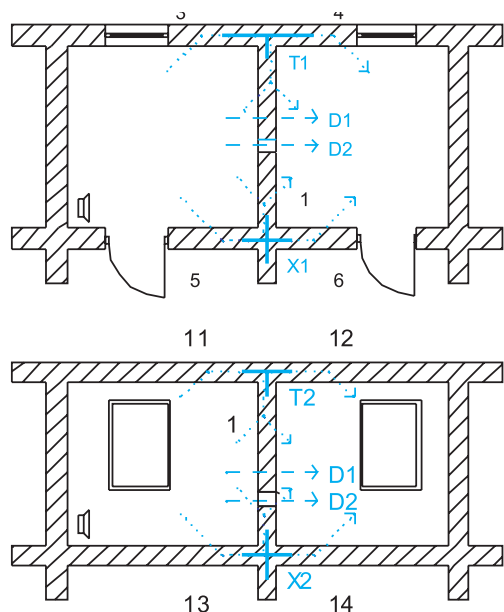
9.4.2. A méretezési módszer elvi alapjai

1. Hangátviteli irányok

A helyiségek közötti léghanggátlás méretezésének elvi alapja a 4.12. alfejezetnek megfelelően az, hogy a különböző szerkezeteken keresztül lejátszódó hangátvitel során a zaj ellen védendő helyiségbe átvitt akusztikai teljesítményeket összegezni kell. A hangterjedés mechanizmusa nehéz szerkezetekben testhang jellegű, szerelt szerkezetekben léghang- és testhang jellegű lehet. A hangterjedési utakat a 9.13. ábra szemlélteti egy lehetséges egyhájú szerkezetekből, valamint álló alaprajzon és metszeten. Az

9.7. táblázat. Hangátviteli irányok a 9.13. ábra mintapéldáján

Hangátviteli irány	Csomópont azonosítása	Egyik helyiségben levő szerkezet	Másik helyiségben levő szerkezet
Közvetlen, $D1$		1	1
Közvetlen, $D2$		1-en levő nyílás	1-en levő nyílás
$X1$ csomóponton keresztül		5	1
		5	6
		1	6
$T1$ csomóponton keresztül		3	1
		3	4
		1	4
$X2$ csomóponton keresztül		13	1
		13	14
		1	14
T csomóponton keresztül		11	1
		11	12
		1	12



9.13. ábra. Alaprajz és metszet helyszíni léghanggátlás meghatározásához, ha a két helyiséget egyhéjú falazat választja el egymástól

A [III.10] módszer csak **T**, **X**, és **L** alakú csomópontokat tartalmazó alaprajzokat és metszeteket tud megoldani

egyhéjú szerkezet olyan épületszerkezet, amelynek mindkét oldalán azonos a rezgéssebesség. A határolószerkezeteket számok jelölik. A szabvány más jelölést alkalmaz, de az előzőekben már alkalmazott sorszámozás jobban segíti az összehasonlítást és megértést. A példában *l* a két helyiséget elválasztó fal, a homlokzat a 3, 4, a belső fal az 5 és 6, a födém pedig a 11–14 szerkezet. Bármelyik elemet takarhatja a helyiségek felől olyan akusztikai burkolat – falburkolat, álmennyezet, padlóburkolat –, amely a szerkezet hangszigetelését megváltoztatja. Bármelyik elem szerelt jellegű is lehet. Csak olyan alaprajz oldható meg, amelyben szimmetrikus **T**, **X**, valamint **L** alakú csomópontok találhatók. A hazai tervezési, kivitelezési gyakorlatban található kettős falak, tagolt homlokzatok nem vagy csak az általánosságok szintjén oldhatók meg. A metszet a legfelső szinten kialakuló helyzetet mutatja, ahol a felső csomópont szintén **T** alakú. Általános emeleti helyiségkapcsolatnál a függőleges metszeten látható mindkét csomópont **X** alakú.

A két helyiséget elválasztó szerkezeten keresztül – a példa kedvéért – két hangterjedés alakul ki. A *D1* a tömör falon keresztül, a *D2* pedig egy résen, nyíláson keresztül. Ezek a közvetlen hangterjedési utak.

A csomópontok betűjele a csomópont formájára utal:

- **X** szimmetrikus, kereszt alakú csomópont (a szemközti elemek anyaga és vastagsága megegyezik); leggyakrabban általános helyen fordul elő (födém–fal csatlakozás, fal–fal csatlakozás);
- **T** szimmetrikus, T alakú csomópont (a T tetejének megfelelő két épületszerkezet anyaga és vastagsága megegyezik); jellemzően homlokzatoknál fordul elő mind az alaprajzon, mind a metszeten;
- **L** L alakú csomópont, a példán ilyen nem szerepel, de a [III.7] szabvány keretei között megoldható.

II. A hangátviteli utak hanggátlása

A következő lépések a frekvencia függvényében értelmezendők. A pont végén vannak azok az egyszerűsítések, amelyek az egyadatos mennyiségek alkalmazását lehetővé teszik.

A 9.13. ábra példájában *D1* hangátviteli út hangszigetelését a két helyiséget elválasztó szerkezet helyszíni léghanggátlása, R_{lsitu} , valamint az adó- és vevőoldalról felszerelt, burkolat jellegű szerkezetek hanggátlásjavítása, ΔR_{IA} és ΔR_{IV} határozza meg. Egy határolószerkezet laboratóriumi és helyszíni léghanggátlása közötti kapcsolatot a (9.13.) összefüggés, a *D1* hangterjedési út hanggátlását a (9.14.) összefüggés adja meg. A (9.13.) összefüggés azt a fizikai tartalmat fejezi ki, hogy egy szerkezet léghanggátlási száma a szerkezet veszteségi tényezőjétől is függ (l. részletesebben a 4.4.4. részt). Ha nagyobb a veszteségi tényező, akkor a szerkezetből a csatlakozó más szerkezetekben több akusztikai teljesítmény távozik, tehát kevesebb sugárzódik le. A szerkezeti utózengési idő a veszteségi tényezővel fordítottan arányos (l. a 3.4. alfejezetet). Az átszámítás, azaz a veszteségi tényező figyelembevétele nem szükséges többi között akkor, ha az *l* szerkezet szerelt jellegű, vagy jól méretezett rugalmas elválasztások megakadályozzák a teljesítményterjedést az elválasztó szerkezetből a többi irányába:

$$R_{lsitu} = R_1 - 10 \cdot \lg \frac{T_{1S,situ}}{T_{1S,lab}}; \quad (9.13)$$

$$R_{D1} = R_{lsitu} + \Delta R_{IA} + \Delta R_{IV}. \quad (9.14)$$

A *D2* hangátviteli út hanggátlását a (9.15) összefüggés adja meg, S_n a nyílás tényleges felülete (l. az 5.9. fejezetet).

$$R_{D2} = D_n + 10 \cdot \lg \left(\frac{S_n}{10} \right) \quad (9.15)$$

A kerülőutas léghanggátlási szám, R_{ij} definíciója eltér (9.7) összefüggéssel kapcsolatban említett-

tektől. Az eltérés inkább praktikus, mind elvi természetű.

A szabvány egy hangátviteli út a kerülőutas léghanggátlási számát a (9.16) összefüggés szerint határozza meg. A hangterjedési út részben az i indexű elemnél kezdődik (gerjesztett szerkezet) és a j indexű elemnél fejeződik be (hangot sugárzó szerkezet), részben fordítva, tehát a gerjesztett szerkezet a j indexű, a lesugárzó szerkezet pedig az i indexű. A kerülőutas léghanggátlási szám meghatározásában részben a lesugárzott akusztikai teljesítmény szerepel (az $i \rightarrow j$ irányban W_j , a $j \rightarrow i$ irányban W_j , a viszonyítási alap azonban mindig a két helyiséget elválasztó, 1 indexű szerkezet felületére beeső akusztikai teljesítmény, W_{1be} . Ennek megfelelően fejezi ki tehát R_{ij} meghatározását a (9.16) képlet, a kerülőutas léghanggátlási szám a két irányban meghatározott léghanggátlási szám átlaga. A reciprocitás törvényének érvényesítésével indokolható ez a meghatározás:

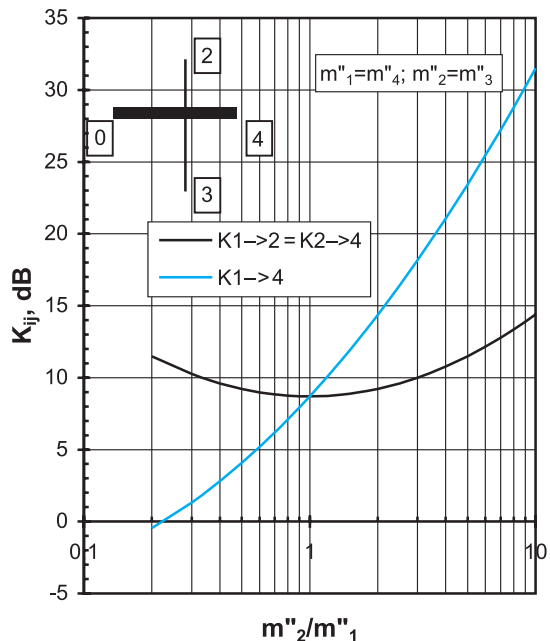
$$R_{ij} = \frac{1}{2} \cdot \left[10 \cdot \lg \left(\frac{W_{1be}}{W_{jsug}} \right) + 10 \cdot \lg \left(\frac{W_{1be}}{W_{isug}} \right) \right]. \quad (9.16)$$

Az egyik, pl. az $i \rightarrow j$ irány kerülőutas hanggátlása azonos átalakítások és értelmezések alapján a (9.17) képlet segítségével fejezhető ki, $D_{vi \rightarrow j, situ}$ a szerkezeti csomópont rezgésebbesszint-különbsége az $i \rightarrow j$ terjedési irányban, a helyszíni beépítésben, σ_i és σ_j az i és j indexű elem sugárzási foka (l. a 4.3.1. részt):

$$\begin{aligned} R_{i \rightarrow j} &= 10 \cdot \lg \left(\frac{W_{1be}}{W_j} \right) = 10 \cdot \lg \left(\frac{S_i}{S_1} \cdot \frac{W_{1be}}{W_{jsug}} \right) = \\ &= R_{i, situ} + 10 \cdot \lg \left(\frac{S_i}{S_1} \right) + D_{v, i \rightarrow j, situ} + 10 \cdot \lg \left(\frac{S_i}{S_j} \cdot \frac{\sigma_i}{\sigma_j} \right). \end{aligned} \quad (9.17)$$

A két terjedési irány számtani közepe adja meg R_{ij} értékét.

R_{ij} kiszámítását a (9.18) összefüggés mutatja. $R_{i, situ}$ és $R_{j, situ}$ jelöli az i és j indexű szerkezet léghanggátlási számát helyszíni körülmények között. A laboratóriumi eredményekből a (9.19) összefüggéssel kell helyszíni léghanggátlásra átszámítani, pl. az i indexű szerkezetre, $T_{iS, lab}$ a szerkezet laboratóriumban kialakuló szerkezeti utózengési ideje, amely kölcsönös kapcsolatban van a veszteségi tényezővel (l. a 3.4. alfejezetet), $T_{iS, situ}$ pedig ugyanannak a szerkezetnek a szerkezeti utózengési ideje a helyszíni beépítésben. A szerkezeti utózengési idővel végzendő korrekció magyarázata megegyezik a (9.13) képletnél található magyarázattal. Ez további adat a tervezés idején nem áll rendelkezésre, átlagos adatokat kell alkalmazni. $\Delta R_{i, situ}$ és $\Delta R_{j, situ}$ az i és j indexű szerkezet elé szerelt hanggátlást javító burkolat (pl. álmennyezet, úszópadló, falburkolat stb.). A burkolat laboratóriumban mért, hanggátlást javító hatását azonosnak lehet venni a helyszínen kialakuló javító hatással. S_i az i indexű határolószere-



9.14. ábra. Nehéz elemekből felépülő, szimmetrikus, X alakú csomópont rezgéscsökkentési tényezője

K_{ij} értékei a frekvencia függvényében állandók

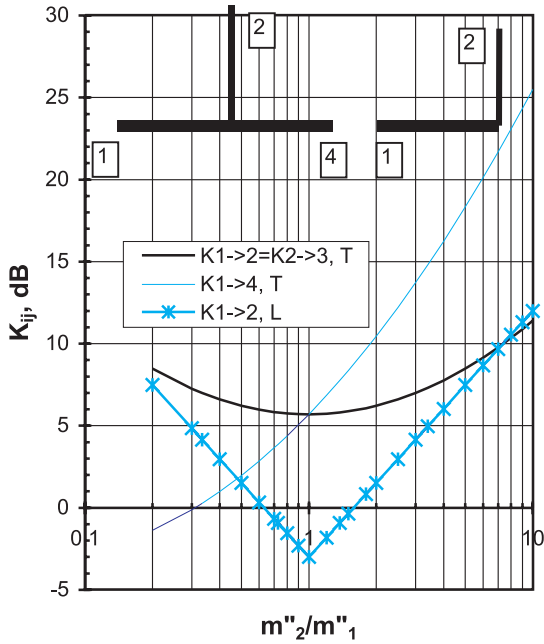
kezet felületét jelenti. $D_{v, ij, situ}$ az i és j indexű elemek között levő szerkezeti csomópont irány szerint átlagolt helyszíni rezgésebbesszint-különbsége a helyszínen:

$$\begin{aligned} R_{ij} &= \frac{R_{i, situ} + R_{j, situ}}{2} + \Delta R_{i, situ} + \Delta R_{j, situ} + \\ &+ 10 \cdot \lg \frac{S_1}{\sqrt{S_i \cdot S_j}} + D_{v, ij, situ}; \end{aligned} \quad (9.18)$$

$$R_{i, situ} = R_{i, lab} - 10 \cdot \lg \left(\frac{T_{iS, situ}}{T_{iS, lab}} \right). \quad (9.19)$$

A szerkezeti csomópont irány szerint átlagolt helyszíni rezgésebbesszint-különbsége, $D_{v, ij, situ}$ több tényező együttes hatását tartalmazza. Meghatározásához a kiindulás a szerkezeti csomópont K_{ij} rezgéscsökkentési tényezője, amely a csomópont geometriájától, a csatlakozószervezetek minőségétől (szerelt vagy nehéz szerkezet) és a fajlagos tömegek arányától függ. Értékeit a 9.14.–9.16. ábra mutatja.

A 4.11. alfejezet szerint a szerkezeti csomópont rezgégátlását, $\gamma_{i \rightarrow j}$, a (9.20) összefüggés fejezi ki. A rezgégátlás a hajlítóhullám által a csomópont i -edik elemére beszállított, és a csomópontból a j -edik elemre hajlítóhullámként kijutó akusztikai



9.15. ábra. Nehéz elemekből felépülő, szimmetrikus, T alakú, valamint L alakú csomópont rezgéscsökkentési tényezője

K_{ij} értékei a frekvencia függvényében állandók

kai teljesítmény, $W_{i,be}$ és $W_{j,d}$ hányadosának tízszeres logaritmus. Értéke a $D_{vi \rightarrow j}$ rezgésebbesszint-különbségtől, a csomópont l_{ij} csatolási élhosszától, az i és j indexű elem z'_{Bi} és z'_{Bj} fajlagos karakterisztikus hullámimpedanciájától, valamint a hullám elszállításában részt vevő j indexű elem S_j felületétől, T_j szerkezeti utózengési idejétől, és az e szerkezetben kialakuló hajlítóhullám terjedési sebességétől, c_{Bj} -től függ. A fajlagos karakterisztikus impedanciák értelmezését a (3.179) képlet mutatja:

$$\begin{aligned} \gamma_{i \rightarrow j} &= 10 \cdot \lg \left(\frac{W_{i,be}}{W_{j,d}} \right) = \\ &= D_{v,i \rightarrow j} + 10 \cdot \lg \left(\frac{z'_{B,i}}{z'_{B,j}} \right) + 10 \cdot \lg \left(\frac{l_{ij} \cdot T_j \cdot c_{Bj}}{2,2 \cdot S_j \cdot \pi^2} \right) \end{aligned} \quad (9.20)$$

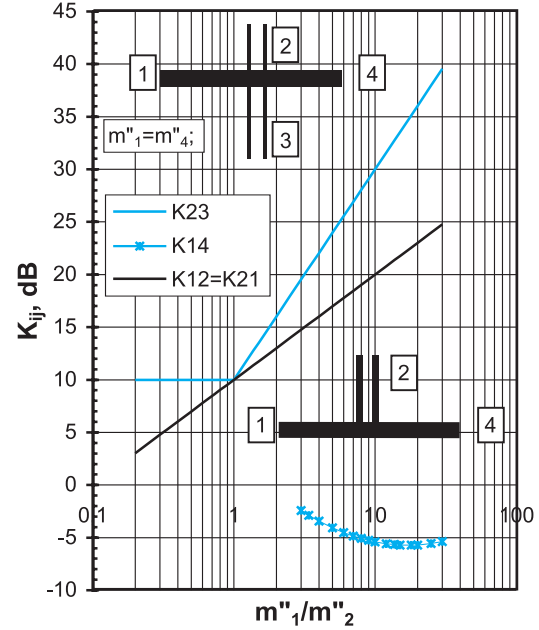
Az irány szerint átlagolt rezgésgátlás, γ_{ij} , az $i \rightarrow j$ és a $j \rightarrow i$ terjedési irány rezgésgátlásának átlaga. Felhasználva még a határfrekvencia és a hajlítóhullám terjedési sebessége közötti összefüggést is, az irány szerint átlagolt γ_{ij} rezgésgátlás:

$$\gamma_{ij} = D_{v,ij} + 10 \cdot \lg \frac{l_{ij} \cdot c}{2,2 \cdot \pi^2} + 5 \cdot \lg \left(\frac{T_j \cdot T_i}{S_j \cdot S_i} \cdot \frac{f}{\sqrt{f_{ci} \cdot f_{cj}}} \right) \quad (9.21)$$

A szerkezeti elemek veszteségeit a szabvány az egyenértékű elnyelési hosszal, $\alpha_{i,situ}$ -vel és $\alpha_{j,situ}$ -vel jellemzi. Normalizálja az egyes mennyiségeket az $f_{rel} = 1000$ Hz frekvenciára, így az irány szerint átlagolt rezgésgátlás a (9.24) képlet lesz.

$$\alpha_{i,situ} = \frac{2,2 \cdot \pi^2 \cdot S_i}{c \cdot T_{i,situ}} \cdot \sqrt{\frac{f_{rel}}{f}} \quad (9.22)$$

Szerelt szerkezet esetén a (9.22) összefüggés (9.23)-re módosul, mert a szerelt szerkezetek hanggátlását a veszteségi tényező nem befolyásolja:



9.16. ábra. Nehéz átmenő szerkezet és szerelt szerkezet szimmetrikus, T és X alakú csomópontjainak rezgéscsökkentési tényezője

K_{14} értékei a frekvencia függvényében állandók, K_{23} , K_{12} frekvenciafüggő, a grafikon az 500 Hz-es értéket mutatja
1, 4 nehéz szerkezet, 2, 3 szerelt szerkezet

$$\alpha_{i,situ} = \frac{S_i}{1m}; \quad (9.23)$$

$$\gamma_{ij} = D_{v,ij} - 10 \cdot \lg \left[\sqrt{\alpha_i \cdot \alpha_j} \cdot \frac{\sqrt[4]{f_{ci} \cdot f_{cj}}}{\sqrt{f_{rel}}} \right] \quad (9.24)$$

Bevezetve a szerkezeti csomópont K_{ij} rezgéscsökkentési tényezőjét a (9.25) képlet szerint, az irány szerint átlagolt rezgésebbesszint-különbség ebből az összefüggésből kifejezhető. E szabvány és megközelítés szerint K_{ij} lesz a csomópont „terméj jellemzője”:

$$D_{v,ij,situ} = K_{ij} - 10 \cdot \lg \left(\frac{l_{ij}}{\sqrt{\alpha_{i,situ} \cdot \alpha_{j,situ}}} \right) \quad (9.25)$$

III. Az eredő hanggátlás meghatározása a hangátviteli irányok teljesítményének összegzése alapján

Az eredő helyszíni léghanggátlást, R' -t a lesugárzott teljesítmények összegzése révén kell kiszámítani a 4.12. alfejezetnek megfelelően. A (9.17) összefüggés a felületektől független összegzést tesz lehetővé, a hangátviteli utak léghanggátlásával kifejezve a helyszíni léghanggátlás:

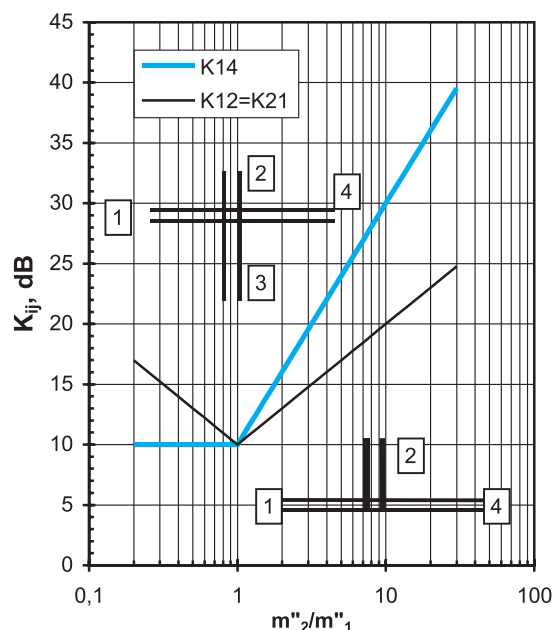
$$R' = -10 \cdot \lg \left(10^{-0,1 \cdot R_{D1}} + 10^{-0,1 \cdot R_{D2}} + \sum_k 10^{-0,1 \cdot R_{Dj}} \right) \quad (9.26)$$

ahol k a hangterjedési utak sorszáma; i és j a k -adik hangterjedési út kezdő- és záróeleme. A 9.12. ábra példájában az összegzés két közvetlen tagot (R_{D1} és R_{D2}) és 12 két kerülőutas tagot jelent (l. a 9.7. táblázatot is).

IV. A K_{ij} rezgéscsökkentési tényező értékei

A rezgéscsökkentési tényező értékeit a 9.8. és 9.9 táblázat foglalja össze. A felhasználás megkönnyítésére egyes adatok a táblázatban megadott grafikonokon is megtalálhatók. Helyszíni mérések során végzett adatgyűjtésekből határozták meg az értékeket és tendenciákat. A nehéz szerkezetekből álló csomópontok jellemzőit a 9.8. táblázat foglalja össze. A nehéz szerkezetek csatlakozásával levezetett eredmények és a számítási módszer általánosítható szerelt szerkezetek és vegyes szerkezetek csatlakozására is. A 9.9. táblázatban nehéz és szerelt szerkezetek csomópontjai láthatók. Minden közölt csomópontban a nehéz szerkezet méretváltozás nélkül átmegy a csomóponton, a szerelt szerkezetek két oldalról ehhez csatlakoznak.

A szerelt szerkezetekből felépülő csomópontok rezgéscsökkentési tényezőit a 9.10. táblázat tartalmazza. A szabvány nem részletezi a csomópont kialakítását, ezért az alkalmazás eredménye bizonytalannak látszik. Ezt a következtetést meg-



9.17. ábra. Szerelt szerkezetekből álló, szimmetrikus, T és X alakú csomópontok rezgéscsökkentési tényezője
Minden K_{ij} érték frekvenciafüggő, a grafikon az 500 Hz-es értéket adja meg. A csomópont részleteit a szabvány nem specifikálja a szükséges mértékig

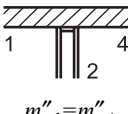
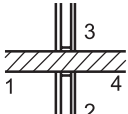
erősíti a következő pontban szerelt szerkezetek méretezésére vonatkozó másik módszer ismertetése is.

9.8. táblázat. Különböző szerkezeti csomópontok K_{ij} rezgéscsökkentési tényezői

Csomópont	Geometria	Számítás	Ábra
Szimmetrikus T, nehéz elemekből	$m''_1 = m''_4$	$K_{14} = 5,7 + 14,1 \cdot \lg\left(\frac{m''_2}{m''_1}\right) + 5,7 \cdot \left(\lg\left(\frac{m''_2}{m''_1}\right)\right)^2$ nem függ a frekvenciától	9.15. ábra
		$K_{12} = K_{24} = 5,7 + 5,7 \cdot \left(\lg\left(\frac{m''_2}{m''_1}\right)\right)^2$ nem függ a frekvenciától	
Szimmetrikus X, nehéz elemekből	$m''_1 = m''_4$ $m''_2 = m''_3$	$K_{14} = 8,7 + 17,1 \cdot \lg\left(\frac{m''_2}{m''_1}\right) + 8,7 \cdot \left(\lg\left(\frac{m''_2}{m''_1}\right)\right)^2$ nem függ a frekvenciától	9.14. ábra
		$K_{12} = K_{24} = 8,7 + 5,7 \cdot \left(\lg\left(\frac{m''_2}{m''_1}\right)\right)^2$ nem függ a frekvenciától	
L nehéz elemekből		$K_{12} = 15 \cdot \left \lg\left(\frac{m''_2}{m''_1}\right)\right - 3$ nem függ a frekvenciától	9.15. ábra

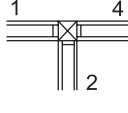
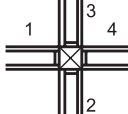
m''_i az i indexű épületszerkezet fajlagos tömegét jelenti.

9.9. táblázat. Nehéz szerkezet és szerelt szerkezetek csomópontjainak rezgéscsökkentési tényezői

Csomópont	Geometria	Számítás	Ábra
Szimmetrikus T, átmenő nehéz elemből (1, 4) és szerelt keresztági elemből	 $m''_1 = m''_4$	$K_{14} = 3 - 14,1 \cdot \lg \left(\frac{m''_1}{m''_2} \right) + 5,7 \cdot \left(\lg \left(\frac{m''_1}{m''_2} \right) \right)^2$ frekvenciafüggetlen	9.16. ábra
		$K_{12} = K_{21} = 10 + 10 \cdot \lg \left(\frac{m''_1}{m''_2} \right) + 3,3 \cdot \lg \left(\frac{f}{500} \right)$ frekvenciafüggő	
Szimmetrikus X, átmenő nehéz elemből (1, 4) és ehhez csatlakozó szerelt keresztági elemekből (2, 3)	 $m''_1 = m''_4$	$K_{14} = 3 - 14,1 \cdot \lg \left(\frac{m''_1}{m''_2} \right) + 5,7 \cdot \left(\lg \left(\frac{m''_1}{m''_2} \right) \right)^2$ frekvenciafüggetlen	9.16. ábra
		$K_{23} = 10 + 20 \cdot \lg \frac{m''_1}{m''_2} - 3,3 \cdot \lg \frac{f}{500}; K_{23} \geq 10dB$	
		$K_{12} = K_{21} = 10 + 10 \cdot \lg \left(\frac{m''_1}{m''_2} \right) + 3,3 \cdot \lg \left(\frac{f}{500} \right)$ frekvenciafüggő	

Az m''_i az i indexű épületszerkezet fajlagos tömegét jelenti.

9.10. táblázat. Szerelt szerkezetek csomópontjainak rezgéscsökkentési tényezői

Csomópont	Geometria	Számítás	Ábra
Szimmetrikus T, szerelt elemekből		$K_{14} = 10 + 20 \cdot \lg \left(\frac{m''_2}{m''_1} \right) - 3,3 \cdot \lg \left(\frac{f}{500} \right)$ frekvenciafüggő	9.17. ábra
		$K_{12} = K_{21} = 10 + 10 \cdot \lg \left(\frac{m''_2}{m''_1} \right) - 3,3 \cdot \lg \left(\frac{f}{500} \right)$ frekvenciafüggő	
Szimmetrikus X, szerelt elemekből		$K_{14} = 10 + 20 \cdot \lg \left(\frac{m''_2}{m''_1} \right) - 3,3 \cdot \lg \left(\frac{f}{500} \right)$ frekvenciafüggő	9.17. ábra
		$K_{12} = K_{21} = 10 + 10 \cdot \lg \left(\frac{m''_2}{m''_1} \right) - 3,3 \cdot \lg \left(\frac{f}{500} \right)$ frekvenciafüggő	

A szabvány nem specifikálja kellően a csomópont részleteit. m''_i az i indexű épületszerkezet fajlagos tömegét jelenti.

V. Számítás egyadatos mennyiségekkel

A szabvány arra is lehetőséget teremt, hogy a méretezés egyadatos mennyiségekkel elvégezhető legyen. Az egyszerűsítés, átdolgozás alapjai:

- a laboratóriumi léghanggátlási számok helyére a laboratóriumi súlyozott léghanggátlási számok kerülnek;

- a szerkezeti utózengési idők hatása elhanyagolható – ez a biztonság javára jelent némi tartalékot;
- $\alpha_i = S_i/1$ m helyettesítéssel a csomópontok rezgés csökkentési tényezőjének a szerkezeti utózengési időtől függő értéke egyszerűsödik; ez azonban formális egyszerűsítés, nincs köze a ténylegesen előforduló adatokhoz;

- az irány szerint átlagolt rezgésebbesszint-különbségek helyére K_{ij} kerül.

9.4.3. A méretezés lépései

A méretezés célszerű sorrendjét a 9.1. ábra mutatja. Ez a sorrend a módszer alkalmazása során is tartatható. Nagyon erős az építési mód hatása, amely az elvileg lehetséges megoldások közül sok alkalmazását kizárja. A leggyakoribb korlátozás a szilárd-sági szempontok miatt jelenik meg.

9.4.4. A számított eredmények értékelése

A módszer a számított eredmény felhasználhatóságára nem ad közvetlen útmutatást. Az eddig elvégzett számítások tapasztalatai szerint az eredmények szórása 2,5 dB akkor, ha a vizsgált szituációban homogén szerkezetek szerepelnek, kivitelezési hiba, eltérés a tervtől, hibás anyagok és szerkezetek alkalmazása nem fordul elő.

9.5. Egymás melletti helyiségek közötti léghanggátlás méretezése, ha a válaszfal szerelt szerkezet az [I.12] alapján

9.5.1. A méretezési módszer alkalmazási területei

A méretezési módszer egymás mellett levő, szerelt válaszfallal elválasztott helyiségek közötti léghanggátlás meghatározását írja le. Az egyszerűsített közelítést tartalmazza, nem a frekvencia függvényében számol, hanem egyadatos akusztikai mennyiségekkel dolgozik. Az egyadatos mennyiségek a következők:

- a két helyiséget elválasztó szerelt falszerkezetek súlyozott léghanggátlási száma, R_{wi} (termékjellemző, katalógusadat);
- a kerülő hangátviteli utak (álmennyezet, padlón, átmenő falakon stb. vezető utak) hosszirányú súlyozott léghanggátlása, R_{Lw0} (szerkezetjellemző, katalógusadat, de nem függ élesen gyártók termékeitől, ezért általánosan is megadható);
- rések, nyílások, légszűrőknél súlyozott szabványos hangnyomásszint-különbsége, D_{nw} (termék és szerkezetjellemző, katalógusadat);

A további kiindulási adatok (pl. a méret- és szerkezeti adatok) általában az engedélyezéstervezési szintű dokumentációból már leolvashatók, a rajzi részben és a műszaki leírásban található információk fel-

dolgozása megadja a szükséges anyagféleségeket és méreteket.

A határolószerkezetek a következők lehetnek:

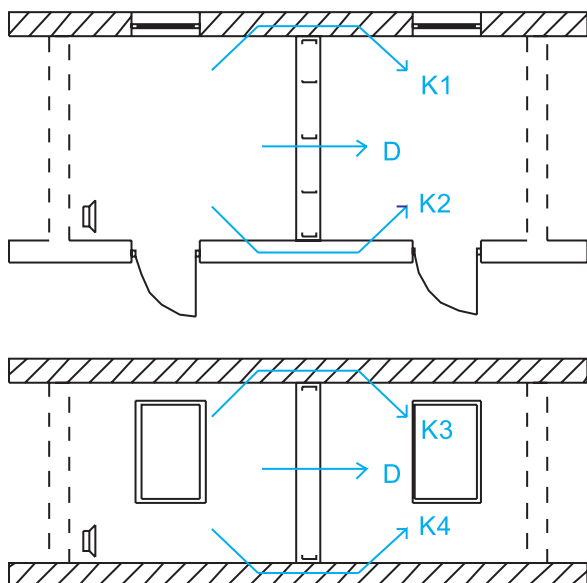
- a két helyiséget elválasztó falszerkezet minden esetben szerelt jellegű;
- a folyosó felőli fal, belső válaszfal nehéz vagy szerelt jellegű;
- a födém nehéz szerkezet, rajta lágy vagy kemény burkolat, vagy úszópadló készülhet;
- a homlokzat nehéz szerkezet, tetszőleges külső oldali hőszigetelő burkolattal;
- álmennyezet lehetséges, tetszőleges kialakítással és fal-álmennyezet csomóponttal;
- álpadló elvileg lehetséges, de kiindulási adatok nem állnak rendelkezésre.

9.5.2. A méretezési módszer alapjai

A méretezési feladat megoldása az [I.12] szabvány alkalmazásán alapul, a módszer vagy alkalmazása több, szerelt falrendszereket gyártó cég katalógusában megtalálható. A Magyarországon jelenleg szabványokban található hangszigetelési követelmények logikája és rendszere az eredeti módszer kisebb mértékű finomítását tette szükségessé.

A méretezés feladatát a 9.18. ábra értelmezi. Az ábrán két, egymással teljes válaszfalfelületen szomszédos helyiség látható. A helyiségeket szerelt válaszfal választja el egymástól. A belső, folyosó felőli fal és a homlokzat szerelt vagy nehéz szerkezet lehet. A helyiségekben álmennyezet készülhet, a padlót kontakt burkolat – szőnyegpadló, pvc stb. –, úszópadló vagy akár álpadló burkolhatja.

A két helyiség közötti hangterjedés lehetséges irányait számba véve mindig azonosítható egy ún. közvetlen út, egy olyan hangterjedés, amely csak az elválasztó szerkezeten keresztül vezet. Ezt az ábrán D jelöli. Ha a válaszfalon további hangterjedési utat létrehozó szerkezeti elemek találhatók, akkor két vagy több közvetlen hangterjedést kell figyelembe venni, amint az az előző példákban is történt. Az átmenő szerkezeteken keresztül szintén kialakul hangterjedés, ez a négy átmenő szerkezet miatt négy hangterjedési irányt jelent. Jelük az ábrán $K1...K4$. Ha a két helyiséget elválasztó szerkezet szerelt jellegű, nem alakul ki olyan hangterjedés, amelyben a válaszfal és valamelyik átmenő szerkezet együttesen játszana szerepet, tehát a szerelt válaszfal nem ad át akusztikai teljesítményt egyik átmenő szerkezetnek sem, ill. az átmenő szerkezetek nem adnak át akusztikai teljesítményt a szerelt válaszfalnak. Így összességében öt hangterjedési út hatását kell figyelembe venni.



9.18. ábra. Helyiségkapcsolat vázlata a helyszíni léghanggátlás meghatározásához az [I.12] módszer alkalmazásával

D: közvetlen hangátviteli út; K1...K4: az átmenő szerkezeteken keresztülvetető hangátviteli utak;

Egy hangterjedési út hangszigetelése több módon jellemezhető. Az [I.12] méretezési módszerben az átmenő szerkezeteken keresztül vezető hangterjedési utak hangszigetelésére a hosszirányú léghanggátlási szám a jellemző az 5.10. alfejezet értelmezése szerint. A közvetlen hanggátláshoz képest az a legfontosabb eltérés, hogy a terhelést nem az átmenő szerkezet zajforrás felőli oldalára jutó akusztikai teljesítmény, hanem a laboratóriumi elválasztó szerkezet felületére beeső akusztikai teljesítmény jellemzi. Ennek nagysága vízszintes irányú hangterjedést létrehozó szerkezetek – átmenő fal, álmennyezet, álpadló – esetén 10 m^2 . A [II.27] szabványban részletezett laboratórium méreteit úgy választották meg, hogy ha vízszintes síkú átmenő szerkezetet vizsgálnak – pl. födém, álmennyezet –, a vizsgálandó és az elválasztó szerkezet közös élhossza, a csatolási hossz $l_0 = 4,5 \text{ m}$, míg függőleges síkú átmenő szerkezetet vizsgálatakor – pl. falak – a vizsgálandó és az elválasztó szerkezet közös élhossza $l_0 = 2,8 \text{ m}$.

Bármely átmenő szerkezet helyszíni, hosszirányú súlyozott léghanggátlási száma, R_{Lwh} a „szabványos”, tehát ismert méretű laboratóriumban mért hosszirányú súlyozott léghanggátlási számából, R_{Lw0} -ból a helyszíni méretek ismeretében számításal meghatározható. A laboratóriumi méretek S_0 : a laboratórium két helyiséget elválasztó falának a fe-

lülete, másképpen laboratóriumi vonatkoztatási felület; l_0 : az átmenő szerkezet és a laboratórium válaszfala közös élhossza; ugyanezek a méretek a helyszíni beépítésben S_h és l_h :

$$R_{Lwh} = R_{Lw0} + 10 \cdot \lg \left(\frac{S_h}{S_0} \right) - 10 \cdot \lg \left(\frac{l_h}{l_0} \right). \quad (9.27)$$

A (9.27) összefüggés két tényező hatását tükrözi:

- helyszíni körülmények között a vonatkoztatási felület, azaz a két szomszédos helyiséget elválasztó fal felülete általában nem egyezik meg a laboratóriumi mérettel, S_0 -val; a hanggátlás definíciója miatt a nagyobb vonatkoztatási felület nagyobb számértékű hanggátlást eredményez; a vonatkoztatási felület nem játszik tényleges fizikai szerepet a két helyiség közötti hangátvitelben;
- a két helyiség közötti hangterjedés tényleges átvivőfelülete arányos a csatolási élhosszal, a nagyobb átvivőfelületen az átvitt összes akusztikai teljesítmény nagyobb lesz, ez lecsökkenti a hosszirányú hanggátlást.

A hosszirányú léghanggátlás definíciója alapján a zaj ellen védendő helyiségbe lesugárzott akusztikai teljesítményt a (9.28) képlet fejezi ki. Az i index a határolószerkezeteket különbözteti meg:

$$W_{Si} = W_{bel} \cdot 10^{-0,1 \cdot R_{Lwhi}}. \quad (9.29)$$

A helyiségeket elválasztó falszerkezet által lesugárzott akusztikai teljesítményt a (9.28) összefüggéssel azonos módon lehet meghatározni, az összefüggésben, ez esetben a fal közvetlen hanggátlása, R_{Dw} szerepel. Az eredő súlyozott léghanggátlási szám, R'_{wer} értékét a lesugárzott teljesítmények összegzésével lehet meghatározni:

$$R'_{wer} = -10 \cdot \lg \left(10^{-0,1 \cdot R_{Dw}} + \sum_{i=1}^4 10^{-0,1 \cdot R_{Lwhi}} \right). \quad (9.30)$$

9.5.3. A méretezés lépései

A méretezés célja két helyiség közötti léghanggátlási előírás, követelmény teljesítése. A kiindulási adatok az épületrész szerkezeti rendszere és fő méretei:

- a két helyiséget elválasztó fal szerelt szerkezetű;
- a homlokzat és a belső fal szerelt vagy falazott szerkezetű;
- a helyiségekben készül vagy nem készül álmennyezet;
- a helyiségekben a padlóburkolat típusa, szerkezeti rendszere (álpadló, úszópadló, kontaktpadló stb.).

A méretezés eredménye a hangszigetelési igény teljesülése érdekében:

- a válaszfal szerkezeti részletei, amelyek a szükséges hanggátlás biztosítják;
- a válaszfal és a négy átmenő szerkezet közötti szerkezeti csomópontok típusa, szerkezeti rész-

letei, amelyek elegendő hangszigetelésű a követelmény teljesítése érdekében;

- az átmenő szerkezetek részletei.

A méretezés általános lépéseit a 9.1. ábra mutatja.

1. lépés: a léghanggátlási követelmény, hangszigetelési igény ($R'_{wköv}$) megállapítása; a követelmény szabványban, építésügyi előírásban vagy más szakmai dokumentumban található.

A 2. és 3. lépés automatikusan teljesül a példában.

A 4. lépés a (9.23) összefüggés felírásával teljesül.

5a lépés: a válaszfal szerkezetét kiindulásul úgy kell kiválasztani, hogy $R_{Dw} + 5 > R'_{wköv}$;

5b lépés: az átmenő szerkezetek részleteit és átmenő szerkezeteknél kialakuló szerkezeti csomópontok részleteit kiindulásul úgy célszerű kiválasztani, hogy a helyszín által meghatározott méretekkel mind a négy kerülőútra külön-külön $R_{Lwh} + 5 > R'_{wköv}$; lehetséges az is, hogy a szerkezeti részletek közül egyik-másik kisebb hangszigetelést eredményez, ekkor azonban a többi összetevőt túl kell méretezni.

6. lépés: az 5a és 5b lépéseknek megfelelő szerkezetek kiválasztása, az eredő súlyozott léghanggátlási szám meghatározása a (9.30) összefüggés segítségével; ha a szigetelési igény, követelmény teljesül, a feladat megoldását első közelítésben sikerült megtalálni; a paraméterek további variálásával még az vizsgálható, hogy az elért megoldás mennyire érzékeny a szerkezetválasztásra.

7. lépés: ha a szigetelési igény nem teljesül, vagy a választott megoldás a kivitelezési technológia vagy a költségek miatt kedvezőtlen, a paraméterek további variálásával lehet kedvezőbb megoldásokat találni.

9.5.4. A számított eredmények értékelése

A pontosságra az [I.12] szabvány nem ad útmutatást, tehát nem ismert az, hogy a számított eredménynek milyen mértékben kell meghaladnia a tervezési célt ahhoz, hogy a kivitelezés befejezését követő ellenőrző akusztikai mérés pozitív eredményt adjon. Célszerű a biztosan kézben tartható komponenseket túlméretezni, mert a szerelt szerkezetek kivitelezése során elég sok hibalehetőség adódik.

9.6. Helyiségek közötti lépéshangszigetelés méretezése a hazai szerkezetválaszték figyelembevételével [III.2]

9.6.1. A méretezés alapjai

A módszer nehéz szerkezetekből – falazott, öntött monolit, előre gyártott stb. – épületek helyiségei közötti helyszíni, szabványos lépéshangnyomásszint-meghatározási módját adja meg. A helyiségekben levő burkolat jellegű szerkezetek szerelt vagy nehéz szerkezetek lehetnek.

Az egyszerűsített közelítést tartalmazza, tehát nem a frekvencia függvényében számol, hanem egyadatos akusztikai mennyiségekkel dolgozik, ezek:

- a burkolatlan födém súlyozott szabványos lépéshangnyomásszintje, L_{nw1} (termékjellemző, katalógusadat);
- a padlóburkolat súlyozott szabványos lépéshangnyomásszint-csökkenése, ΔL_w (termékjellemző, katalógusadat, esetleg számítható is);
- a szerkezeti csomópontok elemei közötti rezgésebbesszint-különbségek frekvenciaátlag, a szerkezeti kapcsolatok geometriája miatt a födémhez képest, D_{vlf} ;
- a burkolatok – álmennyezet, álpadló, falburkolat, úszópadló – hanggátlásjavító hatása, ΔR_w (termékjellemző, katalógusadat, egyedi szerkezet esetén méretezhető a 4.8. alfejezet szerint);
- a szerkezetek sugárzási foka az átlagolás miatt a közelítésben 1.

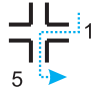
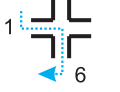
A további kiindulási adatok általában az engedélyezéstervezési szintű dokumentációból már leolvashatók, a dokumentáció rajzi része és a műszaki leírás megadja a szükséges anyagféléseket és méreteket.

9.6.2. A méretezési módszer elméleti alapja

I. Hangátviteli irányok

A helyiségek közötti lépéshangszigetelés méretezésének, azaz a helyszíni súlyozott, szabványos lépéshangnyomásszint meghatározásának elvi alapja a különböző szerkezeteken keresztül lejátszódó hangterjedés során a zaj ellen védendő helyiségbe átvitt akusztikai teljesítmény összegzése és kifejezése – a definíció miatt – korrigált hangnyomásszintben. A hangterjedés mechanizmusa testhang jellegű. A hangterjedési utakat a 9.19. ábra szemlélteti egy helyiségkapcsolat két lehetséges metszetén. A határolószerkezeteket számok jelölik. A példában 1 a két helyiséget elválasztó burkolatlan födém, a homlokzat a 3, 4, a belső falak az 5, 6, 11, 12, 13,

9.11. táblázat. Lépéshangterjedés során kialakuló hangterjedési utak összefoglalása a 9.19a ábrához

Hangátviteli irány	Csomópont azonosítása	Adóhelyiségben levő szerkezet	Vevőhelyiségben levő szerkezet
Közvetlen, D1		1 (födém) + padlóburkolat	1 (födém) + álmennyezet
T csomóponton keresztül		1 (födém) + padlóburkolat	3 (fal) + falburkolat
X1 csomóponton keresztül		1 (födém) + padlóburkolat	4 (fal) + falburkolat
X2 csomóponton keresztül		1 (födém) + padlóburkolat	5 (fal) + falburkolat
X3 csomóponton keresztül		1 (födém) + padlóburkolat	6 (fal) + falburkolat

1/4 szerkezetek. A födémre padlóburkolat kerül, ennek hatását a súlyozott szabványos lépéshangnyomásszint-csökkenés, ΔL_w fejezi ki. Bármelyik elemet, tehát a födém alulról, valamint a falakat is takarhatja a helyiségek felől olyan burkolat – falburkolat, álmennyezet, padlóburkolat –, amely a szerkezet hangszigetelését megváltoztatja. A burkolatok hangszigetelést javító hatásának jele $\Delta R_{w,j}$.

Az ábrán kalapácsszimbólum jelöli a vizsgálandó födémén működő kopogógépet, a felső helyiség a hagyományos elnevezés szerint az adóhelyiség, a hangforrást nem tartalmazó helyiség pedig a vevőhelyiség.

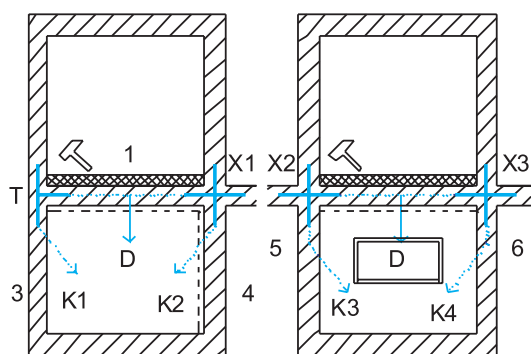
A födémén keresztül alakul ki a közvetlen hangátvitel, ez az ábrán D. A kerülő hangátviteli utak a

födém határoló szerkezeti kapcsolatokon, csomóvonalakon – a metszeteken csomópontokon – vezetnek keresztül. A homlokzatnál a csomópont T alakú, a többi falnál a példában a csomópont X alakú. Miután gerjesztés csak az 1 födémre éri, minden csomóponton csak egy hangterjedési út vezet át. A 9.11. táblázat a hangterjedési utakat foglalja össze.

Látható, hogy közvetlen hangterjedési út és négy kerülőút, összesen öt hangterjedési út alakul ki.

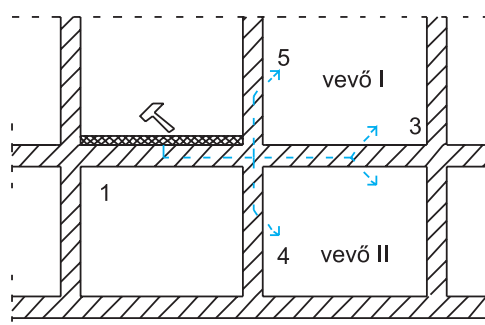
II. A hangátviteli utak súlyozott szabványos lépéshangnyomásszintje

A helyszíni léghanggátláshoz hasonlóan a helyszíni szabványos lépéshangnyomásszint meghatározása is azzal a szemlélettel történik, hogy az egyes



9.19a ábra. Épületrészlet metszetei a helyszíni, szabványos lépéshangnyomásszint meghatározásához

D közvetlen hangátviteli út; K1...K4 az átmenő szerkezeteken keresztülvezető hangátviteli utak



9.19b ábra. Épületrészlet metszete a helyszíni, szabványos lépéshangnyomásszint meghatározásához folyosó és helyiség között

D közvetlen hangátviteli út; K1...K4 kerülőút-as hangátviteli utak; T, X1...X3 szerkezeti csomópontok; 1...6 határoló szerkezetek sorszáma

hangterjedési utakhoz rendelhető szabványos lépéshangnyomásszintek hatását összegezni kell. Az egyes hangterjedési utak szabványos lépéshangnyomásszintje lényegében a vevőhelyiség egyenértékű hangelnyelési felülete alapján korrigált hangnyomásszint, és minden hangterjedési útra azonos korrekciót kell alkalmazni.

A kopogógép működése közben a vevőhelyiségben azért alakul ki hangnyomásszint, mert a kopogógép kalapácsai teljesítményt visznek be a födémszerkezetbe, az rezgésbe jön, tehát az alsó helyiségbe hangot sugároz. A burkolatlan födém rezgésbessége effektív értéke v_1 . Diffúz téri közelítést felhasználva a lesugárzott teljesítményből a lépéshangnyomás, p_1 , majd a szabványos lépéshangnyomás, p_{n1} , meghatározható. Az 1 index arra utal, hogy a hangot a födém sugározza. A (9.30) összefüggés e folyamatot fejezi ki, A a zaj ellen védendő helyiség egyenértékű hangelnyelési felülete, $A_0 = 10 \text{ m}^2$, a sugárzási fok értéke 1:

$$p_{n1}^2 = (\rho_0 \cdot c)^2 \cdot S_1 \cdot v_1^2 \cdot \frac{4}{A} \cdot \frac{A}{A_0}. \quad (9.30)$$

A j indexű határolófal által létrehozott szabványos lépéshangnyomás-összetevőt azonos alakú kifejezés adja meg, egyszerű átalakításokkal be lehet vezetni a burkolatlan födém szabványos lépéshangnyomása irányába mutató kapcsolatot:

$$p_{nj}^2 = (\rho_0 \cdot c)^2 \cdot S_j \cdot v_j^2 \cdot \frac{4}{A} \cdot \frac{A}{A_0} = p_{n1}^2 \cdot \frac{S_j}{S_1} \cdot \frac{v_j^2}{v_1^2}. \quad (9.31)$$

A padlóburkolat hatása minden hangátviteli irányon megjelenik. Az álmennyezet hatása, ΔR_{w1} csak a közvetlen hangátvitelt befolyásolja, a falburkolat, ΔR_{wj} pedig csak a azon a terjedési irányon hatásos, amelyhez tartozó falat takarja.

III. Az eredő szabványos lépéshangnyomásszint meghatározása

Az egyes hangterjedési utak hatásának eredője az inkoherens hangforrások eredő hangnyomásszintjének meghatározási módszere szerint fejezhető ki. Az eredmény:

$$L'_{nw} = L_{nw1} - \Delta L_w + 10 \cdot \lg \left(10^{-0,1 \cdot \Delta R_{w1}} + \sum_{j=2}^5 \frac{S_j}{S_1} \cdot 10^{-0,1(D_{v1j} + \Delta R_{wj})} \right), \quad (9.32)$$

ahol L_{nw1} a burkolatlan födém súlyozott, szabványos lépéshangnyomásszintje; ΔL_w a padlóburkolat súlyozott, szabványos lépéshangnyomásszint-csökkenése; ΔR_{w1} az álmennyezet súlyozott léghanggátlásiszám-javulása; S_1 a födém felülete; S_j a vevőhelyiség j indexű falának felülete; ΔR_{wj} a vevőhelyiség j indexű falára épített burkolat súlyozott léghanggátlásiszám-javulása; D_{v1j} a födém és a vevőhelyiség fala közötti átlagos rezgésbességszint-különbség. Ha egy szerkezetet nem takar burkolat, akkor $\Delta R_{wi} = 0$.

Azonos lépéseken keresztül határozható meg a helyszíni szabványos lépéshangnyomásszint akkor, ha a födém, amelyen a kopogógép működik, nem

határolja a vevőhelyiséget, Ilyen feladat pl. a folyosó, és az eltolt helyzetben alatta vagy mellette levő szoba közötti szabványos lépéshangnyomásszint kiszámítása. A szituáció vázlatát a 9.19b ábra mutatja. Az előző példához képest a legfontosabb különbség az, hogy nincs közvetlen hangterjedési út. A metszeten két olyan hangterjedési út azonosítható, amely a vevő I., ill. a vevő II. helyiségre vezet. A folyosó és a helyiségek ábrasíkra merőleges méreteitől függ, hogy az ábrasíkra merőleges metszeten látható hangterjedési utakat hogyan kell felvenni, lesz-e hatásuk vagy elhanyagolhatók.

A folyosó födémje és a vevő I. vagy vevő II. helyiség közötti szabványos lépéshangnyomásszint meghatározható:

$$L'_{nw} = L_{nw1} - \Delta L_w + 10 \cdot \lg \left(\sum_{j=1}^1 \frac{S_j}{S_1} \cdot 10^{-0,1(D_{v1j} + \Delta R_{wj})} \right) \quad (9.33)$$

ahol az L_{nw1} a folyosó burkolatlan födémének szabványos lépéshangnyomásszintje; ΔL_w az ezen levő padlóburkolat szabványos lépéshangnyomásszint-csökkenése; S_1 a folyosó födémfelülete a szobával megegyező merőleges méretben; S_j a vevőhelyiség egy falának vagy felső födémjének felülete; ΔR_{wj} a vevőhelyiség egy falára, padlójára vagy mennyezetére épített burkolat súlyozott léghanggátlásiszám-javulása; D_{v1j} a folyosófödém és a vevőhelyiség fala közötti átlagos rezgésbességszint-különbség.

A rezgésbességszint-különbség meghatározásának módja megegyezik az előző pontban ismertetett, ezért nem szükséges részletezni.

9.6.3. A méretezés lépései

A méretezés lépései követik a 9.1. ábra sorrendjét. A szerkezeti kötöttségek, amelyek az akusztikai minőség ellenőrzését megelőző munkarészek során alakulnak ki, jelen esetben is erősek. Végül is – részben a gyakorlati tapasztalatok alapján – a födém szerkezet kiválasztható úgy is, hogy a hangszigetelési igény egyszerűen teljesíthető legyen. Másrészt a gyakorlat ismer olyan szerkezeteket is, amelyekkel a szükséges minőség reális eszközökkel nem érhető el.

A méretezés során szabad paraméter a padlóburkolat kiválasztása. Azonban itt is érvényesülnek a kötöttségek: ha pl. a tervezendő épület méretei úgy alakultak ki, hogy nincs elegendő hely úszópadló betervezésére, akkor csak szőnyegpadlóra vagy pvc-burkolatra lehet gondolni. Ezek azonban szintén teljes értékűen leellenőrizhetők, ill. termékjellemzőjük kiválasztható.

9.6.4. A számított eredmények értékelése

Az ismeretek és tapasztalatok jelenlegi szintjén a hangszigetelési követelmények számításos ellenőrzésének eredményét a következők szerint kell értékelni:

- ha a számított eredmény nagyobb – a számított minőség rosszabb –, mint a tervezési cél, azaz a követelmény, akkor a szituáció biztosan nem lesz megfelelő;
- ha a számított eredmény legalább 2 dB-lel kisebb a követelménynél, akkor a szituáció biztosan megfelelő lesz;
- a fennmaradó 2 dB széles, bizonytalan értékelésű sávban részletes, frekvencia függvényében végzett számítás vagy analóg szituációkon végzett mérés és számítás eredményeinek összevetése szükséges.

9.7. Helyiségek közötti lépéshangszigetelés méretezése a [III.8] felhasználásával

9.7.1. A méretezés alapjai

A módszer nehéz szerkezetekből – falazott, öntött monolit, előre gyártott stb. – és szerelt szerkezetekből készült épületek helyiségei közötti helyszíni szabványos lépéshangnyomásszint-meghatározási módját adja meg a frekvencia függvényében (9.7.2.–9.7.4. pontok), valamint egyszerűsített módszert is ismertet (9.7.5 pont). A helyiségekben levő, burkolat jellegű szerkezetek szerelt vagy nehéz szerkezetek lehetnek. Az anyagban található egyszerűsített méretezési módszer homogén födémszerkezetek esetében alkalmazható.

A kiindulási akusztikai adatok:

- a burkolatlan födém szabványos lépéshangnyomásszintje, $L_{n,l}$, (termék jellemző, katalógusadat);
- a padlóburkolat szabványos lépéshangnyomásszint-csökkenése, ΔL_n ; az adat nehéz födémre épített burkolat lépéshangnyomásszint-csökkentő hatása, ezért könnyűszerkezetes födémekre nem használható (termékjellemző, katalógusadat);
- a szerkezeti csomópontok elemei közötti rezgés-csökkentési indexek, a kapcsolatok geometriája miatt mindig a födémhez képest, K_{lv} ;
- a burkolatok – álmennyezet, álpadló, falburkolat, úszópadló – hanggátlásjavító hatása, ΔR_j (termékjellemző, katalógusadat);
- a födém alatt levő, burkolat jellegű szerkezet, pl. álmennyezet szabványos lépéshangnyomásszint-

csökkenése, ΔL_d (termékjellemző, katalógusadat);

- a szerkezetek laboratóriumban mért szerkezeti utózengési ideje, $T_{is,lab}$ (termékjellemző, katalógusadat);
- ugyanezeknek a szerkezeteknek a helyszíni körülmények között kialakuló szerkezeti utózengési ideje, $T_{is,situ}$, amely tapasztalatok alapján megadott adatfelvételt jelent.

A szabvány homogén födémszerkezetekre és egyes úszópadlókra a fajlagos tömegek és az úsztartóréteg fajlagos dinamikai merevsége alapján termékjellemzőket is megad.

A további kiindulási adatok általában az engedélyezéstervezési szintű dokumentációból már leolvashatók, a dokumentáció rajzi része és a műszaki leírás megadja a szükséges anyagféléseket és méreteket.

9.7.2. A méretezési módszer elméleti alapja

I. Hangátviteli irányok

A szabvány keretei között megoldható alaprajz meg egyezik a korábban már ismertetett 9.19. ábrán látható alaprajzi elrendezéssel. A hangterjedési irányokat is a 9.19. ábra foglalta össze. A szabvány az egyes szerkezetek és hangterjedési utak azonosítására a [II.17]-ben található jelölési módot alkalmazza, az áttekinthetőség és összehasonlíthatóság érdekében azonban e pontban is a sorszámos jelölés szerepel.

Elvileg összetett alaprajzi elrendezések is megoldhatók – az egymás felett levő helyiségek alapterülete eltérő, nem fedik egymást –, azonban ezekre az anyag nem ad kellő útmutatást.

II. A hangátviteli utak súlyozott szabványos lépéshangnyomásszintje

A helyszíni léghanggátláshoz hasonlóan a helyszíni szabványos lépéshangnyomásszint meghatározása is azzal a szemlélettel történik, hogy az egyes hangterjedési utakhoz rendelhető, szabványos lépéshangnyomásszintek hatását összegezni kell, hiszen az egyes hangterjedési utak szabványos lépéshangnyomásszintje lényegében a vevőhelyiség egyenértékű hangelnyelési felülete alapján korrigált hangnyomásszint, és minden hangterjedési útra azonos korrekciót kell alkalmazni.

Általánosságban a födém helyszínen tapasztalható szabványos lépéshangnyomásszintje a laboratóriumban mérhető értéktől többi között a szerkezeti utózengési idők miatt is eltér. Ezért első lépés-

ben a földem laboratóriumban mérhető szabványos lépéshangnyomásszintjét, $L_{n1,lab}$ -ot a helyszíni adatra ($L_{n1,situ}$) kell kiszámítani:

$$L_{n1,situ} = L_{n1,lab} + 10 \cdot \lg \left(\frac{T_{1s,situ}}{T_{1s,lab}} \right). \quad (9.34)$$

A méretezési eljárás hasznosítja a léghanggátlás és a szabványos lépéshangnyomásszint közötti, a reciprocitás miatt fennálló kapcsolatot, a léghanggátlási szám helyszíni értékeit a (9.19) képlet segítségével kell a laboratóriumi értékből átszámítani.

A földemen átvető közvetlen hangterjedési útra, L_{nd} , a szabványos lépéshangnyomásszint értékét a (9.35) összefüggés mutatja meg. A padlóburkolat hatását nehéz, etalon földemre építve mérik (l. az 5.13. alfejezetet), ezért a (9.35) képletben tükröződő fizikai tartalom miatt a közelítés csak olyan szituációban alkalmazható, ahol a földem nehéz szerkezet:

$$L_{nd} = L_{n1,situ} - \Delta L_n - \Delta L_d. \quad (9.35)$$

A további hangterjedési utakhoz tartozó, szabványos lépéshangnyomásszint:

$$L_{n,1j} = L_{n1,situ} - \Delta L_n + \frac{R_{1,situ} - R_{j,situ}}{2} - \Delta R_j - \underline{D_{v,ij}} - 10 \cdot \lg \sqrt{\frac{S_1}{S_j}}. \quad (9.36)$$

Az irány szerint átlagolt rezgésebbesszintkülönbséget a szerkezeti csomópont „termékjellemzőjéből”, a rezgéscsökkentési tényezőjéből a korábbiak szerint a (9.26) összefüggés és a 9.8.–9.10. táblázatok alapján lehet kiszámítani.

III. Az eredő szabványos lépéshangnyomásszint meghatározása

Az eredő szabványos lépéshangnyomásszint értékét (L'_n) az inkoherens hangforrások által okozott eredő hangnyomásszint meghatározásával azonos módon lehet kifejezni, l. a (2.12) összefüggés fizikai tartalmát. A k index a hangterjedési utak számát jelöli, értéke a legegyszerűbb esetben 4, j egy tetszőleges hangterjedési út befejező elemének indexe:

$$L'_n = 10 \cdot \lg \left[10^{0,1 \cdot L_{nd}} + \sum_k 10^{0,1 \cdot L_{n1,j}} \right]. \quad (9.37)$$

9.7.3. A méretezés lépései

A méretezés lépései követik a 9.1. ábra sorrendjét. A szerkezeti kötöttségek, amelyek az akusztikai minőség ellenőrzését megelőző munkarészek során alakulnak ki, a jelen esetben is erősek. Végül is –

részben a gyakorlati tapasztalatok alapján – a földem szerkezet kiválasztható úgy is, hogy a hangszigetelési igény egyszerűen teljesíthető legyen. Másrészt a gyakorlat ismer olyan szerkezeteket is, amelyekkel a szükséges minőség reális eszközökkel – reális vastagságú padlóburkolatokkal – nem érhető el.

A méretezés során szabad paraméter a padlóburkolat kiválasztása. Azonban itt is érvényesülnek a kötöttségek: ha pl. a tervezendő épület méretei úgy alakultak ki, hogy nincs elegendő hely úszópadló betervezésére, akkor csak kis vastagságú szerkezetre, pl. szőnyegpadlóra, pvc-burkolatra, szárazesetrichre stb. lehet gondolni. Ezek azonban szintén teljes értékűen ellenőrizhetők, ill. termékjellemzőjük kiválasztható.

9.7.4. A számított eredmények értékelése

Az ismeretek és tapasztalatok jelenlegi szintjén a lépéshang-szigetelési követelmények számításos ellenőrzésének eredményét a hivatkozott szabvány úgy értékeli, hogy a számított eredményből meghatározott, súlyozott, helyszíni szabványos lépéshangnyomásszint 2 dB szórással a helyes eredményt adja meg.

9.7.5. Egyszerűsített becslés helyszíni, szabványos lépéshangnyomásszint meghatározására

A hivatkozott szabvány által megadott egyszerűsített módszer a 9.19a ábrának megfelelő alaprajzi elrendezésben általános esetben akkor alkalmazható, ha az egymás felett levő helyiségek alapterülete azonos, teljes mértékben, minden szerkezetre fedik egymást, a földem és a kerülőutas hangterjedést létrehozó falak homogén belső felépítésű, nehéz szerkezetek. A helyszíni, súlyozott, szabványos lépéshangnyomásszint:

$$L'_{nw} = L_{nweq} - \Delta L_w + K, \quad (9.38)$$

ahol L_{nweq} a burkolatlan földem egyenértékű súlyozott szabványos lépéshangnyomásszintje; ΔL_w a padlóburkolat súlyozott szabványos lépéshangnyomásszint-csökkenése, l. a 5.13. és 5.15. alfejezetet; K pedig a kerülőutas hangterjedés miatt keletkező korrekciós tényező, értékei a 9.12. táblázatban találhatók.

Homogén földemszerkezete súlyozott egyenértékű szabványos lépéshangnyomásszintje a (9.39) képlet alapján határozható meg, m'' a szerkezet fajlagos tömege.

$$L_{n,weq} = 164 - 35 \cdot \lg \left(\frac{m''}{1 \text{ kg/m}^2} \right). \quad (9.39)$$

9.12. táblázat. A K korrekciós tényező értékei

Födém fajlagos tömege, kg/m ²	Az átmenő falak átlagos fajlagos tömege, kg/m ²								
	100	150	200	250	300	350	400	450	500
100	1	0	0	0	0	0	0	0	0
150	1	1	0	0	0	0	0	0	0
200	2	1	1	0	0	0	0	0	0
250	2	1	1	1	0	0	0	0	0
300	3	2	1	1	1	0	0	0	0
350	3	2	1	1	1	1	0	0	0
400	4	2	2	1	1	1	1	0	0
450	4	3	2	2	1	1	1	1	1
500	4	3	2	2	1	1	1	1	1
600	5	4	3	2	2	1	1	1	1
700	5	4	3	3	2	2	1	1	1
800	6	4	4	3	2	2	2	1	1
900	6	5	4	3	3	2	2	2	2

Az egyszerűsített számítás pontosságát az anyag nem a követelmény teljesülése ellenőrzésének bizonytalanságaként fogalmazza meg. A pontosságra általában azt a tapasztalatot ismerteti, hogy a becsült eredmények 60%-a a méréssel meghatározott eredmény ± 2 dB-es környezetében, 100%-a pedig a méréssel meghatározott eredmény ± 4 dB-es környezetében helyezkedik el.

9.8. Becslés födém szerkezet helyszíni súlyozott, szabványos lépéshangnyomásszintjének meghatározására

Az [I.12] és [I.15] értelemszerű alkalmazása egyszerű becslés lehetőségét teremti meg födém szerkezetek helyszíni, súlyozott, szabványos lépéshangnyomásszintjének kiszámítására. A becslés a tervezési fázisban jó alkalmazható, különösen a padlóburkolatok kiválasztása céljából.

Az alkalmazási eset a 9.19a ábrának felel meg. A födém szerkezet nehéz, tömör, laboratóriumban mért súlyozott, szabványos lépéshangnyomásszintje ismert, L_{nw} . A falak és átmenő szerkezetek nehéz, homogén szerkezetek A födémre kerülő padlóburkolat súlyozott, szabványos lépéshangnyomásszintje, ΔL_w ismert vagy becsült. A becslés szerint a födém szerkezet helyszíni, súlyozott, szabványos lépéshangnyomásszintje, L'_{nw} :

$$L'_{nw} = L_{nw} - \Delta L_w + 3. \quad (9.40)$$

Az összefüggés fizikai tartalma azt jelenti, hogy az összes kerülőutas hangterjedés hatása azonos a burkolt födémre keresztül létrejövő hangterjedés-

sel, így a helyszíni súlyozott, szabványos lépéshangnyomásszint az inkoherens hangforrások eredő hangnyomásszintjének meghatározási szabálya alapján 3 dB-lel lesz nagyobb, mint a közvetlen összetevő. E becslés pontosságát a hivatkozott szabványok nem ismertetik, tapasztalatok szerint a becslés a szerkezet választás szempontjából homogén épületszerkezetekből álló helyszínre biztonsággal alkalmazható. Ha a födém szerelt jelegű vagy könnyű, üreges szerkezet, akkor a becslés félrevezető eredményt ad.

9.9. Vízellátási berendezések típusának kiválasztása a szerelvényzaj alapján az [I.12], [IV.2], [IV.11] szerint

9.9.1. A feladat értelmezése

A vízellátási berendezések működésük során keltenek hangot, nemcsak abban a helyiségben, ahol a szerelvény működik, hanem a szomszédos helyiségekben is. A szerelvények, a keresztmetszet-változások rezgésforrásként működnek, a keltett rezgés a cső falában és a vízben egyaránt terjed. Az a határoló szerkezet, amelyhez a szerelvényt vagy a csővezetéket rögzítették, szintén rezegni kezd, e rezgés a határoló szerkezet síkjára merőleges összetevővel rendelkezik, tehát létrejön a hangszórás jelensége (l. az 5.17. alfejezetet). A számszerűen adott tervezési cél a zajterhelési határérték, amelyet a 7.2.5. pont ismertetett. Ennek alapján a feladat olyan telepítési megoldások, ill. szerelvénytípusok kiválasztása, amelyek a zajhatárérték betartását kellő biztonsággal megoldják.

A hazai zajhatárérték-rendszer az egyenértékű A hangnyomásszintből indul ki. A gépészeti eredetű zajokra, különösen a szakaszosan működő berendezések által keltett zajokra sem a követelmény, sem a vizsgálati módszer nem adja meg azt, hogy a méretezés során milyen hosszú idejű működést kell figyelembe venni. A mértékadó európai követelmény-előírások a szerelvények folyamatos működése alatt keletkező A hangnyomásszintet, pontosabban a folyamatos működés vagy egy működési ciklus alatt keletkező egyenértékű A hangnyomásszintet és csúcsértéket korlátozzák. Csekély elvi alátámasztással ezt az értelmezést célszerű alkalmazni.

A zaj ellen védendő helyiség mindig szoba, irodai helyiség, tanterem stb., sohasem fürdőszoba, konyha. Ezért a feladat megoldása során az alaprajzi elrendezést szintén figyelembe kell venni.

A hazai és nemzetközi gyakorlatban általánosan használható, zárt alakú méretezési módszer még nem alakult ki, ezért a feladat megoldása az ismeretek jelenlegi szintjén alapvetően empirikus jellegű, megfelelő és nemmegfelelő esetek kiválasztása. Néhány világos tendencia jellegű összefüggés szintén segíti a megoldást. Természetesen a szakértői gyakorlatban a korrekt megoldások elérésének lehetőségei megvannak.

A szerelvények működése során az elfolyó víz szintén hangot kelt – a kádba, mosdókagylóba stb. befolyó és onnan kifolyó víz – az e folyamatok által keltett zaj meghatározására a jelenlegi ismeretek alapvetően két megoldást ajánlanak:

- laboratóriumi körülmények között kipróbált igényes hangszigetelési megoldásokat;
- olyan alaprajzi elrendezéseket, ahol a vízellátási berendezések és a csővezetékek nem szomszédosak a zaj ellen védendő helyiséggel.

9.9.2. A zajkeltés néhány sajátossága

A csővezetékbeli és kifolyószerelvényekből álló rendszer működése által a szomszédos helyiségekben keltett zaj a következőkben felsorolt sajátosságokkal rendelkezik. E sajátosságok a zajcsökkentés méretezésekor hasznos útmutatást adnak.

- I. Bármely szerelvény A hangnyomásszintje függ a szerelvénynél mérhető víznyomástól, p_1 , p_2 , ha a többi paraméter (csőhálózat és rögzítése, vízmennyiség, falvastagság, stb.) állandó és a szerelvény is azonos [IV.2]:

$$L_{ap,p1} - L_{ap,p2} = 20 \cdot \lg \left(\frac{p_1}{p_2} \right). \quad (9.41)$$

- II. Bármely szerelvény A hangnyomásszintje függ a kiáramló víz V_1 , V_2 térfogatsebességétől, ha a többi paraméter állandó, és a szerelvény is azonos [IV.2]:

$$L_{ap,V1} - L_{ap,V2} = 40 \cdot \lg \left(\frac{V_1}{V_2} \right) \quad (9.42)$$

- III. Bármely szerelvény A hangnyomásszintje függ annak a falnak az m'' fajlagos tömegétől, amelyhez a szerelvényt erősítik, ill. amelyben a csővezeték fut, ha a többi paraméter nem változik és a szerelvény is azonos; az I. szerelvényosztályra a (9.43a), II. szerelvényosztályra a (9.43b) összefüggés vonatkozik, névleges üzemelési körülmények között (a szerelvényosztályokat az 5.4. táblázat foglalta össze):

$$L_{ap} = 30 - 20 \cdot \lg \left(\frac{m''}{220 \text{ kg/m}^2} \right); \quad (9.43a)$$

$$L_{ap} = 40 - 20 \cdot \lg \left(\frac{m''}{220 \text{ kg/m}^2} \right). \quad (9.43b)$$

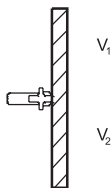
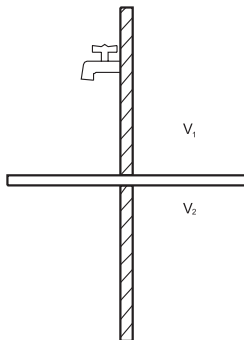
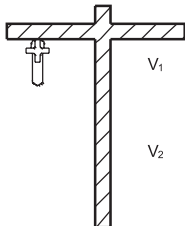
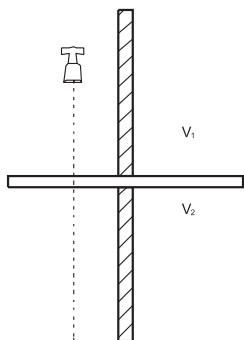
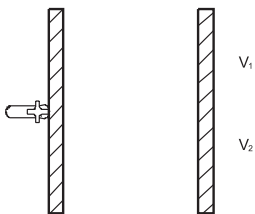
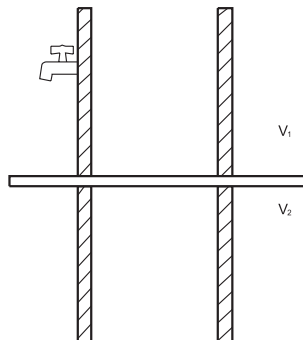
9.9.3. A szerelvények alkalmazhatósága a szerelvény A hangnyomásszint-kategóriái alapján [I.12], [IV.11], [IV.2]

A jelenlegi ismeretek szintjén a szerelvények helyszíni zajának csökkentése érdekében az írható elő, hogy különböző, jellegzetes alaprajzi elrendezésekben milyen minőségi kategóriába eső szerelvényeket lehet alkalmazni. Az alkalmazás természetesen a tervezési céltól, tehát a zajhatárértékektől is függ, ezeket a 9.13. táblázat foglalja össze. A zajhatárérték nemcsak a kifolyó víz zaját, hanem a gyűjtőedénybe (kád, mosdókagyló stb.) befolyó víz és a csatornán elfolyó víz zaját is korlátozza. Az alkalmazási lehetőségeket bemutató 9.14. táblázatban annak a falnak, amelyhez a szerelvényt rögzítik és amelyben a cső halad, a fajlagos tömege 220 kg/m^2 . Az egyéb működtetési körülményeket (víznyomás, vízmennyiség stb.) egyik hivatkozott anyag sem adja meg. Az ábrákon V_1 , V_2 jelöli a zaj ellen védendő helyiségeket,

9.13. táblázat. Tervezési cél (zajhatárérték) vízellátási berendezések által keltett zajra az [I.11] szerint

A vízellátási berendezés folyamatos működése által keltett zaj L_A értéke, dB	
lakó- és hálószo	oktatási és munka célú helyiség (kivéve nagy teres irodákat)
35	35

9.14. táblázat. Szerelvények alkalmazhatósága a szerelvény A hangnyomásszint-kategóriája alapján [I.11], [IV.2]

Alaprajz	Metszet	Szerelvénykategória (l. az 5.17. alfejezetet)
		I.
		II.
		II.

v a zaj ellen védendő helyiségek elhelyezkedése.

a csap és cső jelkép pedig a szerelvény és csővezeték helyét.

A 9.14. táblázat első sorában található ábrák azt fejezik ki, hogy ha lakó- vagy hálószoza és fürdőszoba közös falában vízcső halad, és a kifolyószerelvény e falra van erősítve, akkor a szerelvény akusztikai minősége a I. lehet. Ha azonban a lakó- vagy hálószozával szomszédos fürdőszobában a szerelvények nem a közös falban haladnak, és a szerelvények nem a közös falra vannak erősítve, akkor a szerelvény II. minőségi osztályú is lehet. Hasonlóképpen alkalmazható II. minőségű szerelvény

akkor, ha a zajforrást tartalmazó falszerkezet és a zaj ellen védendő helyiség között egy további helyiség is található.

9.9.4. A folyamat további elemeinek zajcsökkentése

A jelenlegi ismeretek szintjén minőségileg számos egyéb elem és folyamat zajkeltése ismert, nincs azonban általános méretezési módszer, és nincsenek az általános kivitelezési gyakorlatban megbízhatóan kipróbált kiszajú megoldások (szerelvény-

rögzítésre, kádrögzítésre stb.). A nemzetközi környezetben 1:1 méretarányú laboratóriumi kísérletek nyújtanak felvilágosítást eredményes hangszigetelési részletekről. Ezek az igényesebb szerkezeti részletek azonban csak az előnytelen alaprajzi elrendezések miatt válnak szükségessé. Az előnyös alaprajzi elrendezések megoldásához nem szükséges speciális akusztikai szigetelés.

9.9.5. Előnyös alaprajzi elrendezések a vízellátási berendezések okozta zaj szempontjából

Azokat az alaprajzi elrendezéseket lehet előnyösnek tekinteni, ahol a csővezetékek és szerelvények nem a zaj ellen védendő helyiségek határolófalában futnak, ill. nem ahhoz vannak erősítve. A 9.20.–9.21. ábra erre mutatnak példát. Az elv egyszerűen alkalmazható általánosan is.

A 9.20 ábrán a többlakásos lakóépület általános emeleti metszetének részlete látható. A lakóhelyiségek zaj elleni védelme szempontjából két határozott előnye van:

- a lakóépületekben a lépcsőház, közlekedőterület zajos területnek számít, a fürdőszoba, konyha szigetelési igénye kisebb, mint a szobáké, tehát az igényes helyiségeket közbenső helyiségek választják el a zajos területektől;
- a vízvezetékek és szerelvények a fürdőszoba és konyha közös falában haladnak, így a lakóhelyiségek falára szerelvény, csővezeték nem kerül.

- A szimmetrikus alaprajzi elrendezés miatt azonos igényű helyiségek kerülnek egymás mellé.

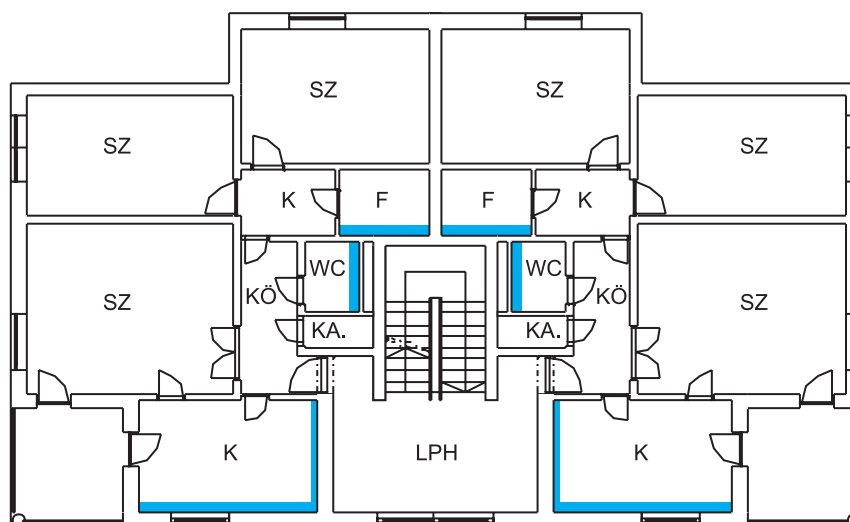
9.10. Üzemi létesítmények zajkibocsátása

9.10.1. A méretezés tárgya és keretei

Az akusztikai tervezés egyik részfeladata annak megakadályozása, hogy a helyiségekben a használat, a berendezések működése következtében kialakuló hang kijusson a külső környezetbe. Lakó- vagy középület gépházai – pl. szellőző gépház, kazánház –, az ott elhelyezkedő szórakoztató, kereskedelmi létesítmények, szabadon álló vagy zárt sorban lévő üzemi létesítmények jelentik a gyakori példákat.

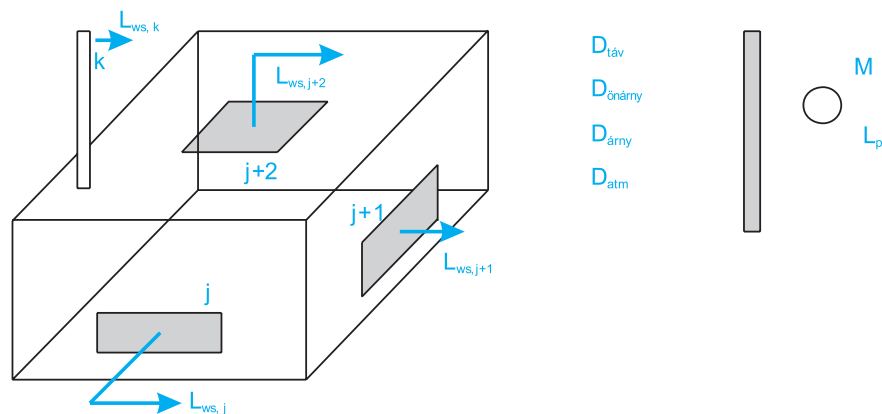
A zajforrások részben a helyiségekben, részben a külső térben működnek. Akusztikai teljesítményük egyes esetekben adott. Máskor a helyiségben kialakuló átlagos hangnyomásszint lehet a kiindulási adat. A helyiségben a hangtér diffúz vagy vegyes jellegű lehet. A környezetbe hangot sugárzó határolószerkezet léghanggátlása ismert vagy becsülhető. A helyiség felőli oldalát hangelnyelő burkolat takarhatja. A határolószerkezeten akusztikai szempontból takaratlan vagy hangtompítóval lezárt nyílások lehetnek.

A külső környezetben, a zaj ellen védendő terület felől egyes példákban rálátni a hangot sugárzó határolószerkezetekre, más esetben azonban a hangforrást tartalmazó épület saját maga árnyékolja a határolószerkezeteket.



9.20. ábra. Fürdőszoba, konyha és vízellátási szerelvények előnyös alaprajzi elhelyezése

A kék vonallal kiemelt határolószerkezetekre célszerű a vízellátási szerelvényeket elhelyezni a lakószobák szerelvényzaj elleni védelme szempontjából. SZ szoba; F fürdőszoba; WC wc; K konyha



9.21. ábra. Környezetbe hangot sugárzó létesítmény vázlata

j határoló szerkezet sorszáma; k épületen kívül működő hangforrás sorszáma; L_{wk} , L_{wj} hangforrás, vagy határolószerkezet által elsugárzott akusztikai teljesítmény; $D_{táv}$ távolsági csillapítás; $D_{önárvy}$ az épület önárnyékoló hatása miatti csillapítás; $D_{árny}$ árnyékolási csillapítás; D_{atm} atmoszférikus csillapítás; M megfigyelési pont, L_p a megfigyelési pontban kialakuló hangnyomásszint

Az épületléptékű tervezési feladatokban a környezetbe hangot sugárzó szerkezetek és a zaj ellen védendő területek közötti távolság nem ritkán 10 m-nél is kevesebb. Az áttekintésben ezért csak azok a tényezők szerepelnek, amelyek a mintegy 50 m-es környezeti távolságig meghatározó fontosságúak.

A részfeladat megoldását segítő méretezési módszerek [III.1], [III.9] a helyiségekből a környezetbe kijutó hang számításos meghatározását teszik lehetővé. Bár önállóan, időben is egymástól távol jelentek meg, egymást kiegészítve célszerű alkalmazni őket.

A kiindulási adatok a következők:

- a helyiségben kialakuló térbeli átlagos sávhangnyomásszint és A hangnyomásszint L_p , L_A vagy a hangot sugárzó határolószerkezet előtt a helyiségben kialakuló sávhangnyomásszint és A hangnyomásszint, L_p^* , L_A^* (normatív jellegű, mérésből származó vagy tapasztalati adat vagy a hangforrások akusztikai teljesítménye és a tér jellemzői alapján számított hangnyomásszint);
- a határolószerkezetek helyszíni léghanggátlási száma, súlyozott léghanggátlási száma és szinképpillesztési tényezője, R' , $R'_{w'}$, C (helyszíni értékek, termékjellemzők, katalógusadatok);
- a helyiség határolószerkezetein levő nyílásokat lezáró hangtompítók beiktatási csillapítása, D_{in} , és annak súlyozott értéke, D_{inw} (helyszíni érték, termékjellemző, katalógusadat);
- nem meghatározott felületű elemek szabványos hangnyomásszint-különbsége és annak súlyozott értéke, D_n , D_{nw} (helyszíni érték, termékjellemző, katalógusadat);

- méret- és távolságadatok, a különböző léptékű tervekről és a helyszínrajzról olvashatók le.

A méretezés célja a környezeti zajhatárértékek betartása, amelyeket a 7. fejezet ismertetett.

9.10.2. A méretezési módszer elvi alapjai

1. A feladat fizikai tartalma

A méretezési feladat vázlatát példaként a 9.21. ábra foglalja össze. Az ábrán M jelöli a mérési-megítélési pontot, amelyen kialakuló L_p hangnyomásszintet meg kell határozni. Az L_p hangnyomásszint az egyes hangforrásoktól származó L_{pj} hangnyomásszint-összetevők eredője, mert a hangforrásokat inkohherensnek tekintjük, l. a (2.12) összefüggést. A példa kedvéért három, eltérő térbeli helyzetű határolószerkezet sugároz hangot a környezetbe. A határolószerkezetek által elsugárzott akusztikai teljesítményt L_{wj} jelöli, j a szerkezetek indexe. Ezenkívül további hangforrás is szerepel, pl. egy kültéri nyílással rendelkező gép. A hangforrás indexe k , akusztikai teljesítménye L_{wk} . A számítás azon alapul, hogy a lesugárzott hangteljesítmény szintje és a mérési pontban kialakuló hangnyomásszint közötti kapcsolatot létrehozó $D_{táv}$ távolsági csillapítást, a (2.7) összefüggés fizikai tartalmához képest új elemként megjelenő, a hangot sugárzó épület által okozott önárnyékolást, $D_{önárvy}$ a térszög szerinti korrekciót $D\Omega$, valamint a már a (2.7) összefüggésben is szerepelt és a 2. fejezetben áttekintett árnyékolási, atmoszférikus és meteorológiai csillapítást elsődleges adatokból ki lehet számítani.

A kültéri hangterjedés általános gondolati sémáját a következő összefüggés fejezi ki, amely fi-

zikai tartalmát tekintve megfelel a (2.7) összefüggésnek:

$$L_{pj} = L_{wj} - D_{táv} - D_{\Omega} - D_{önárvy} - D_{árny} - D_{atm} - D_{met}. \quad (9.44)$$

A további részletek az árnyékolási csillapítás és atmoszferikus csillapítás sajátosságait nem ismétlik, a meteorológiai hatások, a növényzet hatása és további tényezők inkább a nagyobb terjedési távolságoknál jelennek meg (l. a 2.3. alfejezetet).

II. A határolószervezetek által lesugárzott akusztikai teljesítmény kiszámítása

A [III.1] irányelv a helyiségekben diffúz hangteret tételez fel, így a j indexű, S_j felületű határolószervezet által lesugárzott L_{wsj} akusztikai teljesítményszintet frekvenciasávokban a (9.44) képlettel kell meghatározni. Az összefüggés részben az (5.19) képlet kifejezése szintekben, részben a léghanggátlási szám definícióján alapul, l. az (5.18) összefüggést. Az A hangnyomásszinthez szükséges biztonsági tényező a [III.1] szerint 2 dB, így a lesugárzott A hangteljesítményszint, L_{AWS} a (9.45) összefüggés szerint alakul. A határolószervezet hanggátlása mindig helyszíni érték:

$$L_{wsj} = L_p + 10 \cdot \lg \left(\frac{S_j}{1 \text{ m}^2} \right) - R'_j - 6 \quad (9.44)$$

$$L_{AWSj} = L_A + 10 \cdot \lg \left(\frac{S_j}{1 \text{ m}^2} \right) - R'_{wj} - 4. \quad (9.45)$$

A [III.9] szabvány a hangot sugárzó határolószervezet akusztikai terhelését nem térbeli átlagos hangnyomásszintként, hanem a határolószervezet belső oldalán, attól 1–2 m távolságban mérhető, számítható hangnyomásszintként értelmezi. A lesugárzott akusztikai teljesítményt frekvenciasávonként kell meghatározni a (9.46) összefüggés szerint. A C_d diffuzitási tényező a helyiség akusztikai viszonyait tükrözi, l. a 9.15. táblázatot. A (9.46) képlet a lesugárzott akusztikai teljesítményt egy tetszőleges frekvenciasávban fejezi ki:

$$L_{wsj} = L_p^* + 10 \cdot \lg \left(\frac{S_j}{1 \text{ m}^2} \right) - R'_j + C_d. \quad (9.46)$$

Ha a hangot sugárzó felületrész szabad nyílás, akkor a lesugárzott teljesítmény $R=0$ helyettesítéssel számítható. Ha a szabad nyílásra hangtompítót építenek, amelynek beiktatási csillapítása D_{in} , akkor a helyettesítés $R=D_{in}$. Ha egy határolószervezet hangszigetelését a szabványos hangnyomásszint-

9.15. táblázat. Diffuzitási tényező

A helyiség akusztikai jellemzői	C_d , dB
Kisméretű, kubusos helyiség (diffúz helyiség), a hangot sugárzó határolószervezet kemény felületű	–6
Kisméretű, kubusos helyiség (diffúz helyiség), a hangot sugárzó határolószervezet hangelnyelő tulajdonságú	–3
Nagyméretű lapos vagy hosszú helyiség sok hangforrással, a hangot sugárzó határolószervezet kemény felületű	–5
Ipari épület helyisége néhány domináns irányított hangforrással, a hangot sugárzó határolószervezet kemény felületű	–3
Ipari épület helyisége néhány domináns irányított hangforrással, a hangot sugárzó határolószervezet hangelnyelő tulajdonságú	0

különbséggel fejezik ki, akkor az átszámítás az (5.26) képlettel történhet.

A [III.9] szabvány is megengedi az egyadatos mennyiségekkel végzett közelítő számítást, ekkor a határolószervezet hangszigetelési jellemzője a 9.2. alfejezetben foglaltakkal összhangban a súlyozott léghanggátlási szám és a szinképillesztési tényező összege. Természetesen nem C_{tr} -t, hanem C -t kell alkalmazni. A helyiség azonban a szabvány keretei között a közelítő számításokban diffúz hangterű:

$$L_{AWSj} = L_p^* + 10 \cdot \lg \left(\frac{S_j}{1 \text{ m}^2} \right) - (R'_{wj} + C_j) - 6. \quad (9.47)$$

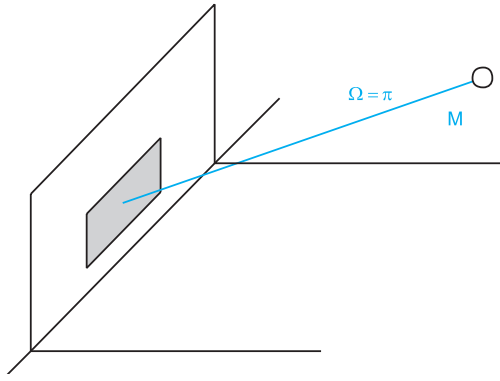
III. Távolsági csillapítás megadása

A [III.1] szerint a távolsági csillapítás kiindulási értéke, ha a hangforrás – pl. a hangot sugárzó határolószervezet – π térszöget lát, a sugárzó szerkezet középpontja és a mérési, megfigyelési pont közötti térbeli távolság d_{ter} . A π térszöget sugárzó határolószervezet egy tipikus elrendezését a 9.22. ábra mutatja:

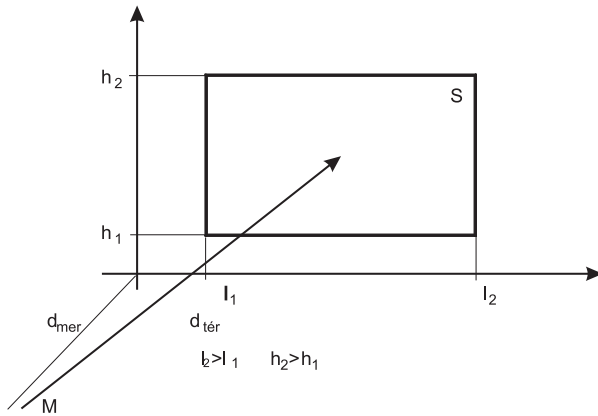
$$D_{táv} = 10 \cdot \lg(\pi \cdot d_{ter}^2). \quad (9.48)$$

A számítás alkalmazásának az a feltétele, hogy a felület legnagyobb lineáris mérete – téglalap esetén a lapátló – kisebb, mint a térbeli távolság. Ha ez a feltétel nem teljesül, akkor a sugárzó felületet részfelületekre kell osztani.

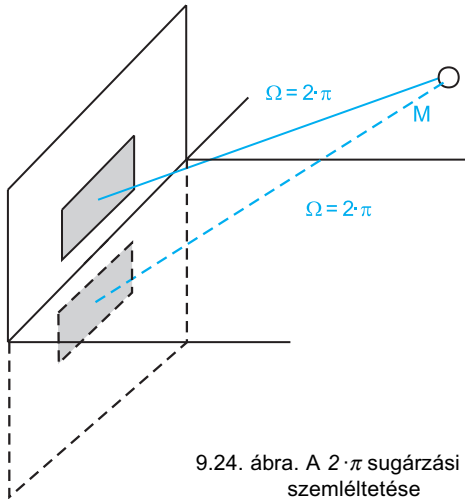
A [III.9] szerint a távolsági csillapítás általános összefüggése (9.49) szerint alakul, az ehhez tartozó elrendezést a 9.23. ábra mutatja. A vízszintes irányban a méret l_1 és l_2 , $l_2 > l_1$, a függőleges irányú méret h_1 és h_2 , $h_2 > h_1$. A hangot sugárzó felületek és a mérési pont közötti távolságot d_{mer} jelöli, a felület nagysága S . Ha az M megfigyelési pontnak a



9.22. ábra. π térszögbe sugárzó határolószervezet tipikus elrendezése



9.23. ábra. Hangot sugárzó szerkezet elrendezése a [III.9] szabványhoz



9.24. ábra. A $2 \cdot \pi$ sugárzási szög szemléltetése

határolószervezetet tartalmazó síkra vonatkozó vetülete, M' kívül esik a H sávon, akkor a képletbe h_l negatív értékét kell helyettesíteni. Hasonlóképpen l_l negatív lesz, ha a vetület az L sávon kívül lesik:

$$D_{\text{áv}} = 10 \cdot \lg \left(\frac{1 \text{ m}^2}{\pi \cdot S} \cdot \left[\arctg \frac{l_l}{d_{\text{mer}}} + \arctg \frac{l_2}{d_{\text{mer}}} \right] \cdot \left[\arctg \frac{h_l}{d_{\text{mer}}} + \arctg \frac{h_2}{d_{\text{mer}}} \right] \right) \quad (9.49)$$

IV. A térszög szerinti korrekció

Ha a hangot sugárzó felület sugárzási térszöge eltér π -től, értéke Ω , akkor ezt [III.9] a D_{Ω} korrekcióval veszi figyelembe. Ezt a [III.1]-hez is lehet alkalmazni:

$$D_{\Omega} = 10 \cdot \lg \left(\frac{\Omega}{\pi} \right) \quad (9.50)$$

A térszög értelmezését a 9.24. ábra segíti, ahol a határolószervezet sugárzási térszöge $2 \cdot \pi$, viszont itt a talajról történő hangvisszaverődést is számításba kell venni.

V. Hangvisszaverődések hatása

A 9.24. ábra példája a hangforrás tükrözésének megoldását mutatja be akkor, ha a határolószervezet a hangforrás. Az általános megoldásnak ezzel az elemével egyik hivatkozott anyag sem foglalkozik külön, a 2.2.7. pontban ismertetetteket kell alkalmazni.

VI. Önárnyékolás

A hangot sugárzó szerkezetek és megfigyelési pontok kölcsönös helyzete olyan is lehet, ahol a megfigyelési pont felől a hangot sugárzó szerkezet nem látható, mert az épület saját maga takarja. Az önárnyékolás hatását a [III.1] irányelv az A szintekben végzendő számításhoz egy-egy adattal adja meg a kölcsönös helyzet függvényében. A 9.25. ábra függőleges síkú sugárzó szerkezet, a 9.26. ábra pedig vízszintes síkú sugárzó szerkezet, és a megfigyelési pont alapján ismerteti az önárnyékolás miatt keletkező többletszabályozást.

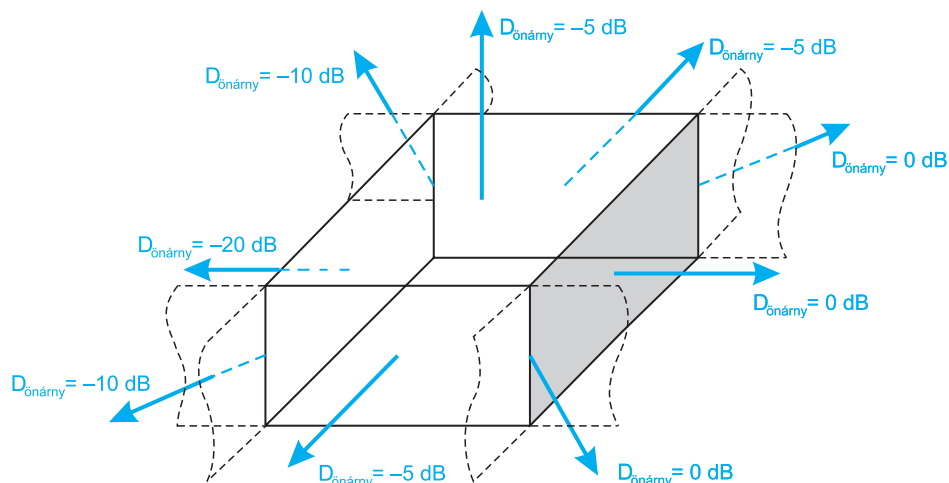
VII. Kültérbe hangot közvetlenül sugárzó hangforrás hangnyomásának meghatározása

A gyakorlatban megoldandó példákban gépek közvetlenül is sugároznak hangot a kültérbe. Ezen összetevő megoldását a 2.2.6. és 2.2.7. pontok alapján kell elvégezni.

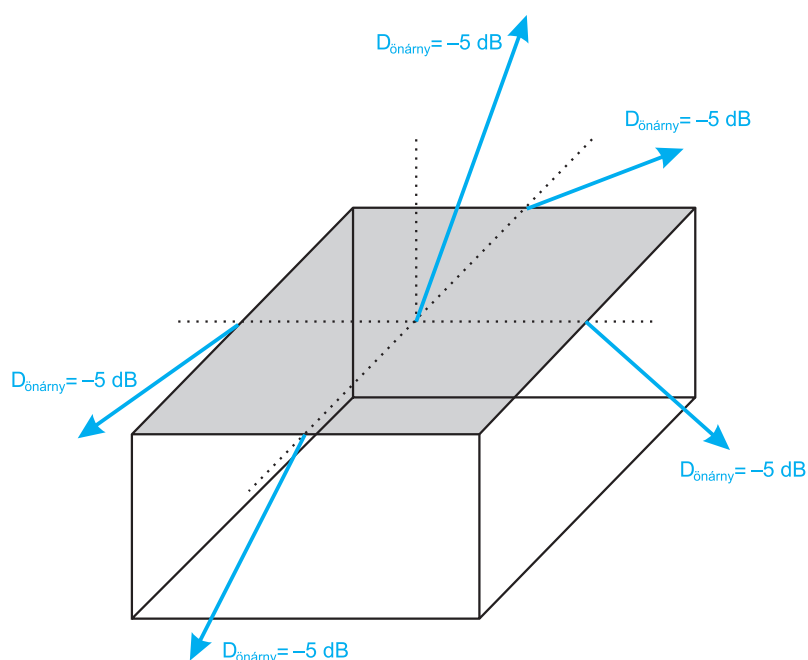
VIII. Az eredő hangnyomásszint

Az eredő hangnyomásszint, L_{er} a már említett inkoherens hangforrásoktól származó hangnyomásszint-komponensek energiaalapú összegzésével határozható meg, l. a (2.12) összefüggést. A j indexű összetevők határolófelületektől, a k indexű összetevők pedig közvetlenül a kültérbe sugárzó gépektől származnak:

$$L_{er} = 10 \cdot \lg \left(\sum_j 10^{0,1 \cdot L_{pj}} + \sum_k 10^{0,1 \cdot L_{pk}} \right) \quad (9.51)$$



9.25. ábra. Önárnyékolás miatt keletkező többletszillapítás
A sugárzó felület szürke színnel jelölt



9.26. ábra. Önárnyékolás miatt keletkező többletszillapítás
A sugárzó felület szürke színnel jelölt

Az eredő számítás az A hangnyomásszintekkel közvetlenül is elvégezhető.

9.10.3. A méretezés lépései

A méretezést a 9.1. ábra lépései szerint célszerű elvégezni. A visszacsatoló ág nemcsak a szerkezet választásánál játszhat fontos szerepet, hanem már a hangot sugárzó felületek és a megfigyelési pontok kölcsönös helyzetének kiválasztása során is. A kültér-ben működő gépek és a megfigyelési pont kölcsönös helyzete is fontos szerepet játszik.

9.10.4. A számított eredmények értékelése

A számított eredményt elvileg akkor lehet megfelelőnek értékelni, ha értéke a környezeti zajhatárértéknél, tervezési célnál kisebb. Azonban egyik hivatkozott eljárás sem adja meg az eljárás pontosságát. Így nincs általános utalás arra, hogy a számított eredménynek mennyivel kell a határérték alatt lennie ahhoz, hogy a gyakorlatban elvégzendő mérés a számítással azonos következtetésre vezessen. A bizonytalanságnak sok forrása van, a teljesség igénye nélkül néhány elem:

- a határolószerkezetek helyszíni léghanggátlási száma és az ismert pontosságú laboratóriumi mérésből kiszámított léghanggátlási szám közötti kapcsolat csak becsült, szerelt szerkezetek esetében a kivitelezés minősége is jelentős mértékben befolyásolhatja a kapcsolatot; már elkészült, üzemelő létesítmények utólagos megoldása során ezért célszerű a helyszíni léghanggátlást méréssel meghatározni, ha lehetséges;
- a különböző térbeli objektumok hangvisszaverő tulajdonságára becsült adatok állnak rendelkezésre, az előbbieken megismert számítás a diffúz visszaverődés megoldását nem tartalmazza;
- az árnyékolás jelensége frekvenciafüggő többletcsillapítást eredményez, l. a 2.4.2. pontot, így az egyadatos csillapítással végzett számítás nyilván szintén közelítő jellegű;
- a helyiségek hangnyomásszintje technológia- és használatfüggő, lehetőleg lehivatkozható forrásból származó, normatív adatokkal kell dolgozni.

Az adatok, paraméterek variálásával szűrhetők ki a kritikus összetevők, gyenge pontok, amelyeket kellő mértékű biztonsággal túl kell méretezni. A „kellő mérték” számszerűsítése a gyakorlati tapasztalatokon alapul, és a feladat jellegétől függ.

9.11. Helyiségek utózengési idejének és egyenértékű hangelnyelési felületének meghatározása

9.11.1. A méretezés tárgya és keretei

A méretezési módszer helyiségek térbeli átlagos utózengési idejének és eredő egyenértékű hangelnyelési felületének meghatározására ad számítási módszert [III.10]. A kiindulási adatok a határolószerkezetek, térbeli objektumok, berendezési tárgyak – lehetőleg mérésrel meghatározott – frekvenciafüggő hangelnyelési tényezői vagy egyenértékű hangelnyelési felületei, valamint a terem méretei. A módszer elsősorban átlagos méretű, szabályos alakú, lakó- és középületekben előforduló helyiségekre alkalmazható:

- a helyisége alakja jellemzően derékszögű hasáb vagy ehhez közel álló forma;
- a helyiség egyik lineáris mérete (pl. hasáb alakú terek élhossza) sem nagyobb a többinél 5 m-t meghaladó mértékben.

Akusztikai szempontból a helyiséget a módszer diffúz hangterűnek tekinti, ahol a hangelnyelő objektumok és szerkezetek egyenletesen helyezkednek el; pl. két szemközti határfelület hangelnyelési tényezőinek aránya nem haladhatja meg a 3-t.

Nem tárgya a számítási módszernek az olyan különleges terek utózengési idejének meghatározása, mint nagyméretű ipari csarnokok, színház- és hangversenytermek, kiállítási csarnokok stb.

A kiindulási adatok:

- a helyiség méretei, alakja, a helyiségben jellemző hőmérséklet és páratartalom;
- a határolószerkezetek és részfelületek felülete, S_i , a határolószerkezetek hangelnyelési tényezője oktávsávonként, $\alpha_{i,o}$; az i index a határolófelületek sorszáma;
- a helyiségben levő és az abban kialakuló hangteret befolyásoló térbeli objektumok térfogata, V_j , és egyenértékű hangelnyelési felülete oktávsávonként, $A_{j,o}$; a j index a térbeli objektumok sorszáma;
- a helyiségben levő és valamely határolófelületet részben eltakaró, egyedi elemekből álló összefüggő hangelnyelő objektum – pl. széksor – határolófelületre vonatkozó vetületi felületének nagysága, S_k , és e vetületi felületre vonatkozó hangelnyelési tényezője, $\alpha_{k,o}$; a k index az összefüggő objektumcsoport sorszáma.

9.11.2. A számítási módszer elvi alapjai

Az általános méretezés alapja a helyiség diffúz hangtéri közelítése – l. a 2.6.4. részt –, amelynek keretei között egy helyiség eredő egyenértékű hangelnyelési felületét az egyes határolószerkezetek, térbeli és csoportos objektumok egyenértékű hangelnyelési felületeinek összegzésével lehet meghatározni. Így tehát az o indexű oktávsávban a helyiség egyenértékű hangelnyelési felületét a (9.52) képlet fejezi ki:

$$A_{eo} = \sum_i \alpha_{i,o} \cdot S_i + \sum_j A_{j,o} + \sum_k \alpha_{k,o} \cdot S_k + A_{lev,o}, \quad (9.52)$$

ahol $A_{lev,o}$ a levegő abszorpciója következtében keletkező egyenértékű hangelnyelési felület; α_i , $A_{j,o}$ és $\alpha_{k,o}$ értékét az 5.6. alfejezetben ismertetettek szerint vagy a zengőtéri hangelnyelési tényező vizsgálat adaptálásával lehet meghatározni. A kemény felületű térbeli objektumok egyenértékű hangelnyelési felületet – egyéb adat hiányában – a frekvencia függvényében állandónak tekinthető és a (9.53) képlettel közelíthető:

$$A_{j,o} = V_j^{\frac{2}{3}}. \quad (9.53)$$

A levegő abszorpciója által okozott csillapítás hatására keletkező, egyenértékű hangelnyelési felületlösszeget a (9.54) összefüggéssel számítható, Y a

hangelnyelő objektumok térfogatának és az üres terem térfogatának aránya a (9.55) képlet értelmezésében:

$$A_{\text{ev},o} = 4 \cdot m_o \cdot V \cdot (1 - \Psi); \quad (9.54)$$

$$\Psi = \frac{\sum_j V_j + \sum_k V_k}{V}. \quad (9.55)$$

A helyiség térbeli átlagos utózengési idejét a (9.56) összefüggés adja meg, amelynek kapcsolata a (2.203)–(2.206) összefüggésekkel közvetlenül belátható, c a hang terjedési sebessége:

$$T = \frac{55,3}{c} \cdot \frac{V \cdot (1 - \Psi)}{A}. \quad (9.56)$$

A hivatkozott anyag összetett, részletező kiegészítő lépéseket is ismertet arra az esetre, ha a feladat által meghatározott körülmények kívül esnek a számítási módszer korlátain. Ebből a szempontból a hangelnyelő szerkezetek szélsőséges, egyenetlen elosztása és az egy térirányban kialakuló, extrém nagy helyiségméretek jelentenek bővítést.

9.11.3. A helyiségek utózengési ideje beállításának lépései

A helyiségek utózengési idejének szabályozását elvileg a 9.1. ábra lépései szerint célszerű elvégezni. A folyamat ez esetben azonban a bútort, a szőnyegek és falburkolatok, az álmennyezet típusának

kiválasztását is magában foglalja. A visszacsatolóág többek között akkor játszhat fontos szerepet, ha az álmennyezet típusának kiválasztása az egymás feletti helyiségek hangszigetelési igényeinek teljesítését is befolyásolja: a hangelnyelő funkciójú álmennyezetek általában sokkal kisebb mértékben javítják a födém lég- és lépéshang elleni szigetelését, mint a tömör, akusztikai szempontból kemény álmennyezetek.

Az adatszükséglet, l. pl. bútort miatt a feladat csak részben végezhető el az engedélyezési terv kidolgozása idején, hiszen a bútort, a belső burkolatok meghatározása későbbi tervfázisokban történik.

9.11.4. A számított eredmények értékelése

A [III.10] nem ad felvilágosítást arról, hogy méréssel meghatározott, tehát a helyszínek megfelelő kiindulási adatokat alkalmazva a számított és a mérhető eredmény között milyen lesz a kapcsolat. A tervezési célokat azonban általában toleranciasávokban, esetleg szélső értékeként fogalmazták meg, ezért általánosságban az ismeretek jelenlegi szintjén arra lehet törekedni, hogy a számított eredmény az elérni kívánt toleranciasávon belül helyezkedjen el. Arra azonban nincs információ, hogy a számított eredményekhez képest a mérési eredmények milyen értékhatárok között változnak majd.

10.

ÉPÜLETEK AKUSZTIKAI TERVEZÉSE. PÉLDÁK

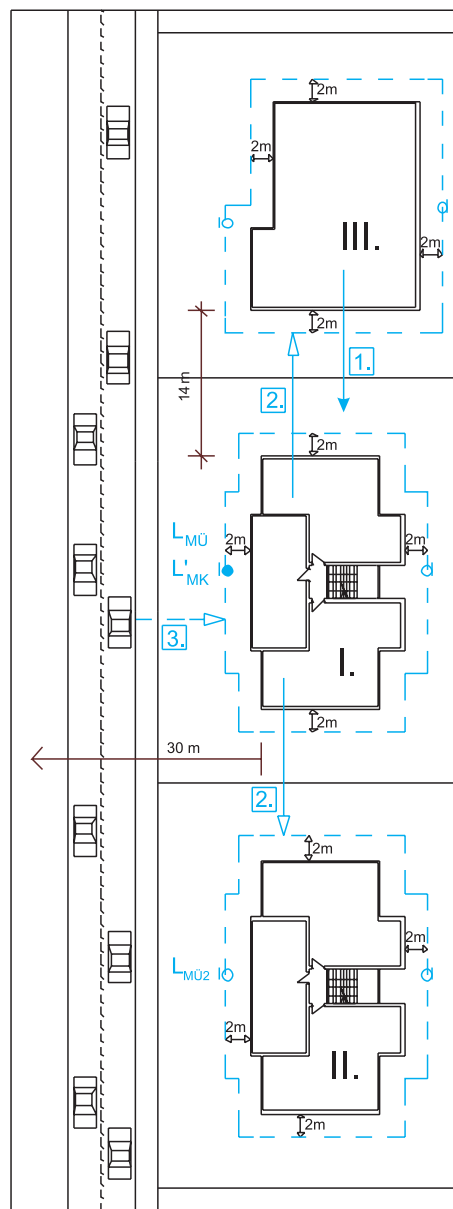
10.1. Kialakult városi környezetben létesítendő, többlakásos lakóépület tervezésének akusztikai feladatai

10.1.1. A feladat

A feladat kialakult városi környezetben levő, valamilyen ok miatt üressé vált telken, többszintes, többlakásos lakóépület tervezéséhez tartozó akusztikai feladatok megoldása. A feladat alapvetően az engedélyezési terv kidolgozásának szakaszához tartozik, a szerkezeti részletek azonban a kiviteli tervezés fázisához tartoznak. Példaként egy lehetséges helyszínrajzi vázlat látható a 10.1 ábrán. A vizsgált épület szabadon álló, egyik oldalról lakóépülettel, másik oldalról ipari vagy szolgáltatólétesítmény épületével és telkével szomszédos. A lakóépületben központi épületgépészeti berendezések nincsenek, a fűtés, a vízellátási berendezések egyedi. A földszinten kávézó és üzlethelyiség működik. Az üzlethelyiség csak a nappali időszakban van nyitva, a rakodás is ebben az időszakban játszódik le. A kávézó nyitvatartási ideje a példa kedvéért tervezési paraméter. A kávézót klímaberendezéssel látták el, amelynek kültéri egysége a létesítmény felőli oldalon az épület mellett, a talajon van felállítva.

A szolgáltatólétesítmény és a vizsgált épület közötti távolság 14 m, az épülettel szemben levő, az utca túloldalán található lakóépület homlokzatának távolsága 30 m.

Az akusztikai tervezés feladatait a zajhatárértékek és hangszigetelési előírások közvetlenül megszabják. A tervezés eredménye szerkezetválasztás, berendezéskiválasztás lehet. A közelítő, elvi megoldásokat a további részek ismertetik. E megoldások kiválasztása számítások alapján történik, amelyeknek csak a szerkezetválasztást megalapozó, közelítő részei szerepelnek. A pontos, ellenőrző számítások a valóságban nem hagyhatók el, különösen nem a példánál nagyobb, bonyolultabb terve-



10.1. ábra. Helyszínrajzi vázlat

I. vizsgált épület; II. szomszédos lakóépület; III. ipari vagy szolgáltatóépület; 1. ————— üzemi zaj; 2. ————— épületgépészeti zaj; 3. - - - - - közlekedési zaj; $L_{MÜ}$ zajhatárérték üzemi zajra a vizsgált épület környezetében; L_{MK} zajhatárérték közlekedési zajra; $L_{MÜ2}$ zajhatárérték üzemi zajra a II. épület környezetében

zési feladat megoldása során. Egyes tipizálható feladatokra lehet számítás nélkül, a gyakorlati tapasztalatok alapján megoldást adni, a gyakorlottabb akusztikus terezők repertoárja számos kész megoldásmintát tartalmaz. Azonban a következő felsorolt feladatok túlnyomó részének optimális megoldásához számításokon keresztül vezet az út. A tipizált megoldás mindig a választék előzetes leszűkítését jelenti. A hazai műszaki szabályozások is az akusztikai minőség számításos ellenőrzését írják elő.

A feladat meglehetősen egyszerű, a gyakorlott szakember számára több részlete rutinból megoldható, ezért alkalmas arra, hogy példaként a követelmények megállapítását és a számításos méretezés lépéseit bemutassa.

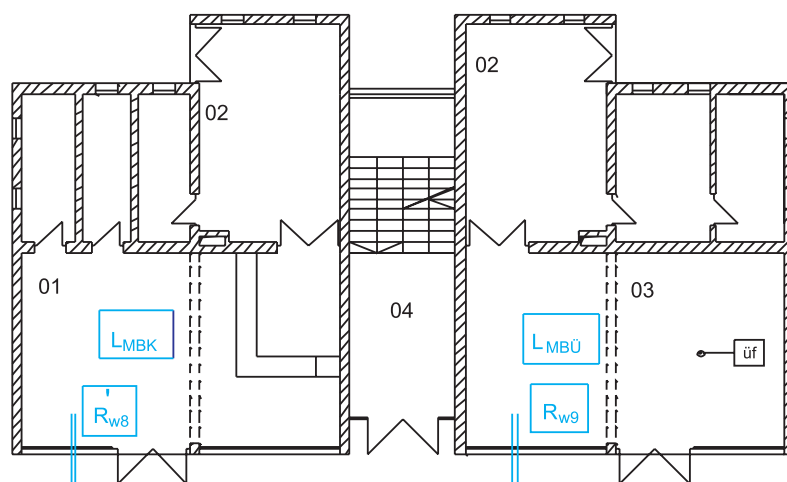
10.1.2. Akusztikai követelmények

A 10.1. ábrán az épületen kívüli zajhatárértékek alaprajzon ábrázolható helye is látható, ezek értelmezése:

- A vizsgált épület környezetében, általában a zajvédendő homlokzattól 2 m távolságban érvényesül a közlekedési zajt korlátozó zajhatárérték, az L_{MK} akkor, ha a terület, ahol az építési telek található, új telepítésű, vagy megváltozott területfelhasználású. A határérték a teljes épületmagasságra kiterjed, ha a homlokzat mögött zaj ellen védendő helyiség van, és a helyiségek ablaka nyíló a vizsgált homlokzati szakaszon. A közlekedési zajra vonatkozó határérték a terület besorolásától és az út jellegétől függ, a területi besorolás a napjainkban érvényes [I.5] zajhatárérték-rende-

let szerint azonos kategóriákat tartalmaz, mint az OTÉK [I.6]. A közlekedési zaj forrása a közúti közlekedés, a sínhez kötött forgalom – pl. villamos, HÉV –, a vasúti forgalom, a légi forgalom.

- A vizsgált épület környezetében, általában a zaj ellen védendő homlokzattól 2 m távolságban szomszédos épületektől és tevékenységtől származó, ún. üzemi zajt korlátozó zajhatárérték, $L_{MÜ}$, $L_{MÜ2}$ érvényesül. A határérték elvileg a teljes épületmagasságra kiterjed. A terület besorolásától is függ, amelynek rendszere megegyezik a közlekedési zaj határértékeihez tartozó területi kategóriákkal. Az üzemi zaj határértékei az [I.5] rendeletben találhatók. Az üzemi zaj forrásai többi között a szomszédos épületben és azon kívül folyó üzemi tevékenység, az épülethez és a tevékenységhez tartozó gépészeti berendezések működése, a rakodás, a telephelyen belüli szállítás. Üzemi létesítménynek számít nemcsak az ipari, hanem a szolgáltató-, kereskedelmi, vendéglátó tevékenységet folytató létesítmény is – szolgáltatóműhely, kereskedelmi egység, vendéglő, sportlétesítmény stb.
- A kávézó és üzlethelyiség belső zajhatárértékei meghaladják a 45 dB megítélési szintet, ezért az épület földszintje előtt számszerűen nem megadott, inkább csak tendencia jellegű, nem pontosan megfogalmazott – „...ne haladja meg jelentősen...” – külső zajhatárérték van.
- Ha a vizsgált épületben gépészeti berendezés működik – kazánház, szellőző, klímarendszer beltéri és kültéri egysége stb. –, akkor az ezekről származó zajt szintén üzemizaj-határérték korlá-

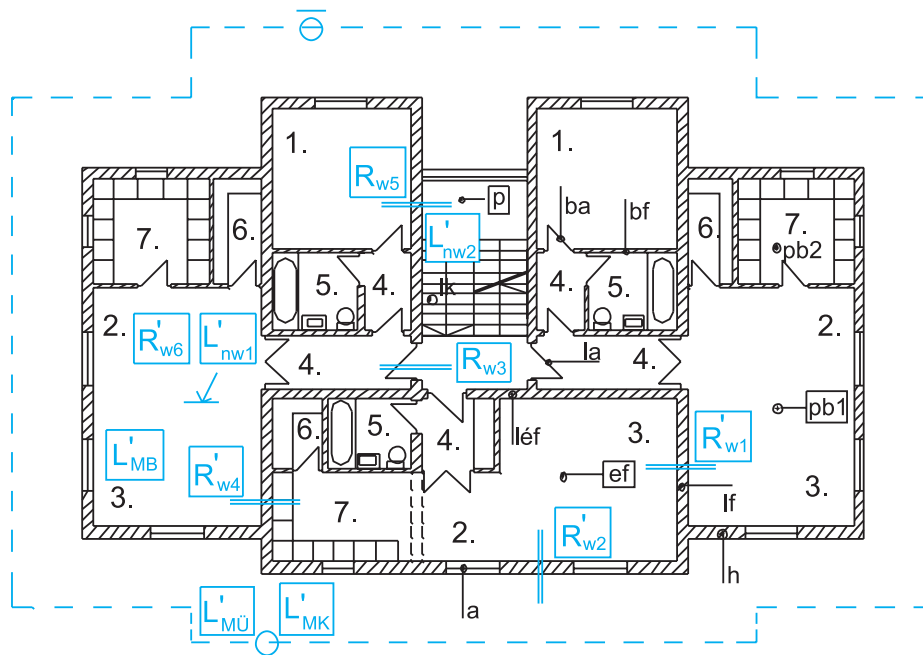


10.2. ábra. Földszinti alaprajz

01 kávézó; 02 raktár; 03 üzlethelyiség; 04 lépcsőház. Az akusztikai mennyiségek magyarázata és értékei a 10.1. táblázatban találhatók.

10.1. táblázat Épületen belüli akusztikai követelmények, I. a 10.1.–10.4. ábrákat

Szint	Jel	Értelmezés	A követelmény számértéke
F	R'_{w8}	A kávézó homlokzati hangszigetelési követelménye, a teljes homlokzat eredője, részben a külső zaj elleni védelem, részben a zajkibocsátás miatt	A helyszíntől, az üzemelés módjától függ
F	R'_{w9}	A kávézó kiszolgálóhelyisége eredő homlokzati hanggátlásának eredője, a zajkibocsátás miatt	A helyszíntől, az üzemelés módjától függ
F	L_{MBK}	A kávézó közönségforgalmi területére vonatkozó zajhatárérték, a közlekedési eredetű zajra és a helyiséghez tartozó gépészeti zajra külön-külön az [I.5] alapján	55 dB
F	R'_{w10}	Az üzlethelyiség homlokzati hangszigetelési követelménye, a teljes homlokzat eredője, részben a külső zaj elleni védelem, részben a zajkibocsátás miatt	A helyszíntől, az üzemelés módjától függ
F	R'_{w11}	Az üzlet kiszolgálóhelyisége eredő homlokzati hanggátlásának eredője, a zajkibocsátás miatt	A helyszíntől, az üzemelés módjától függ
F	$L_{MBÜ}$	Az üzlet közönségforgalmi területére vonatkozó zajhatárérték, a külső zajra és a helyiséghez tartozó gépészeti zajra az [I.5] alapján	60 dB
F→I. em.	L'_{nw4}	A kávézó és a kiszolgálóhelyiségek padlója és a felette levő lakás közötti lépéshangszigetelés, a kávézó normál használata miatt (járáskelés, bútor-tologatás, takarítás stb.)	Nincs számszerű határ-érték, [I.8] és [I.11] miatt legalább ≤55 dB, inkább ≤45 dB
F→I. em.	L'_{nw5}	Az üzlet és a kiszolgálóhelyiségek padlója és a felette levő lakás közötti lépéshangszigetelés, a kávézó normál használata miatt (járáskelés, bútor-tologatás, takarítás stb.)	Nincs számszerű határ-érték, [I.8] és [I.11] miatt legalább 55 dB, inkább 45 dB
I. em.	L_{MB1}	A lakás lakóhelyiségeiben a zajhatárérték [I.5], jelen esetben a közlekedési zajra és valamennyi szomszédos lakás vízellátási berendezései zajára külön-külön (1); a kávézóból felhallatszódó zajra a határérték 5 dB-lel szigorúbb (2)	Nappal:40 dB (1) Éjszaka 30 dB (1) Nappal:35 dB (2) Éjszaka 25 dB (2)
I. em.	L_{MB2}	A lakás konyhájában a zajhatárérték, jelen esetben a közlekedés és az alsó, felső lakások vízellátási berendezései zajhatására [I.5]	Nappal:45 dB Éjszaka 45 dB
I. em.	R'_{w1}	Lakások helyiségei közötti falra megállapított súlyozott léghanggátlási szám követelmény a helyszíni körülmények között [I.8]	≤ 52 dB
I. em.	R'_{w2}	Lakószoba homlokzatára a helyszíni eredő súlyozott léghanggátlási szám követelménye	A külső közlekedési zajtól és a zajhatárérték-től függ
I. em.	R_{w3}	A lakásbejárati ajtó termékjellemzője , súlyozott laboratóriumi léghanggátlási szám [I.8]	≤ 27 dB, ajánlott ≤ 32 dB
I. em.	R'_{w4}	Lakások helyiségei közötti fal súlyozott léghanggátlási szám követelménye [I.8] helyszíni körülmények között,	≤ 52 dB
I. em.	R_{w5}	Lakás lakószobája és lépcsőház, folyosó, padlástér közötti fal termékjellemzője , a súlyozott laboratóriumi léghanggátlási szám [I.8]	≤ 52 dB
I. em.→F F→I. em.	R'_{wif}	A kávézó, üzlethelyiség és kiszolgálóhelyiségek, valamint a lakás helyiségei közötti földem helyszíni súlyozott léghanggátlási száma [I.8]	A követelmény a alsó helyiség használati zajától függ
Em.→em.	R'_{w4}	Lakások közötti földem súlyozott léghanggátlási szám követelménye [I.8] helyszíni körülmények között	≤ 52 dB
Em.→em.	L'_{nw1}	Lakások közötti földemre helyszíni körülmények között a súlyozott szabványos lépéshangnyomásszint követelménye [I.8]	≤ 55 dB
Em.→em.	L'_{nw2} L'_{nw3}	Lakás lakóhelyisége és lépcsőkar, folyosó, közlekedő, pihenő stb. között helyszíni körülmények között a súlyozott szabványos lépéshangnyomásszint követelménye [I.8]	≤ 55 dB

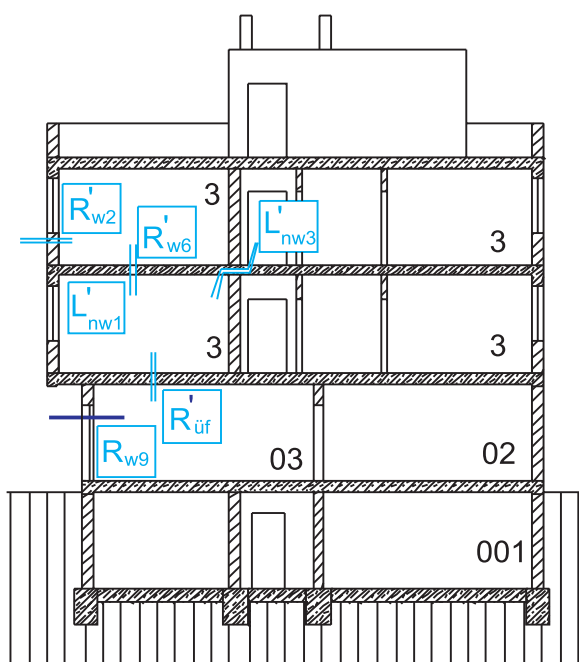


10.3. ábra. Emeleti alaprajz

1. szoba; 2. étkező; 3. nappali; 4. előtér; 5. fürdő; 6. kamra; 7. konyha; ef emeletközi födém; pb1 padlóburkolat; pb2 padlóburkolat; p lépcsőpihenő; lk lépcsőkar; h homlokzati fal; léf lépcsőházi fal; lf lakásválasztó fal; bf belső válaszfal; a ablak; ba belső ajtó; la lakásbejárat ajtó. Az akusztikai mennyiségek magyarázata és értékei a 10.1. táblázatban találhatók

tozza, amelyet azonban nem a saját épület, hanem a szomszédos épületek környezetében felvett megítélési vonalon kell ellenőrizni.

A 10.2. ábra a lakóépület földszinti alaprajzát, a 10.3. ábra az általános emeleti alaprajzot, a 10.4. áb-



10.4. ábra. Metszet

001 pince; 02 raktár; 03 üzlethelyiség; 3 lakás. Az akusztikai mennyiségek magyarázata és értékei a 10.1. táblázatban találhatók.

ra pedig az egyik jellemző metszetet mutatja be. Az ábrákon a külső és belső zajhatárértékek, valamint a hangszigetelési követelmények is szerepelnek a 10.1. táblázat részletezésében.

A területi besorolás a példában legyen vegyes terület, az üzemi létesítményektől származó zajra a zajhatárérték nappal 55 dB, éjszaka 45 dB.

A kávézó használatizaj-szintje a működés ideje alatt $L_{Ahaszn} = 90$ dB [I.9], feltéve, hogy nincs előzene-szolgáltatás, csak háttérzene. Ezzel a feltétellel a kávézó és a felette levő lakás közötti födém helyszíni súlyozott léghanggátlási számának követelménye, R'_{wif} -nek az értéke 62 dB. Az üzlethelyiség használatizaj-szintje [I.9] alapján 85 dB, így az üzlethelyiség és a felette levő lakás közötti födém helyszíni súlyozott léghanggátlási számának követelménye, $R'_{wif} = 57$ dB.

A közlekedéstől származó zaj egyenértékű A hangnyomásszintje a nappali időszakban legyen 65 dB, éjszaka pedig 58 dB. E két érték a valóságban számítással és/vagy helyszíni akusztikai méréssel és forgalomszámlálással határozható meg.

10.1.3. Elemzés

A helyiségkapcsolatok a példa érdekében előnyös és hátrányos elemeket tartalmaznak. A teljesség igénye nélkül néhány példa:

- hátrányos, hogy a lépcsőház mellett lakó helyiségek találhatóak;
- hátrányos, hogy lakószoba a szomszéd lakás vizeshelyisége (konyha) mellett található;
- a földszinti kávézó felől az I. emeleti lakás hangszigetelése reálisan megoldható, ha a kávézó csak a nappali időszakban működik; ha 22 óra után is nyitva van, egyedi akusztikai tervezés és gondos kivitelezés esetén is nehezen oldható meg a feladat az újabb keletű zajhatárértékek miatt [I.5];
- az üzlethelyiség felől a hangszigetelés megoldható akkor, ha az éjszakai időszakban rakodás nincs;
- előnyös, hogy legalább a nagyobb lakásoknak van olyan szobája, amely az épület „csendes” oldalára néz;

Az akusztikai tervezés során figyelembe veendő *külső* zajforrások:

- közlekedés;
- szomszédos szolgáltató- (üzemi) létesítmény működése;
- a kávézó klímaberendezésének kültéri egysége. A *belső* zajforrások az alábbiak:
- a rendeltetésszerű lakáshasználat;
- a technológiai berendezések működése (pl. vízellátási berendezések);
- a kávézó működése;
- az üzlethelyiség működése.

10.1.4. Tervezési lépések, eredmények

I. Az épület környezetbe illesztése:

védelem a szomszédos üzemi létesítmény zajától

A szomszédos üzemi létesítmény zajának határérték alá csökkentése alapvetően a szomszédos üzemi létesítmény feladata. A vizsgált épület eszközei korlátozottak. Lehetőség lenne az épület úttengelyre merőleges beépítési vonalának változtatása, azonban a telekméret miatt ez csak elvi lehetőség. Lehetséges tömör kerítés építése, amely zajárnyékoló falként működik, azonban általában nem lehet a szükséges falmagasságot elérni, hiszen a védendő épület többszintes.

Az épületen kívüli zajhatárérték a földszinti helyiségek homlokzatai előtti mérési helyekre nem vonatkozik, mert ezekben a belső zajhatárérték meghaladja a 45 dB-t.

II. Az épület környezetbe illesztése:

a közlekedési zaj elleni védelem

Az épületen kívül értelmezett, közlekedési zajra vonatkozó határérték a jelen esetre csak akkor vonat-

kozna, ha az építési terület új telepítésű vagy megváltozott terület felhasználású lenne. A zaj elleni védelem lehetőségei azonban igen korlátozottak. Egy épület létesítése esetén a közlekedés nem befolyásolható; a beépítési sík távolabbra helyezése nem hatékony, hiszen 3 dB zajscsökkentéshez a szélső forgalmi sáv és a homlokzat síkja közötti kiinduló távolságot kétszerezni kellene; zajárnyékoló fal az adott esetben nem létesíthető. A jelen esetben is csak a passzív akusztikai védelem módszere alkalmazható, tehát a közlekedési zaj elleni védelmet az épület belső tereire lehet és kell megoldani.

Az épületen kívüli zajhatárérték a földszinti helyiségek homlokzatai előtti mérési helyekre csak bizonytalanul, nem számszerűsítetten vonatkozik, mert ezekben a helyiségekben a belső zajhatárérték meghaladja a 45 dB-t.

III. Építészeti, épületszerkezeti tervezés, lakások külső-belső hangszigetelése

A lakások külső hangszigetelése a közlekedési zaj elleni szigetelést, a belső hangszigetelés pedig a szomszédos egységek használati zaja elleni, valamint a gépészeti zaj elleni szigetelést jelenti. E szigetelési feladatokat együtt kell végiggondolni, hiszen az érintett szerkezetek részben közösek. A kiinduló szerkezetválasztást számítással vagy gyakorlati analógiák alapján le kell ellenőrizni, és szükség esetén ekkor lehet módosítani (összhangban a 9.1. ábrával).

Az épület szerkezeti rendszere, alaprajza, valamint a gyakorlati tapasztalatok több olyan kiinduló szerkezetválasztást sugallnak, amellyel a hangszigetelési követelmények biztonságosan teljesíthető, és az „egyéb”, a gyakorlatban erősebb követelmények is teljesülnek. A homlokzati falazat (*h*) például hőszigetelési célból kifejlesztett, kerámia alapanyagú falazóblokk (Porotherm 38 NF), a lakáselválasztó belső falazat és a lépcsőház felőli fal (*lf, lè*) Porotherm 30 hanggátlófalazó blokk, a belső válaszfalak (*bf*) Porotherm 11.5 NF elemből készülhetnek. A földem (*ef*) 20 cm monolit vasbeton lemezföldem. Padlóburkolatként (*pb1, pb2*) célszerű úszópadlót választani, az úsztatórétteg lépéshang-szigetelő (és *nem lépésálló*) üveggypot lemez vagy PS hab lehet. Az előbbire példa az ISOVER TANGO TDP 20/15 vagy ennél jobb minőségű, az utóbbira pedig az AUSTROTHERM AT-L 34/30 jelű termék. Az úszópadló ugyanis a lépéshangszigetelési igényt alapvetően megoldja, a járórétteg gyakorlatilag már tetszőleges lehet. A konyhában, fürdőszobában, wc-ben, közlekedőben is szükséges az úsztatott szerke-

zet, rétegrendje a burkolattól eltekintve azonos a szobában alkalmazottal. Ez további előnyt is jelent: e helyiségek köburkolatot is kaphatnak.

Az utóbbi időben gyakran tapasztalható, hogy lakáselválasztó falként is Porotherm 38 NF vagy Porotherm 30 NF elemet terveznek és kiviteleznek. A gyártó e termékeket lakáselválasztó falként **nem ajánlja**, a keletkező eredményt, azaz a szomszédos lakások közötti hangszigetelést a szegényes, elégtelen, igen rossz jelzőkkel lehet illetni. Lakáselválasztó falat ilyen falazóelemből építeni durva hibának számít! A várható helyszíni, súlyozott léghanggátlási szám 40 dB-nél kisebb, ami nagyon csekély mértékű szeparáltságot eredményez (l. a 7.1.9. alfejezetet).

Ha nem készül úszópadró, a lakóhelyiségekben a szükséges javító hatású szőnyegpadló, a vizes helyiségekben habalátétes pvc-burkolat kerülhet. Valamennyi padlóburkolatra a szabványos lépéshangnyomásszint-csökkenés szükséges értéke legalább 23 dB, ha a födém 20 cm monolit vasbeton lemez. Az úszópadró méretezésekor az esetleges kivitelezési problémák miatt célszerű legalább 3 dB tartalékot hagyni.

A szerkezetek alapvető kiválasztását néhány – látszólag részben triviális, de a hazai építési gyakorlatot ismerve feltétlenül hasznos – ökölszabály is segíti, pl.:

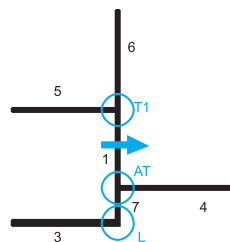
- a burkolattal ellátott födém hangszigetelési célú meghatározásánál a burkolatlan födémmel kell megoldani a léghanggátlási követelményt, a padlóburkolattal pedig a lépéshang-szigetelési követelményt;
- léghanggátlási követelmény teljesítésére nincs esélye az olyan szerkezetnek, amelynek akusztikai termékjellemzője – tehát a kerülőutak nélküli laboratóriumban meghatározott súlyozott léghanggátlási száma – rosszabb minőségű, mint a követelmény;
- megfelelő termékválasztás esetén a különböző padlóburkolatokkal valójában elérhető, súlyozott szabványos lépéshangnyomásszint-csökkenés elérheti a következő értékeket (lehetőségek a minőség felső határára):
 - habalátétes pvc: $\Delta L_{nw} = 25$ dB,
 - szőnyegpadló: $\Delta L_{nw} = 28$ dB,
 - jól méretezett úszópadró szálaz szigetelőanyagú úsztatóréteggel: $\Delta L_{nw} = 32$ dB,
 - jól méretezett úszópadró PS hab úsztatóréteggel: $\Delta L_{nw} = 28$ dB,
 - kis vastagságú úszópadró, ha az úsztatóréteg 5–10 mm műanyaghab, száraz esztrich, ha az

úsztatóréteg 20–30 mm műanyaghab: $\Delta L_{nw} = 18$ dB.

A padlóburkolatok a födém helyszíni léghanggátlási jellemzőjén nem vagy csak olyan csekély mértékben javítanak, hogy azt méretezési tartaléknak célszerű tekinteni;

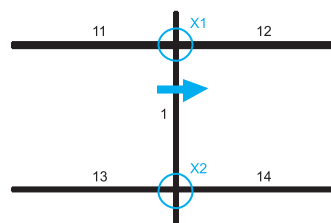
- Jól méretezett hanggátlást javító falburkolattal, vagy tömör, függesztett álmennyezettel az alapszerkezet helyszíni súlyozott léghanggátlási száma a szerkezeti részletek függvényében valójában 6–8 dB mértékben javítható; további javulás csupán összetett szerkezetekkel érhető el.

Az épületek helyiségei közötti hangszigetelés számításos ellenőrzése ideális minőségű, hibátlanul kivitelezett szerkezetekre vonatkozik. A számítási módszert a 9.3. és 9.6. alfejezetek ismertették. Az ellenőrzést egymás melletti lakóhelyiségekre például az R'_{w1} és az R'_{w4} követelménynél, függőlegesen pedig tetszőleges helyiségkapcsolatnál, pl. R'_{w6} , L'_{nw1} stb. lehet elvégezni. Az R'_{w1} követelmény számításos ellenőrzéséhez a számítás sémáját a 10.5. ábra (az emeleti alaprajzhoz) és a 10.6. ábra (a metszethez) mutatja be. A hangterjedési utakat a 10.2. táblázat foglalja össze a két ábrán bejelölt vizsgálati irányhoz. A 10.5. és 10.6. ábrán a T a T alakú, az



10.5. ábra. Számítási séma az R'_{w1} követelmény teljesülésének ellenőrzéséhez, az alaprajzon látható szerkezeti elemekkel

1 lakáselválasztó fal lakószobák között, fal, l. a 10.3. ábrát; 3, 4, 7 homlokzat; 5 lakáshatároló fal lakószoba és előtár között; 6 lakáson belüli válaszfal szoba és fürdőszoba között; L L alakú szerkezeti csomópont, l. a 9.3.2. pontot; T1 szimmetrikus, T alakú szerkezeti csomópont, l. a 9.3.2. pontot; AT aszimmetrikus T alakú szerkezeti csomópont, l. a 9.3.2. pontot



10.6. ábra. Számítási séma az R'_{w1} követelmény teljesülésének ellenőrzéséhez, a metszeten látható szerkezeti elemekkel

1 lakáselválasztó fal lakószobák között, fal, l. a 10.3. ábrát; 11–14 födém; X1, X2 X alakú szerkezeti csomópont, l. a 9.3.2. pontot

AT az aszimmetrikus T alakú, az L az L alakú, az X a kereszt alakú csomópontot jelenti.

10.2. táblázat. Hangterjedési utak áttekintése egymás mellett levő lakószobák között (l. a 10.5. és 10.6. ábrát)

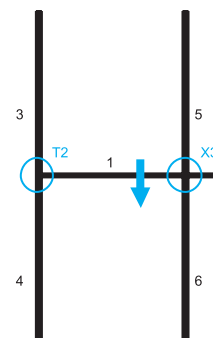
Ábra	Csomópont	Elemek
Alaprajz, metszet	Közvetlen terjedés	1
Alaprajz	T	5 ⇨ 1
		5 ⇨ 6
		1 ⇨ 6
	AT	7 ⇨ 1
		1 ⇨ 4
	L+AT	3 ⇨ 1
Metszet	X1	11 ⇨ 1
		11 ⇨ 12
		1 ⇨ 12
	X2	13 ⇨ 1
		13 ⇨ 14
		1 ⇨ 14

Az egymás feletti lakószobák közötti R'_{w6} követelmény-ellenőrzéséhez tartozó számítási vázlatok a 10.7. és 10.8. ábrán láthatók. A 10.7. ábrán látható séma a homlokzaton átmenő metszethez tartozik. A hangterjedési utakat a 10.3. táblázat foglalja össze a két ábrán bejelölt vizsgálati irányhoz.

10.3. táblázat. Hangterjedési utak áttekintése függőlegesen szomszédos helyiségek közötti léghang-szigetelés számításához (l. a 10.7. és 10.8. ábrát)

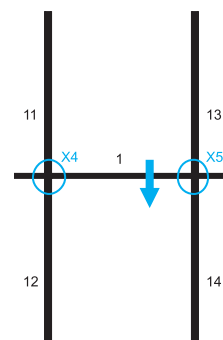
Ábra	Csomópont	Elemek
Metszetek	Közvetlen terjedés	1
Homlokzaton átmenő merőleges metszet	T2	3 ⇨ 1
		3 ⇨ 4
		1 ⇨ 4
	X3	5 ⇨ 1
		5 ⇨ 6
		1 ⇨ 6
Homlokzattal párhuzamos metszet	X4	11 ⇨ 1
		11 ⇨ 12
		1 ⇨ 12
	X2	13 ⇨ 1
		13 ⇨ 14
		1 ⇨ 14

Az egymás feletti lakószobák közötti, súlyozott szabványos lépéshangnyomásszintre vonatkozó L'_{nw1} követelmény teljesülésének számításos ellenőrzéséhez tartozó hangterjedési utak szintén a 10.7.



10.7. ábra. Számítási séma az R'_{w6} követelmény teljesülésének ellenőrzéséhez, a homlokzaton átmenő metszeten látható szerkezeti elemekkel

1 földem lakószobák között, fal, l. a 10.3. és 10.4. ábrát; 3, 4 homlokzat, l. a 10.3. és 10.4. ábrát; 5, 6 lakáshatároló fal lakószoba és előtér között; X3 X alakú szerkezeti csomópont, l. a 9.3.2. pontot; T2 szimmetrikus, T alakú szerkezeti csomópont, l. a 9.3.2. pontot



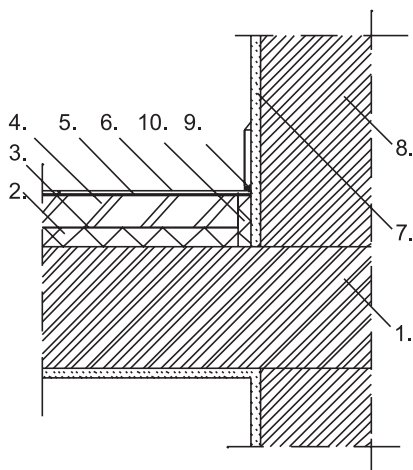
10.8. ábra. Számítási séma az R'_{w6} követelmény teljesülésének ellenőrzéséhez, a homlokzaton átmenő metszeten látható szerkezeti elemekkel

1 földem lakószobák között, fal, l. a 10.3. és 10.4. ábrát; 11–14 lakásválasztó fal lakószobák között, l. a 10.3. és 10.4. ábrát; X4, X5 X alakú szerkezeti csomópont, l. a 9.3.2. pontot

és 10.8. ábrákon figyelhetők meg. A szabványos lépéshangnyomásszint értelmezése és vizsgálati módja miatt azokat a hangterjedési utakat kell kiválogatni, ahol a gerjesztett szerkezet az 1. jelű padlóburkolattal ellátott földem. A hangterjedési utakat a 10.4. táblázat foglalja össze.

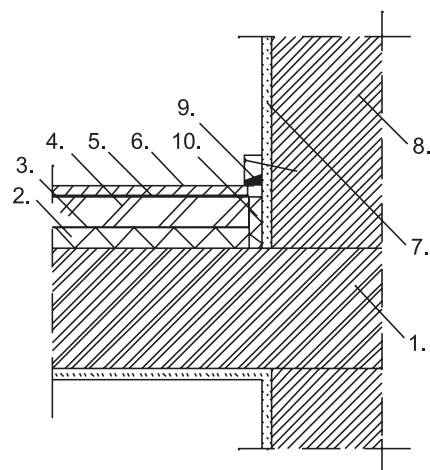
10.4. táblázat. Hangterjedési utak áttekintése egymás feletti helyiségek közötti lépéshang-szigetelés számításához (l. a 10.7. és 10.8. ábrát)

Ábra	Csomópont	Elemek
Metszetek	Közvetlen terjedés	1
Homlokzatra merőleges metsz.	T2	1 ⇨ 4
	X3	1 ⇨ 6
Homlokzattal párh. metsz.	X4	1 ⇨ 12
	X2	1 ⇨ 14



10.9a ábra. Úszópadló elvi felépítése kerámia lapburkolat esetén

1. monolit vasbeton födém; 2. úsztatóréteg; 3. technológiai szigetelés; 4. aljzatbeton (min. 5 cm) + simítás; 5. ragasztóréteg; 6. kerámiaburkolat; 7. vakolat; 8. falazat; 9. tartósan rugalmas kitt; 10. peremszigetelés



10.9b ábra. Úszópadló elvi felépítése szalagparketta burkolat esetén

1. monolit vasbeton födém; 2. úsztatóréteg; 3. technológiai szigetelés; 4. aljzatbeton (min. 5 cm) + simítás; 5. filclátét; 6. szalagparketta-burkolat; 7. vakolat; 8. falazat; 9. tartósan rugalmas kitt; 10. peremszigetelés

Az úszópadló egy jellemző csomópontjának elvi felépítését a 10.9. ábra mutatja. A számításos ellenőrzéseket elvégezve kiderült, hogy a kiinduló szerkezetválasztás helyes volt: a számított eredmény a 9.3. és 9.6. alfejezetben ismertetett biztonság figyelembevételével teljesíti a tervezési célokat.

A külső zaj elleni védelem méretezése az ablak, a homlokzati falazat és az esetleg beépítendő szellőzőelemek kiválasztását jelenti. A méretezést a gyakorlati tapasztalatok szerint az éjszakai állapotra kell elvégezni. A homlokzati falazat kiválasztása már korábban megtörtént, jelenleg az ablaktípus és az esetleg szükséges beépített szellőzőelem meghatározása következik. Az általános emeleti alaprajzon három olyan helyiség van, amellyel mindenképpen foglalkozni kell: a nagy lakások lakószoba-étkezője, a nagy lakások „csendes” oldalon levő szobája és a kis lakás lakószobája. A konyhára a zajhatárérték – és ezért a homlokzati hangszigetelési követelmény – enyhébb, így ha a szobákkal azonos minőségű szerkezet kerül, akkor a szigetelési igény automatikusan teljesül. Ha a konyha a lakószobával egy légtérben van, akkor automatikusan a lakószobai követelményt kell érvényesíteni.

Az [I.10] szabványnak a homlokzati szerkezetek helyszíni súlyozott léghanggátlási számára vonatkozó tartalmazó követelménye nem veszi figyelembe a helyiségek alapterületének és homlokzati felületének arányát, nem ad útmutatást a szerkezet kiválasztására. Ezért e szabvány a feladat megoldására nem alkalmas. A következőkben követett eljárás viszont az [I.10] szerinti követelményt is teljesíti.

A teljesítendő követelményt az alaprajzokon R'_{w2} jelöli. Természetesen ez minden szobára és a konyhára vonatkozik, a továbbiakban az oldalsó nagyszoba adatait vesszük alapul. A méretezés lépései:

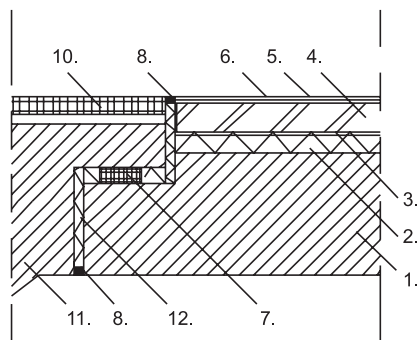
a) A homlokzat eredő helyszíni súlyozott léghanggátlási számának, R'_{wer} -nek a meghatározása; a nagyszobára ez a (10.1) képlet megoldását jelenti a 9.2. alfejezet (9.2a) összefüggés alapján, feltételezve, hogy a lakószoba utózengeési idejének középértéke mintegy 0,8 s:

$$(R'_{wer} + C_{tr}) \geq 58 - 30 + M + 10 \cdot \lg \frac{S_h \cdot T}{0,16 \cdot V} = 33,04 \text{ dB.} \quad (10.1)$$

b) A homlokzat eredő súlyozott léghanggátlási száma, R_{wer} laboratóriumi beépítésben:

$$(R_{wer} + C_{tr}) \geq (R'_{wer} + C_{tr}) + 2 = 35,04 \text{ dB.} \quad (10.2)$$

c) Szerkezetválasztás: a homlokzati falazat a kiinduló szerkezetválasztásban adott, adatai: $R_w = 42 \text{ dB}$, $C_{tr} = -3,8 \text{ dB}$. Próbaképpen a szellőzőelem falba építhető, súlyozott léghanggátlási számának és színeképillesztési tényezőjének összege, $(R_w + C_{tr})$ legyen nagyobb, mint 23 dB. Eredő hanggátlást számolva az ablak súlyozott léghanggátlási számának és színeképillesztési tényezőjének összege a jelen esetben legalább 33,9 dB. Ez tehát az ablakszerkezetre vonatkozó termékjellemző. Olyan szerkezet kiválasztása – és szakszerű beépítése – jelenti a feladat megoldását, amelynek $(R_w + C_{tr})$ értéke nagyobb, mint 33,9 dB.

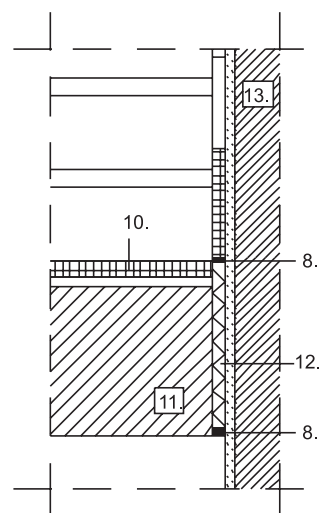


10.10a ábra. Úsztatott lépcsőkar kialakításának elvi ábrája [I.12] alapján, lépcsőkar irányú metszet

1. monolit vasbeton födém; 2. úsztatórétteg; 3. technológiai szigetelés; 4. aljzatbeton (min. 5 cm) + simítás; 5. ragasztórétteg; 6. kerámiaburkolat; 7. rezgésszigetelő alátét, a lépcsőkar tömege alapján méretezni kell; 8. falazat; 9. tartósan rugalmas kitt; 10. lépcsőburkolat; 11. előre gyártott vasbeton lépcsőlemez; 12. hézagkitöltés szálas szigetelőanyagból vagy lágy műanyaghabból, a hézagot lazán tölti ki

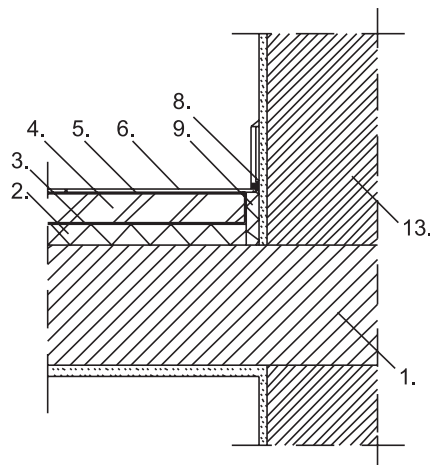
A lépcsőkar, lépcsőházi pihenő és a vele szinteltolással vagy átlósan szomszédos lakószobák közötti szabványos lépéshangnyomásszint-követelmény (L'_{nw2} , L'_{nw3}) az alaprajzi elrendezésből következik. Ha más lakásalaprajz megoldása a feladat, és a lépcsőházzal nem lakószoba szomszédos, hanem például fürdőszoba, WC, kamra, gardrób, konyha, akkor ez a követelmény nem merül fel. A hatékony megoldás a lépcsőházi szerkezet módosítása: úsztatott szerkezet a pihenőknél, a folyosón, és úsztatott lépcsőkar. A pihenő, folyosó úsztatott szerkezete azonos lehet a lakáson belül választott szerkezettel, és ez esetben a köburkolatok sem rontják le a lépéshang-szigetelést. A lépcsőkar úsztatott kialakításának elvi vázlata a 10.10. ábrán látható [I.12] alapján. A teherhordó, rezgésszigetelő réteg szélességét, vastagságát méretezni kell, a dilatációs hézagban levő további szigetelésnek csak részkitöltő szerepe van. A méretezés úgy történik, hogy a lépcsőkar-rugalmas alátámasztások rendszert 1 szabadságfokú rezgőrendszernek kell tekinteni, ahol a tömeg a lépcsőkar tömege, a rugó a rugalmas megtámasztás. A keletkező rendszer rezonanciafrekvenciáját lehetőleg 20 Hz alá kell beállítani. A lépcsőkar tömege $m = 960$ kg, a teherhordó szalag kiinduló méretei $0,1 \times 0,4$ m, a szalagokra ható nyomás ekkor – tekintve, hogy a lépcsőkart mindkét végén alá kell támasztani – 0,12 MPa.

Példaként a CDM termékei közül választva (l. a 8. fejezetet) a CDM-CR család CDM-01 lemezének 20 mm vastagsága hatására a rezonanciafrekvencia kb. 12 Hz lesz, a kiválasztott lemez dina-



10.10b ábra. Úsztatott lépcsőkar elvi ábrája [I.12] alapján, lépcsőkarra merőleges metszet

8. tartósan rugalmas kitt; 10. lépcsőburkolat; 11. előre gyártott vasbeton lépcsőlemez; 12. szálas szigetelőanyag vagy lágy műanyaghab kitöltés; 13. lépcsőházi fal vakolattal



10.10c ábra. Úsztatott lépcsőkar elvi ábrája [I.12] alapján, pihenő és lépcsőházfal metszete

1. monolit vasbeton lemez; 2. úsztatórétteg; 3. technológiai szigetelés; 4. aljzatbeton (min. 5 cm) + simítás; 5. ragasztórétteg; 6. kerámiaburkolat; 7. vakolat; 8. tartósan rugalmas kitt; 9. szálas szigetelőanyag, vagy lágy műanyaghab-szegély; 13. lépcsőházi fal vakolattal

mikai merevsége $0,06 \text{ MN/m}^3$. A kiválasztott lemez az alacsony rezonanciafrekvencia miatt megfelelő.

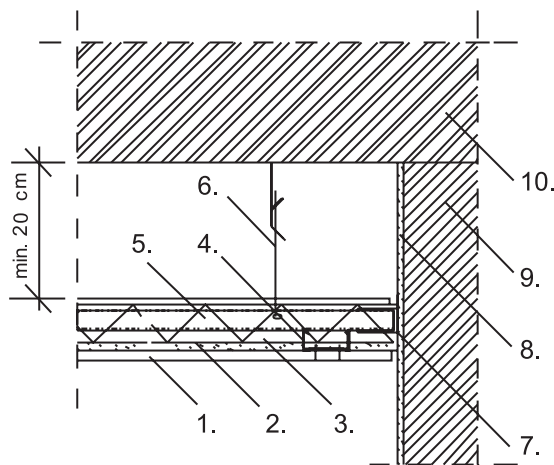
A lépcsőházi pihenőknél úsztatott szerkezetnek kell készülnie, a lakásokban alkalmazott szerkezettel és rétegrenddel megegyezően. A használatból eredő igénybevétel és számos előírás miatt célszerűen a köburkolat jöhet számításba.

Amennyiben nem készül úsztatott szerkezet, a feladatban szereplő alaprajzi elrendezésben az L'_{nw2} követelmény nem fog teljesülni, és a lakókat a lépcsőházi járkálás zavarni fogja.

IV. Építészeti–szerkezeti tervezés, az emeleti lakások védelme a kávézó és az üzlethelyiség üzemi zajától

A kávézó és a felette levő lakás helyiségei között a helyszíni súlyozott léghanggátlási szám szükséges értéke $R'_{wif} = 62$ dB, az üzlethelyiség és a felette levő lakás helyiségei között a helyszíni súlyozott léghanggátlási szám szükséges értéke $R'_{wif} = 57$ dB. A követelmény teljesítésének megtervezése, azaz a határolószerkezetek, burkolatok kiválasztása számítás alapján történhet.

A számítás elve azonos a korábbiakkal. Ha a kávézóban nincs olyan álmennyezet, amelynek léghanggátlást javító hatása van, akkor a helyszíni súlyozott léghanggátlási szám számított értéke csak 56 dB, a jelen esetre nem elegendő. Ha az álmennyezet kerülőutak nélküli laboratóriumban legalább 14 dB javító hatású, akkor a helyszíni súlyozott léghanggátlási szám értéke nagyobb lesz, mint $R'_{whely} = 63$ dB, így a szigetelési igény teljesül. Ezt a javító hatást 1 réteg 12,5 mm vastag tömör gipszkarton lapból készült függesztett álmennyezettel lehet megoldani, ha a hátoldalra nehéz gumilemez- és szálás szigetelőanyag-terítés kerül. A szálás szigetelőanyagot a fajlagos áramlási ellenállás alapján kell kiválasztani: olyan szigetelőanyagra – és *nem* hőszigetelésre – van szükség, amelynek fajlagos áramlási ellenállása nagyobb, mint $5 \text{ kN} \cdot \text{s/m}^4$. A gumilemez fajlagos tömege legalább 6 kg/m^2 . A befüggesztési pontok sűrűsége nem lehet nagyobb, mint 1 db/m^2 , a légrés legalább 20 cm. Az álmennyezet rétegrendjét a 10.11. ábra mutatja.



10.11. ábra. Álmennyezet a kávézóban

1. 12,5 mm tömör gipszkarton lap; 2. min. 6 kg/m^2 fajlagos tömegű gumilemez-terítés; 3. 5 cm szálás szigetelőanyag; 4. álmennyezeti keresztborda; 5. álmennyezeti főborda; 6. gyorsrögzítő elem; 7. szegélyrögzítő L profil; 8. vakolat; 9. falazat

A kávézó használati zajától származó, az emeleti lakószobákban mérhető zaj határértéke nappali időszakban $L_{Aszoba} = 35$ dB. Ennek közelítő ellenőrzése:

$$L_{Aszoba} = L_{Ahaszn} - R'_{whely} + 10 \cdot \lg \frac{S_{föd} \cdot 0.8}{0.16 \cdot V_{szoba}} + 5 \approx 35 \text{ dB.} \quad (10.3)$$

Az előzőekben meghatározott szerkezetválasztással várhatóan a zajhatárérték is teljesül, feltéve, hogy a kávézó üzemelési körülményei megfelelnek a kiindulóadatoknak.

Az üzlethelyiségben az álmennyezet nélküli alapesethez képest a szükséges javítási igény a számítás szerint csak 1 dB, ide gyakorlatilag tetszőleges tömör vagy csak kismértékben perforált lapokból álló függesztett álmennyezet kerülhet. Szintén lehetséges a kazettás, tömör vagy csak kismértékben perforált álmennyezeti rendszerek alkalmazása is.

Különösen a kávézó és a felette levő lakás közötti hangszigetelés méretezésekor volt előnyös a kiinduló szerkezetválasztásban az ún. hanggátló tégl (Porotherm 30 hanggátló) szerepeltetése, mert ennek a tömege miatt még a kisfrekvenciás tartományban is értékelhető, jelentős hangszigetelése van. Ez a kedvező sajátosság nemcsak a közvetlen hangterjedésben, hanem a felmenőfalak által létrehozott kerülőutas hangterjedésben érvényesül.

V. Építészeti–szerkezeti tervezés, a külső környezet védelme a kávézó és az üzlethelyiség üzemi zajától

A vizsgált épület előtti zajhatárérték értelmezésében nem egyértelmű, hogy a saját épületben elkülönült tulajdonként működő létesítmény környezeti zajára vonatkozik-e a határérték vagy sem, de a mindennapi élet tapasztalatai arra mutatnak, hogy célszerű a határérték szigorú értelmezése. A megítélési pont és a zajt kibocsátó homlokzat közötti távolság $d = 3$ m, de a zajt sugárzó felületet (ajtó, ablak stb.) a kis távolság miatt részfelületekre kell bontani. A belső zaj az $L_{A,h}$ használati zajszinttel jellemezhető. A részfelületenként kiszámított A hangnyomásszinteket összegezni kell. Durva közelítésként a homlokzat szükséges léghanggátlási száma, R'_{wh} a helyszíni beépítésben a (9.45) és (9.48) összefüggések alapján a (10.4) szerint alakul, feltéve, hogy az üzemelés a nappali időszakban történik, $L_{MÜ}$ a külső, üzemi zajt korlátozó zajhatárérték, S_h a zajt sugárzó homlokzat teljes felülete. 5 dB korrekció azért jelenik meg, mert az üzemi zajt korlá-

tozó határérték több zajforrás hatását korlátozza, ill. az A szintben végzett számítás közelítő jellege miatt:

$$R'_{wh} \geq L_{Ah} - L_{MÜ} + 10 \cdot \lg \left(\frac{S'_h}{1 \text{ m}^2} \right) - 10 \cdot \lg(d^2 \cdot \pi) - 4 + 5 = 30,5 \text{ dB.} \quad (10.4)$$

A homlokzat kerülőutak nélküli súlyozott lég-hanggátlási száma 2 dB-lel nagyobb. Ezt a szigetelési igényt a rögzített üvegezésű ablak és a középén felnyíló ajtó hangszigetelésével kell teljesíteni. Az ablakos rész hangszigetelését célszerű megnövelni, hogy az ajtóra egyszerűbb szerkezet is elegendő legyen. Reális megoldás lesz például, ha az ablakos homlokzatrész súlyozott lég-hanggátlási száma legalább 36 dB. Ezt a szigetelési igényt hőszigetelő üvegezésű ablakkal el lehet érni, típusszerkezetek rendelkezésre állnak. Az ajtó szükséges súlyozott lég-hanggátlási száma e választáshoz az eredő ellenőrzése alapján $R_{wajtó} \geq 30 \text{ dB}$: ebben a kategóriában is léteznek típusszerkezetek. A hangszigetelés biztonságosan akkor érhető el, ha a kávézó bejárati ajtajánál szélfogó létesül. Így műszaki szempontból megvan annak az előfeltétele, hogy folyamatosan csukott állapotban levő ajtót lehessen figyelembe venni.

Felmerülhet az a kérdés, hogy nem kellene-e foglalkozni a kávézó többi határolószerkezetének hang-sugárzásával is? Elvileg igen, de a példában az oldalfal a kiválasztott legkedvezőtlenebb szituációhoz képest „árnyékban van”, az emeleti lakásablakból nem látszik, tehát a falazat nagyobb hanggátlása mellett az épület önárnyékoló hatásával is számolni kell. Így jogos az alkalmazott közelítés.

Ha a kávézó éjszaka is működik, a méretezett homlokzatra meghatározható szigetelési igény 10 dB-lel nagyobb. Ekkor – típusszerkezetek hiányában – egyedi szerkezetek tervezésére van szükség.

Az üzlethelyiség használatzaj-szintje 5 dB-lel kisebb, így homlokzatra vonatkozó szigetelési igény ugyanilyen mértékben kevesebb lesz. Szokványos hőszigetelő üvegezésű ajtó, ablak, portál, valamint a kiinduló szerkezetválasztásban meghatározott homlokzati falazat várhatóan megfelelő lesz a korábban meghatározott üzemelési körülmények között.

VI. Építészeti–szerkezeti tervezés, a kávézó és az üzlethelyiség belső tereinek védelme a közlekedési zajtól

Tekintettel arra, hogy a kávézóban és az üzlethelyiségben zajhatárérték írja elő a megengedhető zajt, vizsgálni kell, hogy az előzőekben kiválasztott hom-

lokzati szerkezetek e feladatra is megfelelnek-e. Példaként a kávézóra vonatkozó méretezés megtalálható a következőkben.

A zajhatárérték külön szabályozza a gépészeti eredetű, külön a szomszédos helyiségekből származó és külön a közlekedési eredetű zajt. A III. méretezési részfeladatban ismertetett lépéseket elvégezve a példa eredménye azt mutatja, hogy a zajkibocsátás szempontjából meghatározott hangszigetelési igények alapján kiválasztható határolószerkezetek egyúttal a közlekedési zaj elleni szükséges védelmet is megoldják. Meg kell azonban jegyezni, hogy a példában a belső térbe zajt sugárzó felület nemcsak az ablak és ajtó, hanem a falazott rész is.

VII. Épületgépészeti munkarész:

védelem a klímaberendezésének zajától

A kávézó elkülönült tulajdoni egység az épületen belül, ezért a kültéri klímaberendezés által okozott környezeti zajt nemcsak a szomszédos és szemközti épületek előtt korlátozza zajterhelési határérték, hanem a saját épület emeleti ablakai előtt is. Ez a legkedvezőtlenebb eset, ezért erre kell méretezni: olyan berendezést kell választani, amelynek A hangteljesítményszintje nem okoz zajterhelési határérték túllépést. Miután a kiinduló számítás nem tartalmaz erősen frekvenciafüggő terjedési elemet, közvetlenül lehet A szintekben számolni. Ha a kávézó csak nappali időszakban működik, a zajterhelési határérték $L_{MÜ} = 55 \text{ dB}$, de ez több külső zajforrás eredő zaját korlátozza. A távolság a kültéri egység és az emeleti megítélési pont között $r = 3 \text{ m}$, a sugárzási térszög π , a megengedhető akusztikai teljesítmény a (10.5) összefüggésnek megfelelő lesz. Az 5 dB ismét azért jelenik meg, mert több külső zajforrás hatásával kell számolni. Az eredmény azt jelenti, hogy olyan berendezést kell választani, amelyeknek az A hangteljesítményszintje egész dB-re kerekítve 64 dB-nél kisebb.

$$L_{wA} = 55 + 10 \cdot \lg(r^2 \cdot \pi) - 5 = 64,5 \text{ dB.} \quad (10.5)$$

Ha a kültéri egység éjszaka is működne, a megengedhető akusztikai teljesítmény 10 dB-lel kevesebb lenne, vagy azonos berendezést működtetve legalább 10 dB értékű zajscsökkentési megoldást kellene alkalmazni.

VIII. Épületgépészeti munkarész:

védelem a vízellátási berendezések zajától

A vízellátási berendezések által okozott zajt a napjainkban érvényes zajhatárértékek szerint úgy kell méretezni, hogy sem a saját lakás lakóhelyiségei-

ben, sem a szomszéd lakás lakóhelyiségeiben ne keletkezzen emiatt zajhatárérték-túllépés [I. [I.5] szerint a 7. fejezetben). A vízellátási berendezések által okozott zajra zárt alakú méretezési módszer nem áll rendelkezésre, az ismeretek empirikus jellegűek. Megoldásként általánosságban az írható elő a 9.9. alfejezet alapján, hogy a példában szereplő alaprajzi elrendezésekhez az I. minőségi osztályba tartozó vízellátási berendezéseket kell kiválasztani. Ezt mint követelményt be kell tartani:

- a két szélső nagy lakás fürdőszobájában a vele szomszédos lakószoba miatt;
- a kis lakás konyhájában, ha a szerelvények a lakáselválasztó falon vannak, és a csövek a lakáselválasztó falban futnak.

A nagy lakás előszobájára zajhatárérték nem vonatkozik, az nem zaj ellen védendő helyiség. Az alaprajzi elrendezés további sajátosságai miatt azonban a II. minőségi osztályt itt is elő kell írni.

Kivitelezéstechnológiai okok miatt gyakran a szerelvényeket az alapszerkezet mellé falazott szerelőfalban vezetik, és arra szerelik. Ennek – a jelenlegi ismeretek szerint – nincs olyan akusztikai hatása, hogy zajosabb szerelvényt lehetne választani. Előny csupán akkor keletkezne, ha az alapszerkezet fajlagos tömege csekély lenne, és ezért a szere-

lőfal értékelhető mértékben (legalább 50%) megnövelné a teljes falazat fajlagos tömegét [I. a (9.43) összefüggéseket].

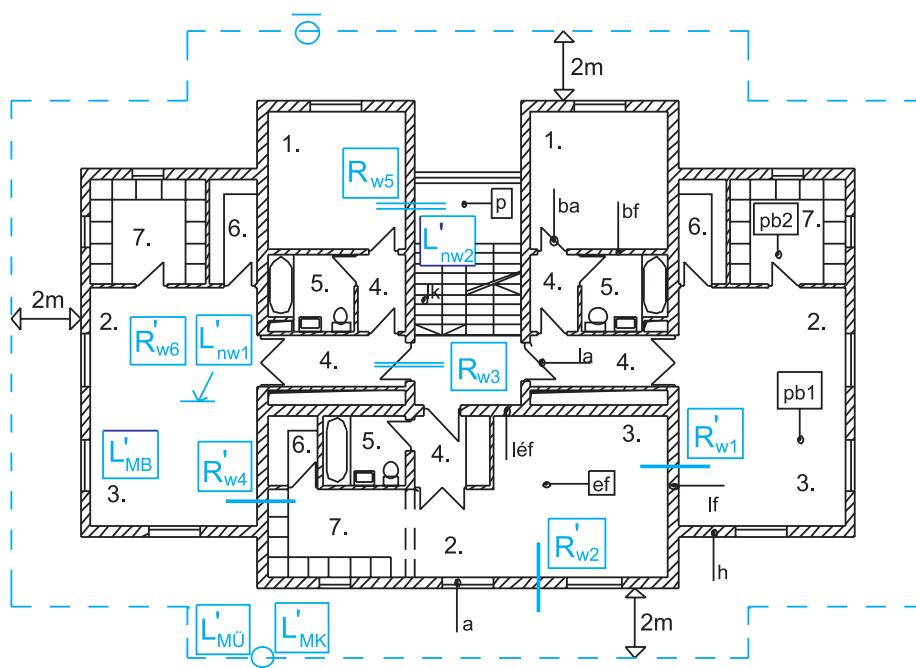
10.1.5. Összefoglalás

A példa részletes, de közelítő jellegű megoldása egyszerű számítások alapján történt, amelyek elvezettek a szerkezet-, az anyag- és a berendezéskiválasztáshoz. A kapott eredmények minden esetben függenek a helyiség méreteitől és a szomszédos épületek közötti távolságoktól, ezért nem általánosíthatók.

10.2. Kialakult városi környezetben levő, központi gépészeti berendezésekkel ellátott többlakásos lakóépület tervezésének akusztikai feladatai

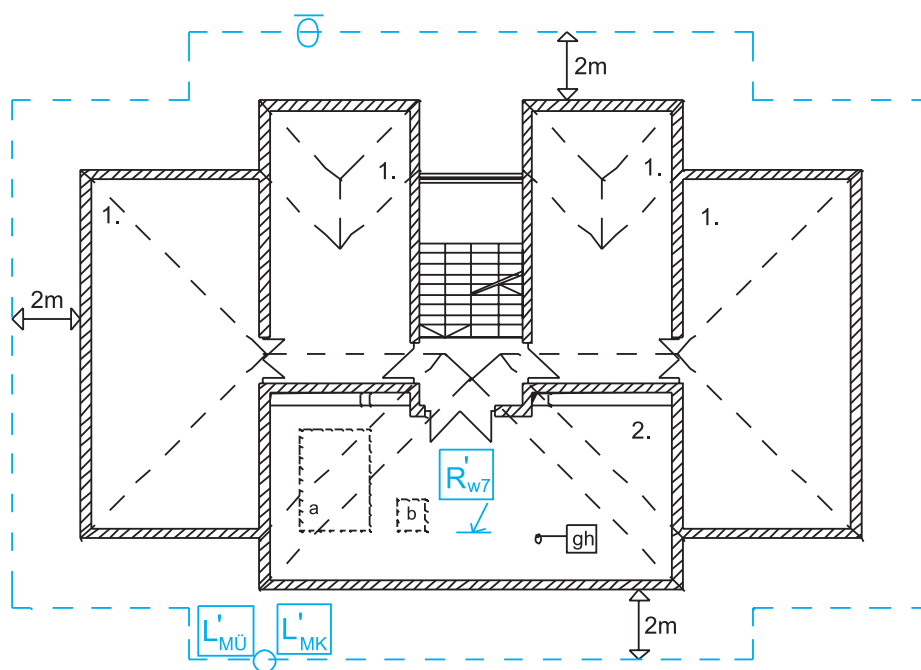
10.2.1. A feladat

A feladat kialakult városi környezetben levő telken többszintes, többlakásos lakóépület tervezése akusztikai feladatainak megoldása. A példaként kiválasztott környezet az egyszerűség kedvéért megegyezik az előző feladattal, a távolság mind a szomszédos épületek irányában, mind az út irányában azo-



10.12. ábra. Központi gépházat tartalmazó lakóépület általános emeleti alaprajza

1. szoba; 2. étkező; 3. nappali; 4. előtér; 5. fürdő; 6. kamra; 7. konyha; ef emeletközi földem; pb1 padlóburkolat; pb2 padlóburkolat; p lépcsőpihenő; lk lépcsőkar; h homlokzati fal; léf lépcsőházi fal; If lakáselválasztó fal; bf belső válaszfal; a ablak; ba belső ajtó; la lakásbejárat ajtó



nos, így a helyszínrajz is azonos. Az akusztikai tervezés részfeladatai az engedélyezési tervhez kapcsolódnak, a részletek a kiviteli terv kidolgozása során szükségesek.

A lényeges eltérés abban van, hogy az épületben központi gépház, kazánház található. A gépházban egy kazánt és egy keringtetőszivattyút telepítettek. A kazán tömege a példa kedvéért 650 kg, A súlyozású hangteljesítményszintje a példában $L_{WGA1} = 80$ dB, a keringtetőszivattyú tömege 50 kg, A súlyozású hangteljesítményszintje $L_{WGA2} = 60$ dB, első közelítésben a jelen példában elhanyagolható a kazánházhoz képest. A kazánház belső teréből 20×20 cm méretű szellőzőnyílás nyílik a külső tér felé. A kazán kéményének mint kültérben működő hangforrásnak az A hangteljesítményszintje a példában $L_{WNA1} = 90$ dB.

10.5. táblázat. Épületen belüli akusztikai követelmények

Szint számértéke	Jel	Értelmezés	A követelmény
I. em.	L_{MB1}	A lakás lakóhelyiségeiben zajhatárérték, a közlekedésre külön és valamennyi szomszédos lakás vízellátási berendezéseire, valamint a központi gépészetre külön [I.5]	nappal: 40 dB éjszaka: 30 dB
I. em.	L_{MB2}	A lakás konyhájában zajhatárérték a közlekedésre külön és valamennyi szomszédos lakás vízellátási berendezéseire, valamint a központi gépészetre külön [I.5]	nappal: 45 dB éjszaka: 45 dB
Padl. → em.	R'_{w7}	A gépház és a lakás közötti födém súlyozott helyszíni léghanggátlási száma	a gépházba kerülő berendezések akusztikai minőségétől függ

erősséggel” rendelkeznek, tehát csak a gyakorlati tapasztalatok adnak útmutatást arra, hogy mikor és milyen megoldású testhangszigetelésre – rezgést szigetelő gépalap, rugalmas lábak stb. alkalmazására – van szükség.

A feladat közelítő, elvi megoldásait ismertetik a további részek. E megoldások kiválasztása számítások alapján történik, amelyeknek csak a szerkezetválasztást megalapozó, ezért közelítő részletei szerepelnek. A szerkezetválasztás után az ellenőrző számítások elvégzése szükséges és indokolt.

Az e példát bemutató módosult emeleti alaprajz a 10.12. ábrán, a tetőszint alaprajza a 10.13. ábrán, a metszet pedig a 10.14. ábrán látható.

10.2.2. Akusztikai követelmények

A 10.1. és 10.2. részben szereplő feladat azonos adatai miatt az akusztikai követelmények lényegében megegyeznek az előző feladattal, az eltéréseket a központi gépészet megjelenése indokolja. A 10.5. táblázat a gépház miatt módosult értelmezésű, vagy az új, épületen belüli akusztikai követelményeket foglalja össze.

10.2.3. Elemzés

Az előzőekben az alaprajzi elrendezés alapján tett megállapításokat a gépház megjelenése miatt kell kiegészíteni:

- a gépházi berendezések – kazán, keringtetőszivattyúk, csővezetékek stb. – jelentős léghangforrások; ezen túlmenően a szerkezeti kapcsolatok miatt az épületszerkezeteket közvetlenül is rezgésbe hozzák; a zajforrás közvetlenül lakószobával szomszédos, éjszaka is működik, ezért a példában szereplő alaprajzi elrendezés előnytelen, bár általánosan elterjedt.

10.2.4. Tervezési lépések, eredmények

I. Szerkezet és statikai tervezés: rezgésszigetelő gépalap a födémén keresztül vezető hangterjedés csökkentésére

A gépház és az alatta levő lakás közötti födém kétféle akusztikai terhelés éri:

- léghangterhelés, amelynek forrása a gépházban kialakuló átlagos hangnyomásszint;
- a gépház berendezései, jelen esetben a kazán és a keringtetőszivattyú által okozott rezgésterhelés.

Általános esetben tehát a gépházi berendezések részben léghangforrások, részben testhangforrások. A léghangforrások hangszigetelésére több lehetőség kínálkozik:

- a födém helyszíni léghanggátlásának növelése;
- a gépház helyiségében az egyenértékű hangelnyelési felület növelése, ami szintén lecsökkenti a födém akusztikai terhelését.

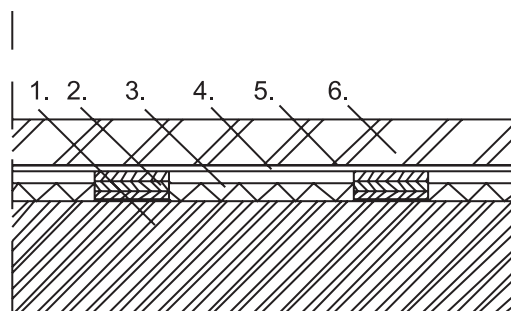
A födémre érő testhangterhelés rezgésszigetelő gépalappal csökkenthető. A gyakorlatban nem állnak rendelkezésre a gépházi berendezések mint rezgésforrások rezgésteljesítmény-adatai, nincs szakmai közmegegyezés a termékjellemző megnevezésében, értelmezésében sem. Így szabványos vizsgálati módszert sem dolgoztak még ki a rezgésforrások teljesítményének vizsgálatára. A rezgésszigetelő gépalap szükségessége analóg szituációk tapasztalatai alapján, esetleg berendezésgyártók telepítési előírásai alapján bírálható el. A rezgésszigetelő gépalapnak azonban több előnye van: nemcsak a födém közvetlen rezgésgerjesztését csökkenti le, hanem megnöveli a födémén keresztül vezető hangterjedési utak léghanggátlását. A csekély mértékű többletköltség mellett hátrány a többletterhelés, de ez a tervezés időszakában egyszerűen figyelembe vehető.

A rezgésszigetelő gépalap igényesebb esetekben rugókra állított vasbeton tömb, amelyre a rezgésforrásként működő gépet rögzítik. A rugók kiválasztásánál és méretezésénél több tényezőt kell fi-

gyelembé venni: a terhelést, a gép jellemző működési frekvenciáját, az egyéb hatásokat (hőmérséklet, nedvesség, olaj stb.). A terhelést a vasbeton lemez, a szigetelendő gép és a csatlakozószerelvények együttesen hozzák létre. Első közelítésben, akusztikai hatását tekintve a rezgésszigetelő gép-alap tömeg-rúgó rendszerként modellezhető.

Egyszerű kivitelezése miatt csábító műszaki megoldást jelent, ha a gépalap úsztatott vasbeton aljzatként készül, teljes felületen rúgóként működő szálas szigetelőanyag vagy műanyaghab lemezre fekszik. Ha például az aljzat 12 m^2 felületen készül el, $0,1 \text{ m}$ vastag, a ráállítandó berendezések teljes tömege 700 kg , a rugalmas lemezre jutó fajlagos terhelés mintegy $2,9 \text{ kPa}$, önmagában nem sok. Azonban azokkal a szálas szigetelőanyagokkal vagy műanyaghab lemezekkel, amelyek kitehetők e tartós terhelésnek, általában nem lehet vagy csak túlzottan vastag lemezzel lehetne a rezonanciafrekvenciát kellően kicsire állítani.

Kissé költségesebb, de sokkal hatékonyabb a 10.15. ábrán általános rétegrendjével bemutatott megoldás. A vasbeton alap cementkötésű faforgács lapból készült, bennmaradó zsaluzatként működő formába kerül, amely alatt pontonkénti megtámasztással rugóhasábok találhatók. A hasábok anyaga, alapterülete és magassága méretezés kérdése. A pontonkénti megtámasztást a terhelés felületi eloszlásának figyelembevételével kell kialakítani. Csak első közelítésként lehet az egyenletes eloszlást és a felület mentén állandó terhelést együttesen feltételezni. A példa kedvéért a 12 m^2 alapterületű alapon a megtámasztásokat 1 m -es hálóban elhelyezve, általános helyen $10 \times 10 \text{ cm}^2$ alapterületű, az élek mentén $5 \times 10 \text{ cm}^2$, a sarkoknál $5 \times 5 \text{ cm}^2$ alátámasztásokkal a teljes alátámasztás $12 \text{ db } 10 \times 10 \text{ cm}^2$ alapterületű elemmel egyenértékű. Az összes rugalmas megtámasztásra jutó fajlagos terhelés kerekítve $0,283 \text{ MPa}$.



10.15. ábra. Testhangszigetelő tömbalap

1. monolit vb. földem; 2. rezgésszigetelő rugók; 3. szálas szigetelőanyag; 4. cement kötésű faforgács lap; 5. technológiai szigetelés; 6. vasalt monolit beton aljzat

A CDM termékválasztékának CDM-CR családjából a 01 jelű termék ilyen mértékben már nem terhelhető, a CD-15 azonban igen. 40 mm vastag elemeket készítve a rezonanciafrekvencia 13 Hz körül lesz, ez az égési zaj frekvenciajellegéhez képest már elegendően kicsi. A terhelés hatására az összenyomódás mintegy 3 mm . Az eredő fajlagos dinamikai merevség $0,2 \text{ MN/m}^3$. Ennél szerencsésebb választás a CDM-HR család CDM-79 terméke, amellyel a 20 mm vastagságban már 11 Hz rezonanciafrekvencia érhető el.

Több előnye van annak a változatnak, amelyben csak a két zajforrás alá készül önálló gépalap. Ismét példaként, ha a kazán alatt 4 m^2 alapterületű, 10 cm vastag aljzatbeton. Teljes felületű alátámasztáshoz a fajlagos terhelés mintegy $4,1 \text{ kPa}$, ennél kedvezőbb tehát az előző rendszerben elrendezett alátámasztás. A keletkező fajlagos terhelés mintegy 403 kPa , erre kevesebb, de jobban terhelhető rugóhasáb választandó. A célszerű típus a CDM-15, lemez vastagsága terheletlen állapotban 20 mm . A keletkező rezonanciafrekvencia közelítőleg 11 Hz .

A rugalmas lemez kiválasztásához néhány további szempontot is figyelembe kell venni a méretezés során, pl.:

- a víz, olaj elleni szigetelés megoldása;
- a gép megengedhető mozgása;
- a csővezetékek, szerelvények rugalmas rögzítése.

A léghangszigetelés megoldásának mérlegelése szintén közelítő számítással kezdődik. A gépházat diffúz hangterű helyiségnek tekintve az ott kialakuló átlagos hangnyomásszint a (10.6) összefüggéssel határozható meg, ha L_{WGAk} jelöli a k indexű gép A hangteljesítményszintjét, és L_{Ae} a gépház eredő egyenértékű A hangnyomásszintjét. Az összefüggés azt a már megismert tendenciát tükrözi, hogy az egyenértékű hangelnyelő felület növelésével az átlagos hangnyomásszint csökkenthető. A kiinduló állapotban a gépház belső határolófelületei vakolt vagy simított betonfelületűek, közelítő hangelnyelési tényezőjük $\alpha = 0,03$, ezért az átlagos A hangnyomásszint közelítőleg $83,2 \text{ dB}$:

$$L_{Ae} = 10 \cdot \lg \left(\sum_k 10^{0,1 \cdot L_{WGAk}} \right) + 10 \cdot \lg \left(\frac{4}{A_e} \right) \quad (10.6)$$

A szomszédos, zaj ellen védendő helyiség átlagos A hangnyomásszintje, L_{A2} közelítőleg a (10.7) képlettel számítható ki, amelynek fizikai alapjai többek között az 5.7. és 6.11. alfejezetben találhatók:

$$L_{A2} \approx L_{Ae} - R'_w + 10 \cdot \lg \left(\frac{S \cdot T}{0,16 \cdot V} \right) + 5; \quad (10.7)$$

ahol a gépház és az alatta levő helyiség közös felülete S ; a védendő helyiség térfogata V ; utözengési ideje T ; a födém helyszíni súlyozott léghanggátlási száma $R'_{w'}$.

Kiindulóállapotban, tehát amikor a gépházban nincs rezgésszigetelő gépalap és a födém 20 cm vastag monolit vasbeton szerkezetű, a helyszíni súlyozott léghanggátlási szám értéke mintegy 54 dB. Így L_{A2} közelítő értéke a folyamatos működés alatt 33, dB, ez meghaladja a zajhatárértéket, l. a 10.5. táblázatot. Az egyik zajcsökkentési lehetőség a gépházban az egyenértékű hangelnyelési felület megnövelése. Ha például $\alpha = 0,5$ átlagos hangelnyelési tényezővel a gépházban hangelnyelő álmennyezet készül, akkor a gépház átlagos A hangnyomásszintje közelítőleg 77,8 dB-re csökken, a védendő lakásban a keletkező A hangnyomásszint pedig 28,2 dB lesz. Ez már a zajhatárérték alatt van, és frekvenciafüggő számítással eldönthető, hogy a pontosabb számított eredmény határérték alatt lesz-e vagy sem. Ugyanez lesz a számított eredmény akkor, ha a testhangszigetelő gépalap nem a gépház teljes felületén készül el.

A gépház teljes alapterületén kivitelezett rezgésszigetelő gépalap a helyszíni léghanggátláson a tapasztalatok szerint legfeljebb 3 dB mértékben javít, tehát önmagában nem oldja meg a léghang elleni szigetelést, csupán a méretezés biztonságát növeli.

II. Szerkezettervezés, gépészeti tervezés: a gépházba kerülő berendezések rögzítése, a csővezetékek megoldása

A rezgésszigetelő alap csak akkor hatásos, ha a szerelvények, vezetékek nem hidalják át a rugalmas szigetelést. Ezért ilyen esetekben a vezetékekbe rugalmas közdarabokat kell iktatni, a rögzítéseket is rugalmas elemekkel kell megoldani.

A gépház födémjén áthaladó csővezetékeket a léghang szempontjából is tömören kell megoldani. Másképpen a léghangszigetelés kiválasztott megoldásai hatástalanok maradnak.

III. Szerkezettervezés, gépészeti tervezés: a gépház külső határolószerkezeteinek, nyílásainak méretezése a zajkibocsátás csökkentésének szempontjából

A gépház belső terei zajkibocsátásnak méretezése során a külső tér felől, tehát a szomszédos, zaj ellen védendő épületek felől nézve az alábbi hangforrásokat, ill. hangterjedési utakat kell figyelembe venni:

- kazánkérmény;
- kazánház szellőzőnyílása;
- kazánház külső határolószerkezetei.

Ezek zajcsökkentését együttesen kell mérlegelni, mert a zajt keltő okok technológiai szempontból egymáshoz kapcsolódnak. Az együttes mérlegelés a berendezés típusának kiválasztását, a határolószerkezetek meghatározását, a gépház légtere szellőztetésének, a friss levegő pótlásának, a hangtompítók kiválasztásának megoldását jelentik.

Általános megoldás a sokféle gép és határolószerkezet miatt nem adható, legfeljebb az dönthető el gyakorlati tapasztalatok alapján, hogy várható-e szokványos megoldásokkal akusztikai probléma vagy sem. Az [I.7] rendelet egyébként már az engedélyezési tervhez is az akusztikai minőség számításos igazolását írja elő akkor, ha a tervezett épületben zajforrások találhatók.

A következő megoldás a 9.10. alfejezetben ismertetett [III.1] méretezési módszer alkalmazásán alapul. A módszert azonban ki kell egészíteni úgy, hogy a gépház belső terében kialakuló átlagos hangnyomásszint meghatározható legyen, erre a helyiség belső terének diffúzterei közelítése alkalmas a 2.6.4. pontban foglaltaknak megfelelően. A gépház átlagos A hangnyomásszintjét a (10.6) összefüggés adja meg.

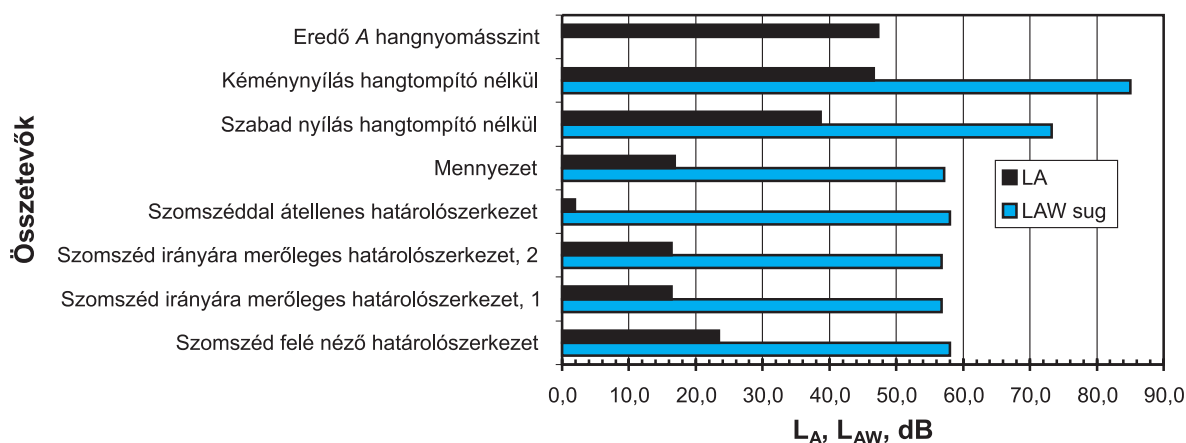
A gépház egy külső határolószerkezete által lesugárzott akusztikai teljesítményt, L_{WSAi} -t, a (9.45) összefüggés segítségével lehet meghatározni.

Légbeszívó és -kifúvó nyílás mint a külső tér felől önálló zajforrások által lesugárzott A hangteljesítményszint, L_{WSAj} a (10.8) összefüggéssel számítható ki, feltéve, hogy nyílás mögötti berendezés rész A súlyozású hangteljesítményszintje L_{WNAj} , a nyílásra szerelt hangtompító A súlyozású csillapító hatására ΔL_{Aj} . A nyílás mögötti berendezésrész hangteljesítményszintje már a berendezés technológiai adata, elvileg katalógusban megtalálható, természetesen a berendezés üzemállapotától is függ:

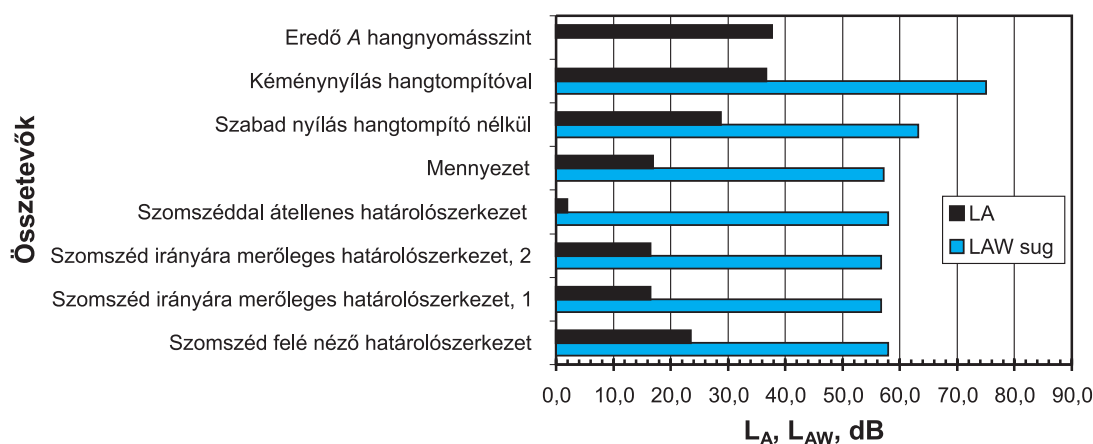
$$L_{WSAj} = L_{WNAj} - \Delta L_{Aj}. \quad (10.8)$$

Az összefüggés szerint a kültérből önálló hangforrásnak tekintendő berendezés, elem által lesugárzott teljesítményt hangtompítóval – esetleg más műszaki megoldással – le lehet csökkenteni. A hangtompítók felszerelése visszahathat a gép működésére, ezért csak a teljes gépet áttekintve lehet e megoldást alkalmazni.

A mérési, megítélési pontban kialakuló A hangnyomásszint meghatározásához a távolsági csillapítást [(9.48) összefüggés], a térszög miatti korrek-



10.16a ábra. Zajösszetevők és eredő a kiindulóadatokkal a szomszédos épület homlokzata előtt



10.16b ábra. Zajösszetevők és eredő a zajcsökkentési javaslat szerint a szomszédos épület homlokzata előtt

ciót [(9.50) összefüggés], a hangvisszaverődések és az önárnyékolás hatását együttesen kell számítani.

A léghanggátlás és az árnyékolási csillapítások erősen és eltérő jelleggel frekvenciafüggők, ezért a kiválasztott megoldásokat legalább oktávsvávonként, tehát frekvenciafüggő számítással kell ellenőrizni. A gépház környezeti zaj szempontjából szerkeszthető „drótmmodellje”, azaz a határolósíkok metszsvonalainak ábrája megegyezik a 9.21. ábrán láthatóval.

A 10.16a ábrán a kiinduló adatfelvétel eredményei láthatók: az egyes zajforrások környezetbe le sugárzott A hangteljesítményszintje, valamint az A hangnyomásszintje és az eredő A hangnyomásszint. Az eredő A hangnyomásszint a közelítő számításban néhány dB mértékig meghaladja az éjszakai időszakra vonatkozó zajhatárértéket, ezért zajcsök-

kentésre van szükség. Az ábrán az is látható, hogy a szabad nyílás és a kémény a két meghatározó hangforrás. Ezek zajcsökkentését 10–10 dB mértékig a szerkezeti szempontból megfelelő hangtompítókkal meg lehet oldani. Néhány kazángyártónak a kéménybe iktatható hangtompítója önálló gyártmányként létezik is. A 10.16b ábra a zajcsökkentés eredményét mutatja. Látható, hogy a számítás szintjén a hangtompítók alkalmazása eredményes volt. A 9.1. ábrának megfelelően a további ellenőrzés során először a pontos, frekvenciafüggő számítást kell elvégezni, majd gyártmányokat és telepítési módokat kiválasztva a feladatot teljes egészében megoldani. A 9.1. folyamatábrán látható visszacsatolásokra a jelen példában akkor lenne szükség, ha például a hangtompítók alkalmazásának technológiai akadálya lenne.

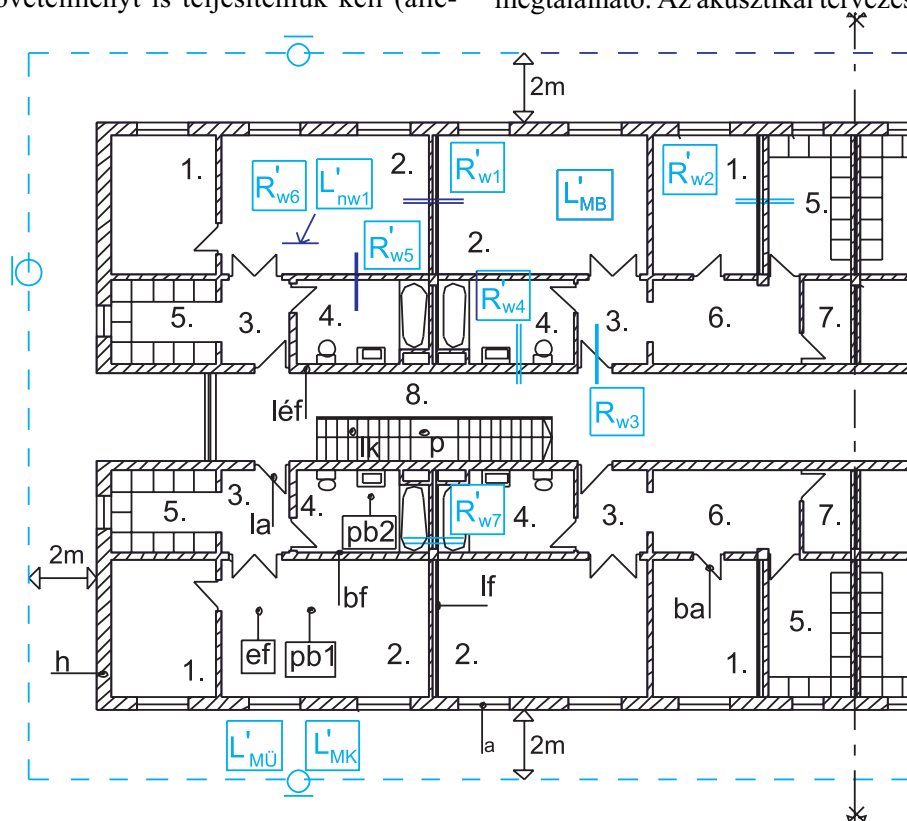
10.3. Egymás melletti lakások helyiségei közötti léghangszigetelés megoldása rugalmas peremkapcsolatokkal kivitelezett, kéthéjű falakkal

10.3.1. A feladat

A hazai tervezési-kivitelezési gyakorlatban örökzöldként visszatérő téma a kettős falak alkalmazása hangszigetelési céllal. Az igény akkor merül fel, ha a legegyszerűbb megoldás, tehát az elegendően nagy fajlagos tömegű szerkezet teherbírasi okok miatt nem jöhet számításba. A 4.5. alfejezetben ismertetettek alapján nyilvánvaló, hogy a merev peremkapcsolatok miatt a kéthéjű fal akusztikai szempontból egyhéjűként működik, tehát hanggátlása egyáltalán nem lesz elegendő. A szerkezetnek számos más hátránya is van, az egyes épületben kialakuló födémlehajlásokkal kapcsolatosan. A rugalmas peremkapcsolatok e gondok egy részét megoldják, jó méretezés esetén hangszigetelésük lehetővé teszi a 7.2.7. pontban található hangszigetelési követelmények teljesítését. Ugyanakkor fel kell hívni a figyelmet arra, hogy a lakáselválasztó falak nem csupán akusztikai szerkezetek, ezért számos más követelményt is teljesíteniük kell (állé-

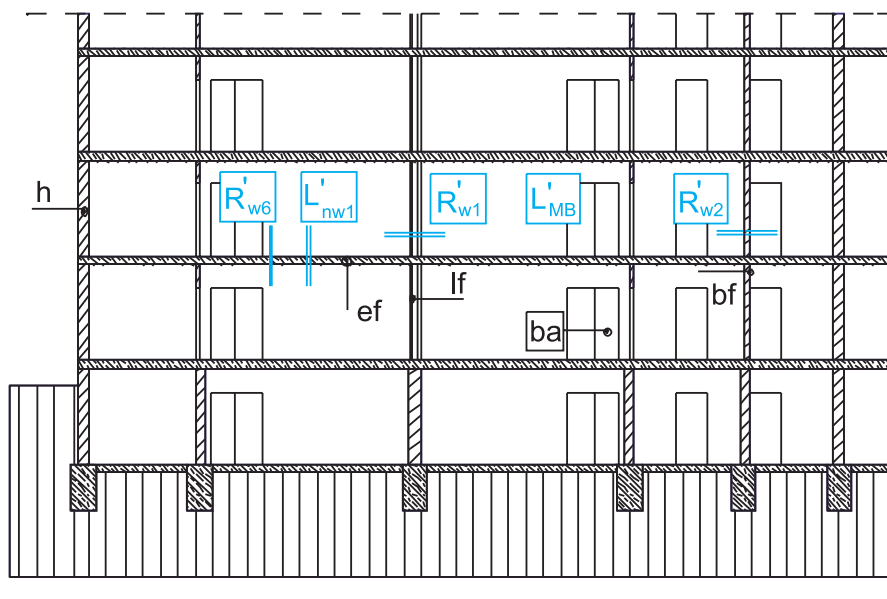
konyság, mechanikai szilárdság, tűzgátlás, használati biztonság stb.). Némely esetben a szerkezetek érzékenysége miatt e tulajdonságok fokozottabb hangsúlyt kaphatnak, és indokolt az általános szabályra gondolni: a nem akusztikai tulajdonságokat szintén laboratóriumi vizsgálatok alapján kell elbírálni, és erre feljogosított tanúsító szervezet által kiállított műszaki alkalmazási engedélyben kell bizonyítani. Enélkül a szerkezetet nem szabad a gyakorlatban alkalmazni.

A rugalmas peremkapcsolatokat tartalmazó kéthéjű fal alkalmazásának egy példáját a 10.17. ábrán látható alaprajz és a 10.18. ábrán látható metszet mutatja be. Az épület középfolyosós elrendezésű, a folyosó két oldalán kis alapterületű lakások találhatók. A lakások a lakáselválasztó falra (jele lf) szimmetrikus, azonos funkciójú helyiségek kerültek egymás mellé. A feladat és ennek megfelelően az ábrák is alapvetően a belső hangszigetelést befolyásoló szerkezetek kiválasztására irányulnak, tehát a vizsgálandó épület környezete vagy a technikai berendezések nem szerepelnek. Természetesen a valóságban több további részfeladatot is meg kell oldani, ezek áttekintése az előző két pontban megtalálható. Az akusztikai tervezés feladatait meg-



10.17. ábra. Lakóépület alaprajzi részlete, ahol rugalmas peremkapcsolattal kivitelezett, kéthéjű falak alkalmazhatók

1. szoba; 2. nappali; 3. előtér; 4. fürdő; 5. konyha; 6. közlekedő; 7. gardrób; 8. lépcsőház; ef emeletközi födém; pb1 padlóburkolat; pb2 padlóburkolat; p lépcsőpihenő; lk lépcsőkar; h homlokzati falazat; lf lakáselválasztó fal; la lakásbejárat; ba belső ajtó; bf belső válaszfal;



10.18. ábra. Lakóépület metszetének részlete, ahol rugalmas peremkapcsolattal kivitelezett, kéthéjú falak alkalmazhatók
ef emeletközi födém; ba belső ajtó; h homlokzati falazat; lf lakásválasztó fal; bf belső válaszfal

határozó követelmények bemutatása érdekében azonban a 10.3.2. pont az akusztikai követelményeket teljesebb körben ismerteti.

10.3.2. Akusztikai követelmények

A feladattal összefüggő akusztikai követelmények közül az épületen kívüli és az épületen belüli zajhatárértékek, valamint a hangszigetelési követelmények értelemszerű jelölése is megtalálható az alaprajzon és metszeten. E követelmények értelmezését a 10.6. táblázat foglalja össze.

10.3.3. Elemzés

Az alaprajzi elrendezés szerencsésen elválasztja egymástól a lakás akusztikai szempontból igényes, zaj ellen védendő területeit az épület zajos belső közlekedő területeitől. A konyha és fürdőszoba mint pufferterületek elhelyezését a lakóhelyiségek zaj elleni védelme érdekében az alaprajz előnyösen alkalmazza.

A konyhában és a fürdőszobában a szerelvények és vezetékek elhelyezhetők úgy, hogy kisebb igényű szerelvényeket lehessen legyen alkalmazni a zaj elleni védelem érdekében (l. a 9.9. alfejezetet).

10.6. táblázat. Épületen kívüli és belüli akusztikai követelmények (l. a 10.17. és 10.18. ábrát)

Ábra	Jel	Értelmezés	A követelmény ismertetése
A	$L'_{M\bar{U}}$	A vizsgálandó épület környezetében működő üzemi zajforrások zaját korlátozó határérték	A környezetének területi besorolásától függ, l. a 7.2.2. pontot
A	L'_{MK}	A vizsgálandó épület környezetében a közlekedés zaját korlátozó határérték	A környezetének területi besorolásától függ, l. a 7.2.4. pontot
A, M	L_{MB}	A vizsgálandó épület helyiségeiben az üzemi zajt korlátozó határérték, a közlekedéstől származó zajt korlátozó határérték és az épületen belüli, ipari és szolgáltatótevékenységek által keltett zajt korlátozó határérték külön-külön	L. a 7.2.5. pontot
A, M	R'_{w1}	Az azonos szinten szomszédos lakások helyiségei között a léghanggátlásra vonatkozó követelmény	L. a 7.2.7. pontot, ≥ 52 dB
A, M	R'_{w2}	Lakáson belüli szomszédos helyiségek között a léghanggátlásra vonatkozó követelmény, ha a két helyiség közötti falban nincs ajtó	L. a 7.2.7. pontot, ≥ 37 dB

Ábra	Jel	Értelmezés	A követelmény ismertetése
A	R_{w3}	A lakásbejáratú ajtó súlyozott léghanggátlási számának legkisebb értékét előíró követelmény	L. a 7.2.7. pontot, ≥ 37 dB
A	R_{w4}	Lakás és közlekedőterület, belső folyosó közötti fal hangszigetelési követelménye	L. a 7.2.7. pontot, ≥ 52 dB
A	R'_{w5}	Mint R'_{w2}	L. a 7.2.7. pontot, ≥ 37 dB
A	R'_{w6}	Egymás felett levő lakások közötti léghangszigetelési követelmény	L. a 7.2.7. pontot, ≥ 52 dB
A	R'_{w7}	Egymás melletti lakások helyiségei között a léghanggátlás követelménye, megegyezik R'_{w1} -gyel	L. a 7.2.7. pontot
A	R_{w8}	Belső ajtó súlyozott léghanggátlási számának legkisebb értékét előíró követelmény	L. a 7.2.7. pontot, ≥ 27 dB
A, M	L'_{m1}	A lakások közötti földem súlyozott helyszíni szabványos lépéshangnyomásszintjére vonatkozó követelmény	L. a 7.2.7. pontot, ≤ 55 dB

Az épület alaprajzi elrendezése a közlekedési zaj elleni védelem elérésére előnytelen, hiszen vannak olyan lakások, amelyeknek mindkét lakóhelyisége az épület zajforrás felőli oldalára kerül. Ez természetesen az épület tájolásától is függ.

10.3.4. A lakások közötti hangszigetelés megoldása rugalmas peremkapcsolatokkal kivitelezett, kéthéjús falszerkezetekkel

A kiinduló szerkezetválasztás az akusztikai minőséget befolyásoló épületszerkezetekre a következő:

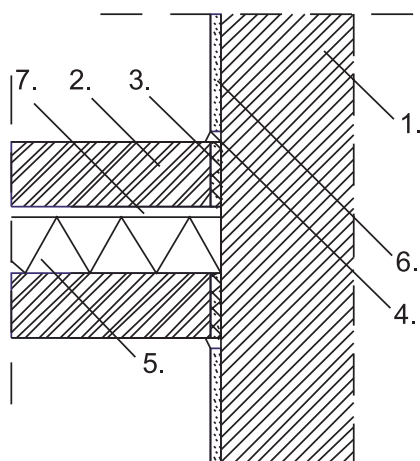
- *h* homlokzat: a hőtechnikai igényeknek is eleget tevő szerkezet, a falazat fajlagos tömege alapján becsült súlyozott léghanggátlási száma legyen 52 dB vagy nagyobb, l. a 4.19. ábrát;
- *ef* emeletközi földem: pl. 20 cm vastag monolit vasbeton földem;
- *léf* lépcsőház, közlekedőterület és lakás közötti falazat: olyan falazóelemet kell választani, amelynek kerülőutak nélküli laboratóriumban mért súlyozott léghanggátlási száma meghaladja az 52 dB-t;
- *bf* lakáson belüli válaszfal: pl. az ALBA termék-választékából 10 cm vastag normál gipszlap;
- *lf* lakáselválasztó fal: rugalmas peremkapcsolatokkal kivitelezett kéthéjús fal, pl. különböző ALBA gipsz falazólappokból, l. a 10.19. és 10.20. ábrát;
- *pb1*, *pb2* padlóburkolat a lakóhelyiségekben: a feladat megoldásához előnyös az úszópadló kiválasztása, amelyre a helyiség és a lakók igényeinek megfelelő járóréteg kerülhet; olyan szerkezetet kell

választani, amelynek a laboratóriumi körülmények közötti meghatározott termékjellemzője, $\Delta L_w > 25$ dB, ilyen szerkezet keletkezik szakszerű kivitelezés eredményeként, ha az 5 cm aljzatbeton és a technológiai szigetelés alá ISOVER TANGO TDP 20/15 vagy annál jobb minőségű lépéshang-szigetelő lemez kerül, a járóréteg tetszőleges lehet;

- *ba* lakóhelyiségek ajtaja lakáson belül: olyan ajtót kell választani, amelynek termékjellemzője, azaz a kerülőutak nélküli laboratóriumban meghatározott súlyozott léghanggátlási szám nagyobb, mint 27 dB;
- *la* lakásbejáratú ajtó: olyan ajtót kell választani, amelynek termékjellemzője, azaz a kerülőutak nélküli laboratóriumban meghatározott súlyozott léghanggátlási szám nagyobb, mint 37 dB.

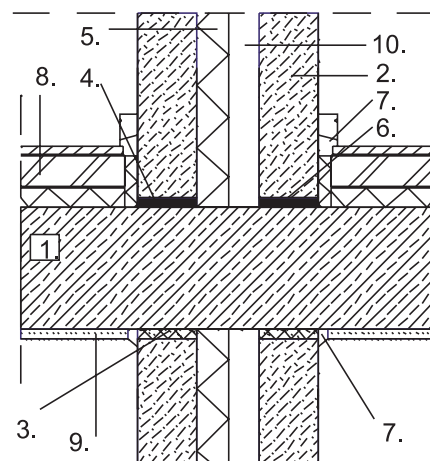
A tapasztalatok alapján a laboratóriumi és a helyszíni veszteségi tényező közötti eltérés az egyes hangterjedési utakban 1–3 dB hanggátlás-növekménnyel vehető figyelembe, ebben a példában a fizikai sajátosságot a számításban érvényesíteni kell, l. a 9.3. és 9.4. alfejezeteket.

A 10.19. ábra homlokzat és kettős fal csatlakozásánál kialakuló csomópont, a 10.20. pedig az úszópadlónál kialakuló csomópont elvi ábrája. Megfigyelhető pl. az, hogy a kettős fal alsó élei mentén, ahol a rugalmas elválasztórétegre sokkal nagyobb terhelés hat, mint az oldalsó szélek mentén, más anyagból készül a rugalmas réteg, mint a függőleges és a felső vízszintes szél mentén. A szálas szigetelőanyag a belső légrést csak lazán tölti ki. A két falréteg eltérő vastagságú és testsűrűségű gipsz falazólappal készül, ebben a minőségi kategóriá-



10.19. ábra. Rugalmas peremkapcsolattal kivitelezett kettős fal homlokzati csomópontjának elvi ábrája

1. tetszőleges kialakítású homlokzati falazat; 2. gipsz alapanyagú kettős válaszfal (az egyik réteg 8 cm ALBA-ORTH normál falazólapból, a másik 10 cm ALBA ORTH akusztikus lapból készül); 3. 5 mm vastag, zárt cellás lágy műanyaghab, Edin $\leq 0,1$ MPa; 4. tartósan képlékeny tömítés; 5. szálás szigetelőanyag-kitöltés, pl. ISOVER TF 40 műszaki filc; 6. vakolat; 7. légrés, összvastagsága a szigetelőanyag-kitöltéssel együtt legalább 5 cm



10.20. ábra. Rugalmas peremkapcsolattal kivitelezett kettős fal és úszópadló csomópontjának elvi ábrája

1. vasbeton födém; 2. gipsz alapanyagú kettős válaszfal (az egyik réteg 8 cm ALBA-ORTH normál falazólapból, a másik 10 cm ALBA ORTH akusztikus lapból készül); 3. 5 mm vastag, zárt cellás lágy műanyaghab, Edin $\leq 0,1$ MPa; 4. terhelhető rugalmas réteg, Edin $\leq 3,5$ MPa a terhelés alatt; 5. szálás szigetelőanyag-kitöltés a légrésben, pl. ISOVER TF 40 műszaki filc; 6. technológiai szigetelés; 7. tartósan képlékeny kitöltés; 8. úsztatott padló-szerkezet; 9. vakolat; 10. légrés, összvastagsága a szigetelőanyag-kitöltéssel együtt legalább 5 cm

ban már értelme van a különböző lapok alkalmazásának.

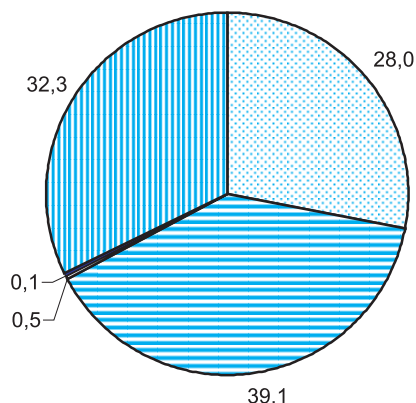
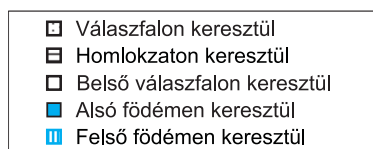
A helyszíni súlyozott léghanggátlási szám meghatározásánál a 9.3. alfejezetben foglaltak szerint kell eljárni. Ennek azonban az a feltétele, hogy a rugalmas elválasztó rétegek vastagsága és rugalmassági modulusa megfeleljen a 10.6. és 10.7. táblázatban közölt értékeknek. Ha ugyanis az anyag- és vastagságválasztás megfelelő, akkor csak öt hangátviteli iránnyal kell számolni, a rugalmas peremkapcsolatok a válaszfalat leválasztják az átmenő-szerkezetekről. További lényeges szempont a belső válaszfal–lakáselválasztó fal csatlakozásmegoldásának módja. Ha a belső válaszfal átmenő-szerkezet lenne, akkor az a helyiségek közötti hanggátlást dur-

ván lerontaná. Ezért a belső válaszfalat csak a lakáselválasztó falnak a helyiség felőli rétegéhez szabad csatlakoztatni. Ebben az esetben a két lakásban elhelyezkedő belső válaszfal között a rezgésebes-ségszint-különbség a többszörös csomóponti átmenet miatt meghaladja a 30 dB-t. Az úszópadló hanggátlást javító hatása az alsó födémen keresztül vezető hangterjedési útra szintén figyelembe veendő. A számítás részleteit a 10.7. táblázat foglalja össze.

A 10.21. ábrán az egyes hangátviteli utakon átjutott akusztikai teljesítmények és a teljes átjutó akusztikai teljesítmény arányai láthatók. Megfigyelhető, hogy kiegyensúlyozott megoldás jött létre, mert az öt hangátviteli útból három közel azonos arányban szerepel.

10.7. táblázat. Hangátviteli utak a rugalmas peremkapcsolatokkal kivitelezett kettős fal helyszíni léghanggátlásának meghatározásához

Hangátviteli út	$S_{adó}$, m ²	$S_{vevő}$, m ²	R_{wij} , dB	$\Delta R_{wadó}$, dB	$\Delta R_{wvevő}$, dB	R_{wij} , dB
Válaszfalon keresztül	12,2	12,2	58	0	0	58
Homlokzaton keresztül	8,1	8,1	52	0	0	54
Belső válaszfalon keresztül	10,8	10,8	40	0	0	72
Alsó födémen keresztül	16,0	16,0	56	25	25	83
Felső födémen keresztül	16,0	16,0	56	0	0	58



10.21. ábra. Hangátviteli utakon átjutott akusztikai teljesítmény %-os arányai az összes átvitt akusztikai teljesítményhez

10.3.5. Értékelés

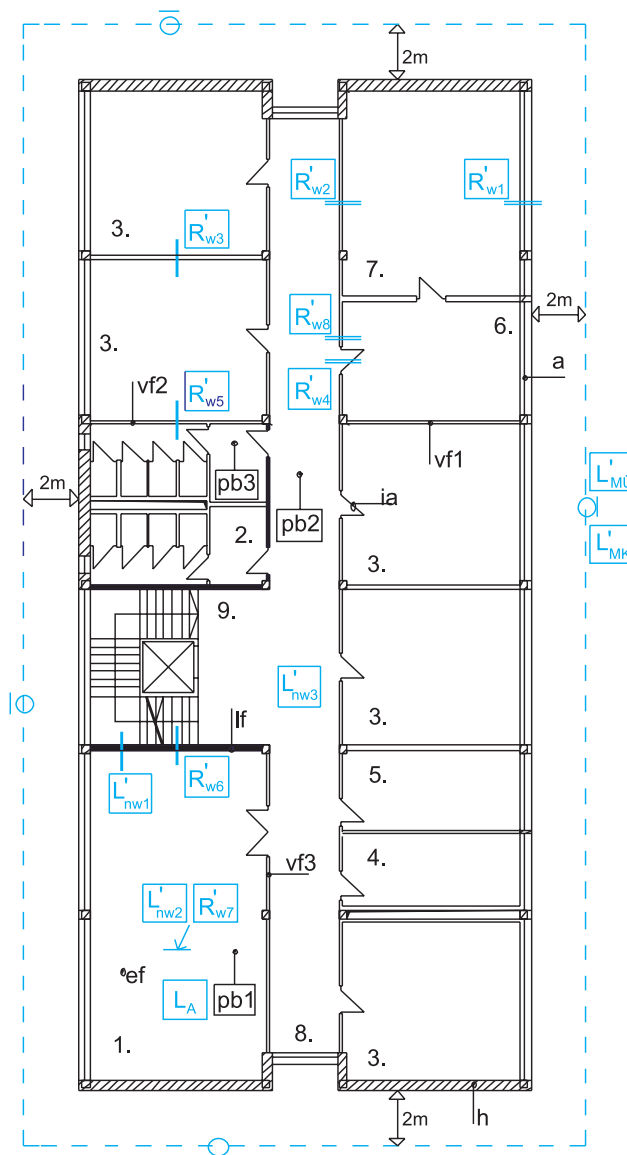
A számított eredő, $R'_w = 52$ dB. A 9.3.4. pont alapján a megfelelés értékelése bizonytalan. Ezért az alkalmazásról csak részletes számítás és analóg szituációkon elvégzett mérések eredményei alapján lehet csak dönteni. Mérlegelendő az is, hogy a megoldás alkalmazása pontos kivitelezést, valamint több szerkezeti csomópont kiviteliterv-szintű kidolgozását és anyagok pontosítását teszi szükségessé. A kapott eredményből nem következik, hogy más válaszfalelemek alkalmazása nagyobb hanggátlást eredményezne.

10.4. Kialakult városi környezetben levő, szerelt szerkezetekkel felújítandó, többszintes, vasbeton vázas épület egy irodai szintjének akusztikai tervezési feladatai

10.4.1. A feladat

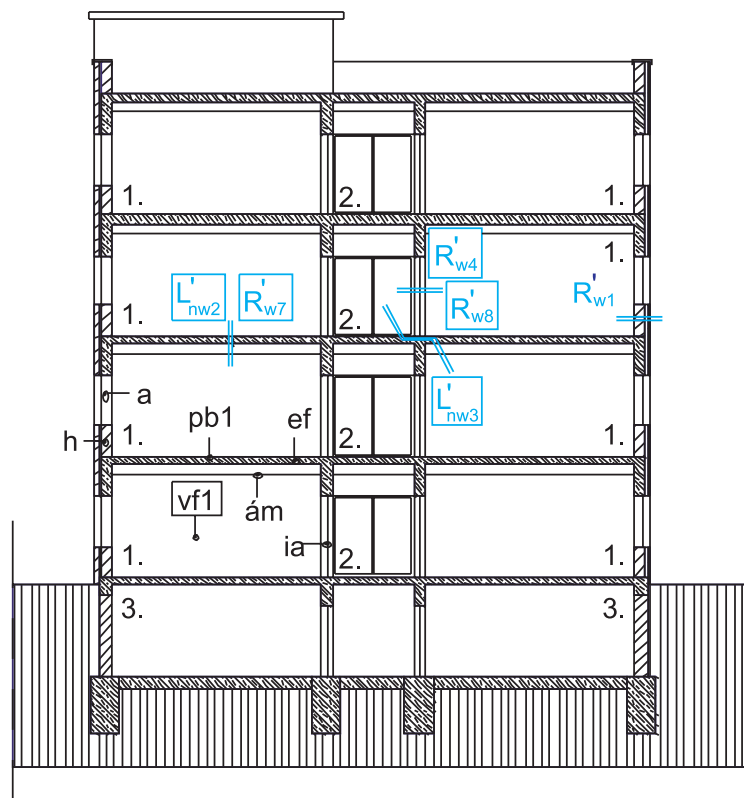
A feladat kialakult városi környezetben levő telken álló, vasbeton vázas, többszintes épületben, általános emeleti szinten irodai blokk akusztikai tervezési feladatainak elvégzése. A vizsgált épület szabadon álló, a szomszédos telkeken lakó- és középületek találhatók. A vizsgált épületet egy oldalról kétszer két forgalmi sávós városi főútvonal határolja. Az általános emeleti irodai szint alaprajza a 10.22. ábrán látható, a metszetet a 10.23. ábra mutatja.

Az épület középfolyosós elrendezésű. A lépcsőházi szerkezetek monolit vasbetonból készülnek, a pihenőlemez és a lépcsőkarok is merev kapcsolatban vannak a lépcsőház falával. A szociális blokk belső határolószerkezetei falazott vagy szerelt szerkezetűek. A homlokzat a helyiség felőli oldalon mintegy 10 cm vasbeton lemez, a további rétegeknek a belső hangszigetelés szempontjából nincs szerepük. A közlekedési zaj elleni védelem miatt azonban a teljes falazatot együtt kell mérlegelni. A szalagablakok fémszerkezetűek. A belső válaszfalak és a folyosó felőli falak szerelt szerkezetűek, a prob-



10.22. ábra. A feladat általános emeleti alaprajza

1. tárgyaló; 2. wc; 3. iroda; 4. teakonyha; 5. takarítósztár; 6. titkárság; 7. vezetői iroda; 8. folyosó, közlekedő; 9. lépcsőház; a ablak; h homlokzati falazat; ia irodaajtó; lf lépcsőházi fal; vf1 irodák közötti válaszfal; vf2 vizeshelyiség felőli válaszfal; vf3 folyosó felőli válaszfal; ef emeletközi födém; pb1 padlóburkolat; pb2 padlóburkolat



10.23. ábra. A feladathoz tartozó metszet

1. iroda; 2. folyosó; 3. tároló; a ablak; h homlokzati falazat; ia irodaajtó; ef emeletközi födém; pb1 padlóburkolat; vf1 irodák közötti válaszfal; ám álmennyezet

lélmamentes kapcsolatok érdekében lehetőség szerint pillérhez csatlakoznak. Ahol pillércsatlakozásra nincs lehetőség, ott megerősített tokasztó bordákhoz kell csatlakozni. Az általános belmagasság 2,95 m az álmennyezet alsó síkja alatt, az álmennyezet feletti légtér 30 cm.

Az irodai helyiségekben átlagos irodai tevékenység folyik, számítógépek, kis kapacitású sokszorosítógépek, nyomtató stb. található. Az épületben központi légkezelő rendszer, szerver gépterem, konyha üzem stb. működik.

Az épület környezete az a [I.5] rendelet szerinti besorolásban „Lakóterület (nagyvárosias beépítésű), vegyes terület”. A közúti közlekedés megítélési szintje az épület homlokzatának síkjában, a homlokzat hangvisszaverő hatása nélkül a nappali időszakban 67 dB egyenértékű A hangnyomásszint.

A fejezet további része a megoldás általános, elvi részeit ismerteti. Kiválasztásuk számításokon alapul, amelyek azonban csak közelítő jellegűek, hiszen nem a részletes elemzés, hanem a szerkezetválasztás és berendezésválasztás megalapozása a cél. Típusfeladatokra természetesen vannak általános megoldások, ezeket a többéves gyakorlati ta-

pasztalatok alapozták meg. Ugyanakkor nem egy olyan, általánosan ismert megoldást ismerünk, amely valamilyen szakmai tévhitre támaszkodik, sem a számítások, sem a gyakorlat nem támasztják alá. Ennek ellenére a tévhitek makacsul tartják magukat. A számítások alkalmazását egyébként a – nemzetközi gyakorlattal összhangban – rendeletek is előírják.

10.4.2. Akusztikai követelmények

A 10.22. és 10.23. ábrán az akusztikai követelmények jelzései is szerepelnek, értelmezésük a következő:

- A vizsgált épület környezetében, általában az épület homlokzatától 2 m távolságban a közlekedési zajra vonatkozó határérték lenne érvényben. Ez azonban új telepítésű vagy megváltozott területfelhasználású épületek homlokzati zajterhelését korlátozza. Ebben a példában az épület kialakult városi környezetben található, a terület felhasználása sem változott meg, ezért a homlokzatot terhelő közlekedési zajra épületen kívüli határértéket nem állapítottak meg.

10.8. táblázat. Az irodai épületrészre vonatkozó külső és belső akusztikai követelmények

Jel	Értelmezés	Körülmény	Határérték
L_A	Irodai helyiségekben érvényes zajhatárérték [I.2], a megítélési A hangnyomásszint, L_{AD} legnagyobb megengedhető értéke; a dolgozót a munkatevékenység alatt érő egyenértékű A hangnyomásszint, tehát a technikai berendezések, a közlekedés, a munkatevékenység zajának eredője	Tárgyalóterem, olvasóterem, előadóterem zajhatárértéke	40
		Fokozottan igényes irodai munkahely határértéke	50
		Irodai munkahely határértéke	60
L_A	Tárgyaló, előadóterem zajhatárértéke [I.5]	Technikai berendezés és az épületen belüli szolgáltatótévékenység együttesen	40
	Tárgyaló, előadóterem zajhatárértéke [I.5]	Közlekedési zaj csukott nyílászáró szerkezetek esetén	40
	Tárgyaló, előadóterem zajhatárértéke [I.5]	Az épületen belüli szolgáltatótévékenységtől	35
R'_{w1}	Homlokzati szerkezetek szükséges eredő súlyozott léghanggátlási száma	A környezet zajosságától és az irodai helyiség besorolásától függ	számított érték
R'_{w3}	Irodai helyiségek közötti szükséges helyszíni súlyozott léghanggátlási szám	Azonos, átlagos igényű helyiségek között	37
		Fokozott igényű helyiség és egy másik helyiség között	45
R'_{w2} R'_{w8}	Folyosó és irodai helyiség közötti fal szükséges súlyozott léghanggátlási száma	Átlagos igényű helyiségek és folyosó között	37
		Fokozott igényű helyiség és folyosó között	45
R'_{w4}	Folyosó és irodai helyiség közötti ajtó szükséges súlyozott léghanggátlási száma	Átlagos igényű helyiségek és folyosó között	27
		Fokozott igényű helyiség és folyosó között	37
R'_{w6}	Irodai helyiség és lépcsőház között	Nincs tételes követelmény, értelemszerűen legalább a folyosói követelményt kell venni	37*
R'_{w7}	Irodai helyiségek között függőleges irányban a szükséges helyszíni súlyozott léghanggátlási szám		52
R'_{w5}	Irodai helyiség és vele szomszédos szociális blokk közötti szükséges helyszíni súlyozott léghanggátlási szám	Nincs tételes követelmény megadva, de a használat jellege alapján a fokozott igényű helyiség és folyosó közötti szigetelésre szükség van	45*
L'_{nw2}	Irodai helyiségek között függőleges irányban a szükséges helyszíni súlyozott szabványos lépéshangnyomásszint		53
L'_{nw1}	Lépcsőházi szerkezetek és irodai helyiség között a szükséges helyszíni súlyozott szabványos lépéshangnyomásszint	Nincs számszerű követelmény megadva, megfontolások alapján a minimális szigetelési igény azonos az egymás feletti irodák közötti szigetelési igénnyel	53*
L'_{nw3}	Folyosó és a vele szomszédos irodai helyiség között a szükséges helyszíni súlyozott szabványos lépéshangnyomásszint	Nincs számszerű követelmény megadva, megfontolások alapján a minimális szigetelési igény azonos az egymás feletti irodák közötti szigetelési igénnyel	53*

* Nincs tételesen megadott számszerű követelmény, de analógiák, ill. hasonló használati és terhelési feltételek alapján szigetelési igény megállapítható.

- A vizsgált épület környezetében, általában az épület zaj ellen védendő helyiségeit határoló külső szerkezetektől 2 m távolságban, a szomszédos épületektől és tevékenységektől származó, ún. üzemi zajt zajhatárérték korlátozza. E határérték a területi besorolástól függ. A jelenlegi műszaki szabályozásban az OTÉK [I.6] és az [I.5] rendelet azonos területi kategóriákat alkalmaz, ezért a területi besorolás megállapítása egyértelmű. Azonban az [I.5] rendelet 4. paragrafusának 2. bekezdése szerint, ha egy helyiségben a beltéri zajhatárérték a 45 dB-t meghaladja, akkor a helyiség homlokzata előtt a kültéri határérték az általános határértéket ne haladja meg jelentős mértékben. Ez a megfogalmazás nem értelmezhető a tervezés szempontjából.
- A vizsgált épülethez tartozó technikai berendezésektől származó környezeti zajra a szomszédos épületek előtt levő megítélési pontokon állapít meg műszaki szabályozás zajterhelési határértéket, ezzel a jelen példában nem foglalkozunk.
- Az irodai helyiségekben – a tárgyalót, előadótermet leszámítva – a zajhatárértékeket jelenleg több dokumentum szabályozza, a rendszer nehezen áttekinthető, átfedéseket tartalmaz. Ezek a dokumentumok részben a vizsgálati módszert, részben a határértékeket írják elő:
 - értelmezés, vizsgálati módszer: [II.5] szabvány, [I.3] rendelet;
 - határértékek: [I.16] szabvány, [I.3] rendelet, [I.2] rendelet.
- Tárgyaló, előadóterem és hasonló funkciójú teretek zajhatárértékeit munkahelyi zajként az [I.2] rendelet írja elő, a munkahelyi zajtól eltérő fel fogásban pedig a [I.5] rendelet szabályozza.
- A homlokzati szerkezetek szükséges hanggátlásának az [I.10] szabvány határozza meg, ez a gyakorlati tervezés számára nem alkalmazható. A feladat megoldását a belső téri zajhatárértékekből lehet elérni, valamilyen méretezési módszer alkalmazásával.
- Az irodai helyiségek közötti hangszigetelési előírások az [I.9] szabványban találhatók. A szabvány fogalmi rendszere nem illeszkedik az EU épületakusztikai szabványaihoz, a követelmények enyhék, méretezési módszer nincs hozzájuk. Ezért helyettük az [I.11] szabványban található követelményeket célszerű alapul venni. Ezekhez méretezési módszerek találhatók, a követelmények szigorúbbak, mint amilyenek az [I.9]-ben találhatók, ezért az enyhébb követelményeket biztonsággal teljesítik. A szabványok jel-

legéből következik egyébként, hogy a helyiségek közötti hangszigetelési előírások kiválasztásában az építtetőnek, beruházónak nagyon fontos szerep jut.

A 10.8. táblázat kizárólag azokat az akusztikai követelményeket foglalja össze, amelyek a 10.22. és 10.23. ábrán láthatók.

10.4.3. Elemzés

A feladat alaprajzi elrendezése, helyiségkapcsolatai előnyös és előnytelen elemeket egyaránt tartalmaznak. Előnyös például, hogy általában minőségileg azonos rendeltetésű helyiségek találhatók egymás mellett, alatt, felett. Hátrányos pl. a lépcsőház–irodai helyiség kapcsolat és a vizesblokk–irodai helyiség kapcsolat. Ez utóbbi esetben azonban a kedvezőtlen alaprajzi kapcsolatot ellensúlyozza a vizesblokk belső elrendezése, amely azt eredményezi, hogy a szerelvények nem szomszédosak a zaj ellen védendő irodai helyiségekkel.

10.4.4. Tervezési lépések, eredmények, megoldások

I. A feladatok

A példa a következő feladatokra szűkíti az elvi megoldásokat:

- külső zaj elleni védelem;
- hangszigetelés egymás melletti és egymás feletti helyiségek között, a léghanggátlási és lépéshanggátlási követelmények teljesítése;
- lépcsőház, folyosó és vele szomszédos helyiségek közötti hangszigetelés.

Tehát az áttekintés nem tartalmazza pl. a központi épületgépészeti berendezések kiválasztásának, telepítésének akusztikai szempontjait.

II. Külső zaj elleni védelem

A külső zaj elleni védelem megtervezésének két kiindulóadata van, a külső zajterhelés és a belső zajhatárérték megállapítása. A zajterhelés egyértelműen megállapítható, kiindulóadatai akusztikai mérések lehetnek, amelyeket a mértékadó forgalomra kell korrigálni, vagy forgalmi adatok. Ez utóbbiból a homlokzatot érő zajterhelés számítással határozható meg. A zajhatárértékek a munkahelyi zajra vonatkozó szabályok miatt további mérlegelést igényelnek, hiszen összesítve tartalmazzák a közlekedés, a technológiai berendezések és a munkatevékenység hatását. Ez utóbbit önmagában is mérlegelni, értelmezni kell. Ugyanakkor a sok szabad-

ságfok miatt arra is gondolni kell, hogy egy homlokzaton hányféle, méreteiben, külső megjelenésében azonos ablakszerkezetet lehet választani.

A példa nem szól arról, hogy az épület homlokzatához képest a városi főútvonal hol helyezkedik el. A valóságban a fordított eset a gyakori, tehát a helyiségelrendezés kidolgozása során érdemes és lehet is mérlegelni a zajhatárértékek miatt legigényesebb helyiségek helyét a környezeti zajforrásokhoz képest. Ebből a szempontból tekintve célszerű – mert egyszerűbb szerkezeteket eredményez – a legigényesebb helyiségeket, irodaépület esetében pl. a könyvtárat, tárgyalót, előadótermet – az épület főútvonallal átellenes, tehát csendes oldalára elhelyezni.

A 10.4.2. pontban említett, tárgyalóra vonatkozó határértékek összhangjának hiánya miatt legyen a közlekedési zajra vonatkozó határérték a helyiségben 34 dB. Azonos számértékű legyen a technikai berendezések zajának megengedett értéke is. A fennmaradó összetevő a munkatevékenység zaja, értéke 37 dB. Ez az adatfelvétel kiindulásként megfelelő.

Az alaprajzi példán az 1. sorszámú tárgyaló homlokzata eredő hangszigetelésének szükséges értékét a 9.2.3. pont alapján:

$$(R'_{wer} + C_{tr}) \geq 67 - 34 + 9 + 10 \cdot \lg \frac{S_h \cdot T}{0,16 \cdot V} = 43,7 \text{ dB.} \quad (10.9)$$

Termékjellemzők eredőjeként a falazat és ablak eredő súlyozott léghanggátlási száma és színeképillesztési tényezője összegének szükséges értéke 45,7 dB. Ez igen magas szigetelési igényt jelent.

A homlokzat parapetfal része legyen legalább $(R_w + C_{tr})_{fal} \approx 52$ dB. Ez azt eredményezi, hogy az ablak termékjellemzőjére az $(R_w + C_{tr}) = 44$ dB már megfelelő lesz. Ezt azonban a szalag ablak jelleg miatt a sorolóelemekkel és tokosztó bordákkal együttesen kell elérni. A részletes megoldás innen már szerkezetfüggő, a sorolóelemek és tokosztó bordák miatt a szerkezeti részletek részletes kidolgozását teszi szükségessé. Hasonlóképpen kidolgozandó az ablakok beépítésének részletei is, hiszen itt nemcsak akusztikai, hanem hő- és páratechnikai, biztonsági igényeknek is eleget kell tenni.

Az ablakokra vonatkozó $(R_w + C_{tr}) \geq 44$ dB szigetelési igény a tapasztalatok szerint igényes szerkezettel érhető el (nehéz, hőszigetelő üvegezésű, gáztöltésű ablak, háromszoros tömítéssel, hat ponton záródva stb).

Átlagos irodára, a példában 3-as számmal jelölt helyiségek jelentősen enyhébb követelmények

adódnak. A zajhatárérték 10 dB-lel enyhébb, emiatt a tervezési cél 34 dB helyett 44 dB lehet. A számítás részeredményei a következők:

- $(R'_{wer} + C_{tr}) = 33,2$ dB ;
- $(R_{wer} + C_{tr}) = 35,2$ dB ;
- a falazat a teljes épületre azonos, az ablakszerkezetre $(R_w + C_{tr})_{ablak} > 33$ dB.

A tapasztalat azonban azt mutatja, hogy ha egy irodában a közlekedési zaj egyenértékű A hangnyomásszintje meghaladja a 45 dB-t, akkor az ott dolgozók gyakran már panaszkodnak. Ezért meg kell fontolni a jobb minőségű ablakok beépítését.

Ezen számítás alapján tehát az általános irodai helyiségekre olyan ablakot kell választani, amelynek akusztikai termékjellemzője, tehát a súlyozott léghanggátlási száma és a színeképillesztési tényező összege nagyobb, mint 33 dB. A tárgyalóra ennél sokkal jobb minőségű szerkezet szükséges, amelyre $(R_w + C_{tr}) \geq 44$.

III. Egymás melletti irodahelyiségek közötti léghanggátlás méretezése

A kiinduló szerkezetválasztás eredményeként az általános irodai helyiségeket kétszer két rétegű szerelt fal választja el egymástól. A kéreglemezek pl. RB 12,5 mm Rigips gipszkarton lemezből készülnek, a váz CW75 mm fémprofil. A bordaméret 75 mm, ebben 60 mm vastag szálas szigetelőanyag-töltés, pl. ISOVER-PIANO (TW-KF) üvegyapot lemez található. A falazat súlyozott léghanggátlási száma – méretezési érték [I.12] alapján – $R_{wR} = 52$ dB, a katalógus azonban $R_w = 50$ dB adatot közöl.

A homlokzatnál a számítást először olyan szituációra érdemes elvégezni, ahol a hangterjedésben szerepet játszó szerkezet lehetőleg homogén, ismert: ez a példában a pilléres kapcsolat. E csomópontnál az ablak mint átmenőszerkezet nem játszik szerepet, a parapetfalat pedig a belső falréteg, a 10 cm vastag vasbeton lemez fajlagos tömege alapján lehet közelíteni.

A folyosó felőli fal szintén szerelt válaszfal, rétegrendje azonos az irodák közötti válaszfallal. A pillérek között folyamatos kivitelben készül, a födém alsó síkjáig tart, tehát felmegy az álmennyezet fölé.

A födém legalább 20 cm vastag monolit vasbeton lemez, a padlóburkolat pvc vagy szőnyegpadló, amelynek az egymás melletti szomszédos helyiségek közötti léghangszigetelésben egyébként nincs szerepe.

Az álmennyezet kiindulásként áttört felületű kemény ásványgyapot lemezből készül, a lapok fajla-

gos tömege $m'' \geq 6 \text{ kg/m}^2$. Felső oldalról 5 cm vastag ISOVER PIANO (TW-KF) üveggyapot lemezborítás található. Az álmennyezet egybefüggően készül el, tehát az álmennyezeti térben a válaszfal felett nincs elválasztás. A hosszirányú súlyozott léghanggátlási szám értéke erre a választásra [I.12] alapján $R_{wL} = 40 \text{ dB}$. A kiinduló szerkezetválasztást pontosabban meghatározott műszaki tartalommal is meg lehet tölteni. Az irodai helyiségekben az előnyös hangelnyelési tulajdonságot is mérlegelve pl. az OWA termékválasztékából a Harmony fantáziane-
vű, rejtett bordás álmennyezeti rendszer 30 mm vastag eleme, $R_{wL} = 49 \text{ dB}$, vagy a Slicht fantáziane-
vű rendszer 15 mm vastag eleme $R_{wL} = 42 \text{ dB}$ is választható. A Rigips termékválasztékban a hosszirányú léghanggátlásra adatközlés nincs, a testsűrűségek és fajlagos tömegek alapján a Decogips vagy Casovoice fantáziane-
vű álmennyezeti lap megfelelő lesz.

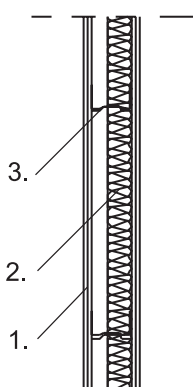
A négy csomópont hosszirányú léghanggátlási számát, ill. vázlatos ábráját a 10.9. táblázat foglalja

össze az [I.12] alapján meghatározott kiinduló-
adatokra.

10.9. táblázat. Hangátviteli utak hosszirányú, súlyozott léghanggátlási száma

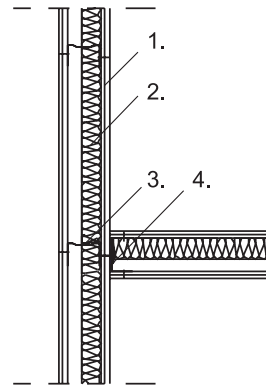
Hangátviteli út	Vázlatos rétegterv és csomóponti ábrája	R_{Lw} , dB
Közvetlen	10.24. ábra	50
Homlokzaton keresztül	10.25. ábra	53
Folyosó felőli falon keresztül	10.26. ábra	57
	10.27. ábra	nincs adat, > 57 dB
Alsó födém	10.28. ábra	–
Álmennyezet	10.29. ábra	43

Ezzel az adatválasztással a számított helyszíni súlyozott léghanggátlási szám 40 dB. Az egyszerűbb kisebb igényű követelmény ($R'_w \geq 37 \text{ dB}$) teljesül, a fokozottabb követelmény ($R'_w \geq 45 \text{ dB}$) azonban nem. Látható, hogy a gyenge pont az álmennyezet.



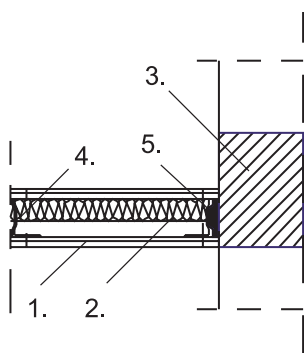
10.24. ábra. Szerelt fal rétegtrendje, $R_{wR} = 52 \text{ dB}$

1. 2 rtg. RB 12,5 mm jelű Rigips gk. lap; 2. 60 mm ISOVER üveggyapot; ISOVER-PIANO (TW-KF); 3. CW 75/100 acél vázelem



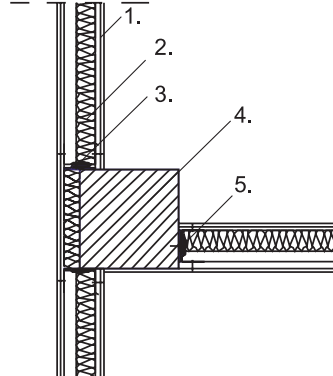
10.26. ábra. Szerelt falak csomópontja

1. 2 rtg. RB 12,5 mm Rigips gk. lap; 2.60 mm ISOVER üveggyapot; ISOVER-PIANO (TW-KF); 3. CW 75/100 acél vázelem; 4. lágy PE hab



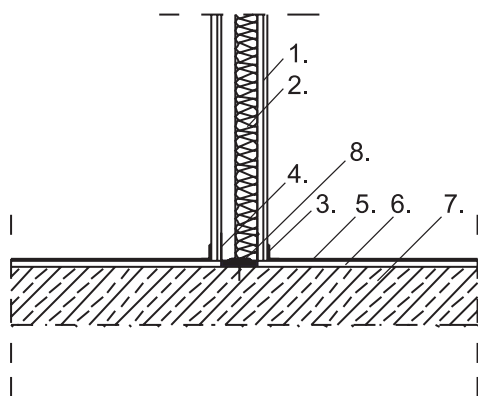
10.25. ábra. Szerelt fal és homlokzati pillér elvi csomópontja

1. 2 rtg. RB 12,5 mm Rigips gk. lap; 2. 60 mm ISOVER üveggyapot; ISOVER-PIANO (TW-KF); 3. 30×30 cm mon. vb. pillér; 4. CW 75/100 acél vázelem; 5. lágy PE hab; 6. téglaburk. légréssel és 6 cm szálal hőszigeteléssel; 7. ablakszerkezet



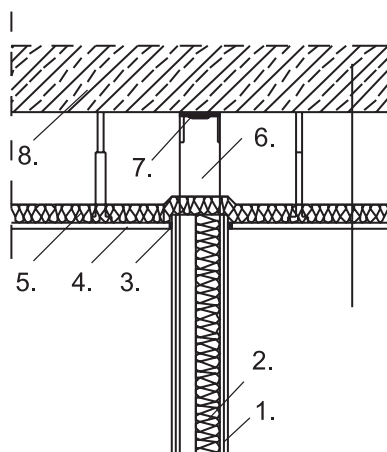
10.27. ábra. Szerelt fal és folyosó felőli pillér csomópontja

1. 2 rtg. RB 12,5 mm Rigips gk. lap; 2. 60 mm ISOVER üveggyapot; ISOVER-PIANO (TW-KF); 3. CW 75/100 acél vázelem; 4. 30×30 cm mon. vb. pillér; 5. lágy PE hab



10.28. ábra. Szerelt fal és kontaktpadló csatlakozásának elvi megoldása

1. 2 rtg. RB 12,5 mm Rigips gk. lap; 2. 60 mm ISOVER üveggyapot ISOVER-PIANO (TW-KF); 3. pvc padlószegély; 4. CW 75/100 acél vázelem; 5. Ragasztott pvc padló; 6. aljzatkiegyenlítő rtg.; 7. monolit vb. födém; 8. lágy PE hab



10.29. ábra. Szerelt fal és álmennyezet elvi csomópontja

1. 2 rtg. RB 12,5 mm Rigips gk. lap; 2. 60 mm ISOVER üveggyapot ISOVER-PIANO (TW-KF); 3. tartósan rug. kitt; 4. áttört felületű kemény ásványgyapot lemez 6 kg/m²; 5. 50 mm ISOVER üveggyapot, ISOVER-PIANO (TW-KF); 6. CW 75/100 acél vázelem; 7. lágy PE hab; 8. mon. vb. födém

Ezért a fokozottabb szigetelési igény esetén célszerű az álmennyezeten keresztül vezető hangátvitelt lecsökkenteni. Ezt több módosítással érhető el: az álmennyezeti lap készülhet tömör gipszkarton lemezből, a válaszfal felmehet a födém alsó síkjáig, alkalmazható az OWA Harmony nevű termék stb.

A kiinduló szerkezetválasztás a folyosó felőli hangszigetelés szempontjából is megfelelő, de csak akkor, ha a folyosó felőli fal a födém alsó síkjához csatlakozik. Ez a részlet egyúttal tetszőleges álmennyezet kiválasztását tesz lehetővé a folyosón.

Felmerül még a folyosó felőli ajtókon keresztül hangátvitel. Ha a 10.8. táblázatban található, az aj-

tókra vonatkozó szigetelési igény teljesül, akkor a két iroda közötti hangszigetelést ez a hangátvitel nem fogja lerontani.

Az ajtók szigetelési igényét úgy kell értelmezni, hogy az [I.12] szabvány szerint a méretezési érték (R_{wR}) és a szerkezet laboratóriumban mért súlyozott léghanggátlási száma, R_{wP} között 5 dB különbség van. A termékjellemző e közelítés szerint R_{wP} lesz. Az [I.9] szabványban található, szintén a folyosóra nyíló ajtók hangszigetelését szabályozó követelmény közvetlenül az ajtó laboratóriumban mért súlyozott léghanggátlási számának legkisebb megengedhető értékét írja elő. E két szempont valamelyike alapján az ajtó kiválasztása egyszerű összehasonlítással megoldható.

IV. Egymás feletti helyiségek közötti, léghanggátlás és lépéshang-szigetelés

Az egymás feletti helyiségek közötti födém helyszíni súlyozott, szabványos lépéshangnyomásszint-követelményét a 9.8. alfejezet alapján egyszerű közelítéssel meg lehet határozni. A közelítés szerint olyan padlóburkolatot kell választani, amelynek súlyozott szabványos lépéshangnyomásszint-csökkenése, a ΔL_w teljesíti az (10.10) egyenlet feltételét. A választás természetesen függ a burkolatlan födém súlyozott szabványos L_{nw0} lépéshangnyomásszint-jétől és az $L'_{nwköv}$ helyszíni szigetelési igénytől:

$$\Delta L_w \geq L_{nw0} + 3 - L'_{nwköv}. \quad (10.10)$$

A (10.10) összefüggés alapján a padlóburkolat ΔL_w értékének nagyobbnak kell lennie, mint 24 dB. Ezt a szigetelési igényt számos szőnyegpadló és habalátétes pvc-burkolat teljesíti. Ha a folyosón azonos minőségű burkolat készül, akkor az L'_{mw3} követelmény teljesül.

A függőleges helyszíni léghanggátlás meghatározására az [I.12] nem ad olyan általános módszert, amely a jelen esetben alkalmazható lenne. A feladat a [III.7]-ben, vagy [III.2]-ben ismertetett módszer értelemszerű alkalmazásával oldható meg. Részletes számítások és tapasztalatok szerint a kiinduló szerkezetválasztás a függőleges léghangszigetelési igény teljesülését eredményezi akkor, ha a födémén keresztül vezető nyílások – csőáttörések, gépészeti vezetékek stb. – szakszerűen vannak megoldva.

V. Hangszigetelés a lépcsőház és a vele szomszédos iroda között

A lépcsőház és a vele szomszédos iroda között mind a léghanggátlási, mind a lépcsőkar vagy pihenő- és az irodahelyiség közötti szabványos lé-

péshangszigetelés-követelmény van érvényben. Az előbbi jele a példa alaprajzon R'_{w6} , az utóbbié pedig L'_{nw1} . A léghanggátlási igény teljesítése a hangterjedési utak számbavétele alapján ellenőrizhető: 15 cm vastag monolit vasbeton falszerkezet megfelelő lesz.

A szabványos lépéshangnyomásszint számított helyszíni értéke kemény felületű lépcsőkarra és pihenőre $L'_{mw} = 60$ dB, nagyobb, tehát rosszabb minőségű, mint a szigetelési igény. A mintegy 7 dB hangszigetelés-javítás legegyszerűbben úgy érhető el, hogy a lépcsőfokokra és a pihenőre – a további műszaki követelményeknek is eleget tevő – kemény, ragasztott pvc-burkolat készül.

10.5. Helyiség utózengési idejének beállítása

10.5.1. A feladat

A feladat alapvetően beszéd célú terem utózengési idejének szabályozása. A terem a 10.4. részben megismert iroda épület rész 1. sorszámú tárgyalója, amely derékszögű hasáb alakú terem, alapterülete mintegy 90 m², az álmennyezet alatti belmagasság 2,7 m. az álmennyezet alatti térrész térfogata tehát mintegy 242 m³. Minősége alapján a terembe szőnyegpadló-burkolat és álmennyezet került, ez utóbbi szerkezet típusa a 10.4. rész megoldása során áttört felületű, kemény, ásványgyapot

lemez, például OWA termékcsalád *Harmony* fantázia nevű terméke lett.

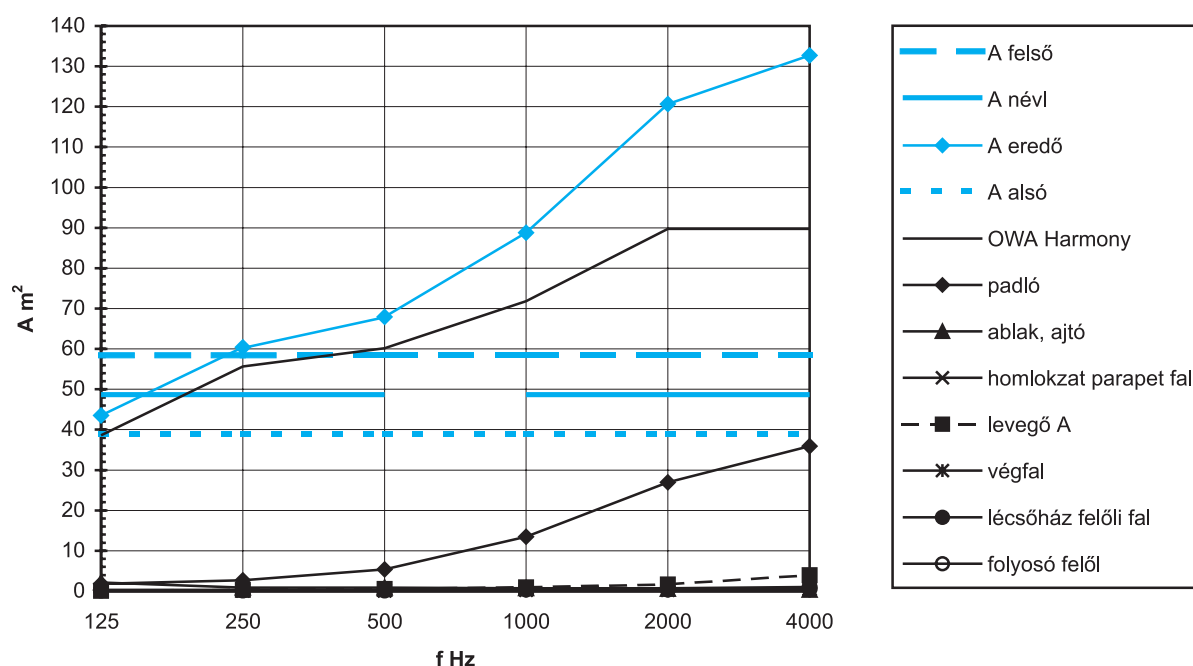
Az utózengési idő beállítást úgy kell megoldani, hogy a külső zaj elleni védelem méretezésekor, illetve a belső hangszigetelés méretezésekor kiválasztott szerkezeteket meg lehessen tartani.

Látható, hogy az utózengési idő beállításának kidolgozására ebben az egyszerű példában akkor kerül, amikor az épületrész alaprajzát, metszeteit, helyiség kapcsolatait, fő szerkezeti rendszerét már kidolgozták, tehát a megoldást körülhatárolt területen kell megtalálni. Nagyobb térfogatú, összetettebb formájú előadóterem esetében – még a beszéd célú termekre is igaz ez – a teremakusztikai megfontolásokat sokkal hamarabb meg kell tenni, hiszen az előadóterem alakját is a jó hangzási igényei szerint kell meghatározni. Szerencsére a jó hangzás és a jó látás igényei azonos megoldások irányába mutatnak.

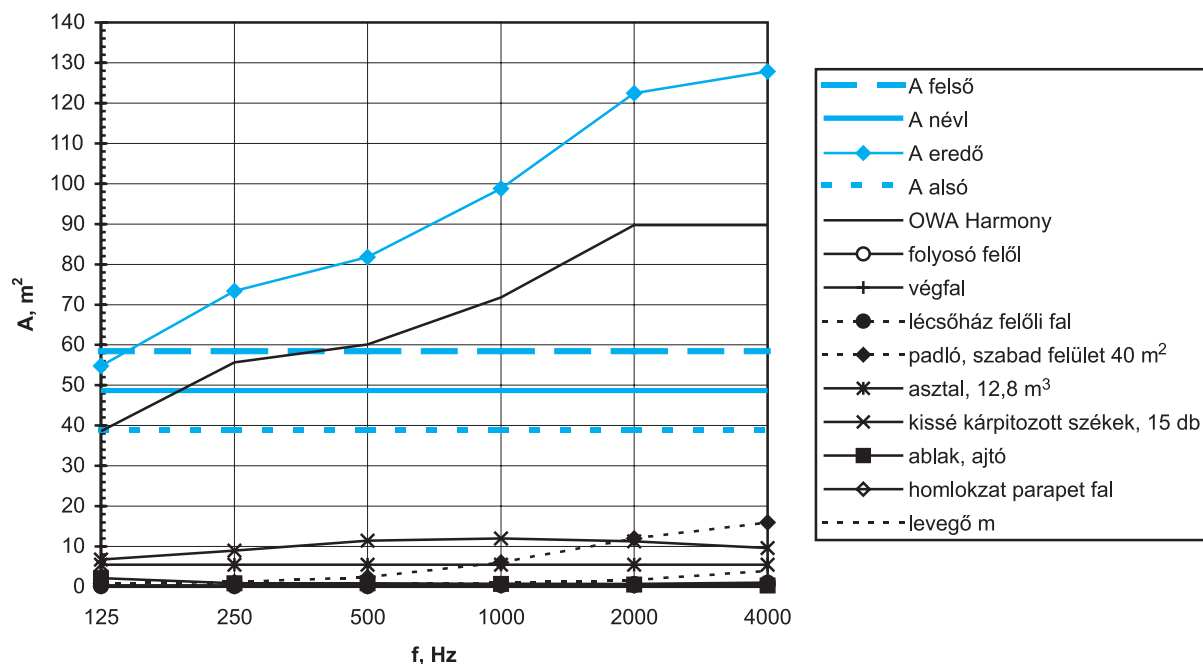
A tárgyalóteremben ugyanakkor nincsenek kitüntetett hangterjedési irányok, ezért a hangelnyelő szerkezeteket lehetőleg egyenletesen kell a térben elhelyezni.

10.5.2. A tervezési cél

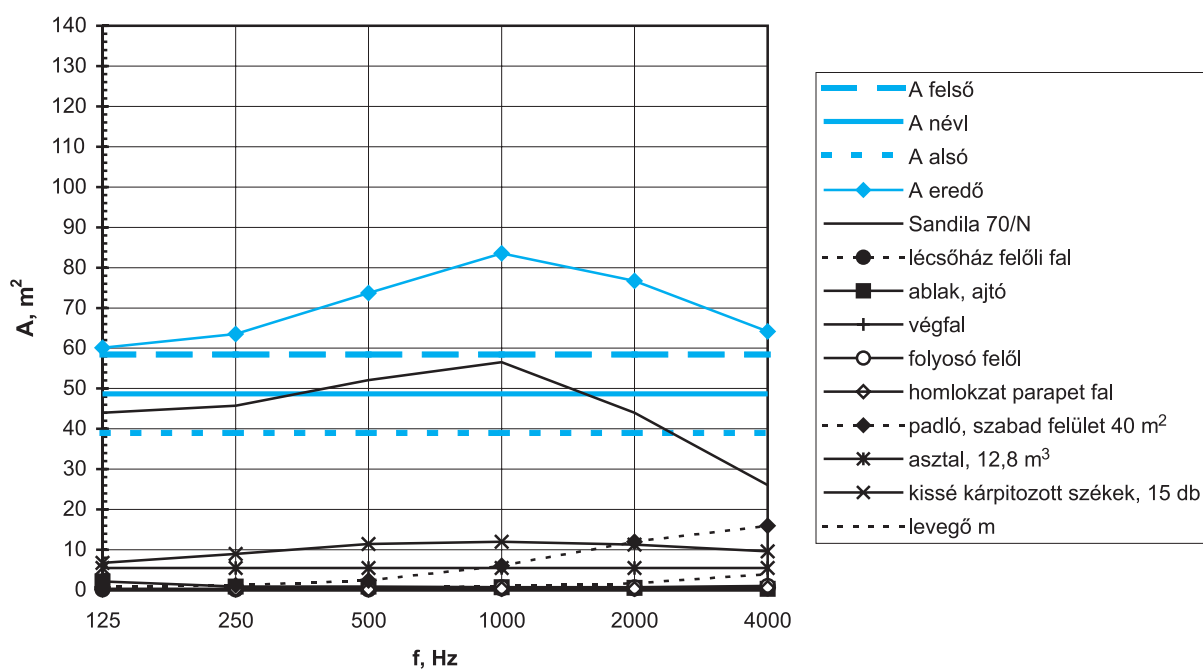
A hazai előírások között a helyiségek teremakusztikai minőségét szabályzó követelmény, vagy ajánlás nincs. A 7.14.–7.16. ábrák alapján a közepes utózengési idő értéke tervezési célként 0,8 másodperc-



10.30. ábra. Bútorozatlan tárgyaló egyenértékű hangelnyelési felületei



10.31. ábra. Bútorozott tárgyaló számított egyenértékű hangelnyelési felületei



10.32. ábra. Bútorozott tárgyaló számított egyenértékű hangelnyelési felületei

re, a tolerancia tartomány a 250 Hz –2 kHz tartományban $\pm 20\%$ -ra vehető fel.

10.5.3. Tervezési lépések, eredmények

A 9.11. résznek megfelelően meg az utózengési idő meghatározásához össze kell gyűjteni a határoló szerkezetek és burkolatok, valamint a bútorzat hangelnyelési tényezőjének, illetve egyenértékű hang-

elnyelési felületének adatait, valamint a felületnagyságokat, helyfoglalást, takarásokat.

A tervezési cél, tehát az utózengési idő középértékét és tolerancia tartományát célszerű egyenértékű hangelnyelési felületre átszámítani, mert így a szerkezet választás eredménye szemléletesebb lehet.

A 10.30. ábrán a kiinduló szerkezetválasztás eredménye, azaz az egyes határolószerkezetek egyen-

értékű hangelnyelési felülete, az eredő egyenértékű hangelnyelési felület, valamint a tervezési célok láthatók a frekvencia függvényében. Látható, hogy a meghatározó az álmennyezet hatása. A kemény felületek hangelnyelése csekély.

A bútorzat kissé módosít az eredményem, hiszen a padlót, valamint részben a falakat takarja, az eltérés azonban nem jelentős az adott esetben. Ezt a 10.31. ábra szemlélteti. Mindkét eredmény azt mutatja, hogy a helyiségben túl sok az elnyelés a tervezési célhoz képest. Kisméretű, beszéd célú helyiségekben ez csupán „bocsánatos bűn”, különösen akkor, ha a tárgyalóból audio-vizuális távolsági kommunikáció is történik. Az egyenértékű hangelnyelési felület csökkentéséhez eltérő

típusú álmennyezetet kell választani. A példa kedvéért legyen a módosított szerkezet szintén az OWA termékválasztékából a Sandila 70/N típus. Az ezzel végzett számítás eredményeit a 10.32. ábra szemlélteti. Látható, hogy az egyenértékű hangelnyelési felület lecsökkent (tehát azonos mértékben megnőtt az utózengési idő) és az eredmény a toleranciatartomány körül helyezkedik el. Még ez az elnyelés is több a tervezési célnál, a további finom beállításhoz már legalább kétféle álmennyezetre van szükség.

Miután a helyiség eredő egyenértékű hangelnyelési felülete kisebb lett, mint a homlokzati szerkezetek meghatározása során feltételezett, a kapott eredményt abból a szempontból is le kell ellenőrizni.

IRODALOM

I. Az akusztikai követelményeket, valamint általános szabályokat tartalmazó rendeletek, szabványok, amelyeknek kapcsolatuk van az akusztikai tervezéssel

- [I.1] A szociális és családügyi miniszter, valamint az egészségügyi miniszter 3/2002. (II. 8.) SzCsM–EüM együttes rendelete a munkahelyek munkavédelmi követelményeinek minimális szintjéről.
- [I.2] Az egészségügyi miniszter 17/2003. (IV. 12.) EüM rendelete egyes miniszteri rendeletek módosításáról.
- [I.3] Az egészségügyi miniszter 18/2002. (IV. 28.) EüM rendelete a munkavállalóknak a munka közben zajexpozíció okozta kockázatok elleni védelméről.
- [I.4] IMMISSZIÓS ZAJHATÁRÉRTÉKEK. Munkahelyen megengedett egyenértékű és legnagyobb A hangnyomásszintek.
- [I.5] A környezetvédelmi miniszter és az egészségügyi miniszter 8/2002. (III. 22.) KöM–EüM együttes rendelete a zaj és rezgésterhelési határérték megállapításáról.
- [I.6] OTÉK. A kormány 253/1997. (XII. 20.) rendelete az országos településrendezési és építési követelményekről.
- [I.7] A környezetvédelmi és területfejlesztési miniszter 45/1997. (XII. 29.) rendelete az építészeti-műszaki tervdokumentációk tartalmi követelményeiről.
- [I.8] MSZ 04-601-2:1988 ÉPÜLETAKUSZTIKA. Lakások és önálló üdülőegységek hangszigetelési követelményei.
- [I.9] MSZ 04-601-3:1988 ÉPÜLETAKUSZTIKA. Községi épületek hangszigetelési követelményei.
- [I.10] MSZ 04-601-5:1989 ÉPÜLETAKUSZTIKA. Homlokzati szerkezetek léghangszigetelési követelményei
- [I.11] DIN 4109:1989. Schallschutz im Hochbau. Anforderungen und Nachweise.
- [I.12] DIN 4109:1989. Schallschutz im Hochbau. Beiblatt 2 zu DIN 4109. Hinweise für Planung und Ausführung.
- [I.13] 46/1997. (XII. 29.) KTM rendelet egyes építményekkel, építési munkákkal és építési tevékenységekkel kapcsolatos építésügyi hatósági engedélyezési eljárásokról.
- [I.14] Az 1997. évi LXXVIII. törvény az épített környezet alakításáról és védelméről
- [I.15] ÖNORM B 8115 Schallschutz und Raumakustik im Hochbau.
- [I.16] ISO 9921-1:1996. Ergonomic assessment of speech communication. Part 1: Speech interference level and communication distances for persons with normal hearing capacity in direct communication.
- [I.17] IEC 60268-16: Sound system equipment – part 16.: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index.

II. Fogalmak, mérési módszerek, termékelőírások

- [II.1] MSZ 18150-1:1998 A környezeti zaj vizsgálata és értékelése.
- [II.2] MSZ ISO 1996-1:1995 Akusztika. A környezeti zaj leírása és mérése. 1. rész: Alapmennyiségek és alapeljárások.
- [II.3] Directive 2002/49/EC, relating to the assessment and management of environmental noise. 2002. június 25.

- [II.4] 18/2001 EüM rendelet a munkavállalóknak a munka közbeni zajexpozíció okozta kockázatok elleni védelméről.
- [II.5] MSZ 18150-2:1984 IMMISSZIÓS ZAJJELLEMZŐK VIZSGÁLATA. Munkahelyen fellépő megítélési és legnagyobb A hangnyomásszintek vizsgálata.
- [II.6] MSZ 13-183-1:1992. A közlekedési zaj mérése. Közúti zaj.
- [II.7] MSZ 13-183-2:1992. A közlekedési zaj mérése. Vasúti zaj.
- [II.8] MSZ 13-183-3:1992. A közlekedési zaj mérése. Repülési zaj.
- [II.9] MSZ 13-183-4:1992. A közlekedési zaj mérése. Repülési zaj heliportok és kisrepülőterek környezetében.
- [II.10] MSZ EN ISO 140-1:2000. Akusztika. Épületek és épületelemek hangszigetelésének vizsgálata. 1. rész. Kerülőutas hangátvitel nélküli laboratóriumi mérőhelyiségekre vonatkozó követelmények.
- [II.11] MSZ EN ISO 140-3:1998. Akusztika. Épületek és épületelemek hangszigetelésének vizsgálata. 3. rész. Épületek léghangszigetelésének laboratóriumi vizsgálata.
- [II.12] MSZ EN ISO 140-4:2000. Akusztika. Épületek és épületelemek hangszigetelésének vizsgálata. 4. rész. Helyiségek közötti hangszigetelés helyszíni vizsgálata.
- [II.13] MSZ EN ISO 140-5:2000. Akusztika. Épületek és épületelemek hangszigetelésének vizsgálata. 5. rész. Homlokzati elemek és homlokzatok léghangszigetelésének helyszíni vizsgálata.
- [II.14] MSZ EN ISO 140-6:2001. Akusztika. Épületek és épületelemek hangszigetelésének vizsgálata. 6. rész. Födémek lépéshang-szigetelésének laboratóriumi vizsgálata.
- [II.15] MSZ EN ISO 140-7:2001. Akusztika. Épületek és épületelemek hangszigetelésének vizsgálata. 7. rész. Födémek lépéshang-szigetelésének helyszíni vizsgálata.
- [II.16] MSZ EN ISO 140-8:2001. Akusztika. Épületek és épületelemek hangszigetelésének vizsgálata. 8. rész. Nagy tömegű etalonfödémeken lévő padlóburkolatok lépéshangszigetelés-javításának laboratóriumi vizsgálata.
- [II.17] MSZ EN 20140-9:1998. Akusztika. Épületek és épületelemek hangszigetelésének vizsgálata. 9. rész. Felső légtérű álmennyezetek kerülőutas léghangszigetelésének laboratóriumi vizsgálata.
- [II.18] MSZ EN 20140-10:1995. Akusztika. Épületek és épületelemek hangszigetelésének vizsgálata. 10. rész. Kisméretű épületelemek léghangszigetelésének laboratóriumi vizsgálata.
- [II.19] MSZ EN 20140-12:1998. Akusztika. Épületek és épületelemek hangszigetelésének vizsgálata. 12. rész. Álpadlók egymás melletti helyiségek közötti léghang- és lépéshang-szigetelésének laboratóriumi vizsgálata.
- [II.20] MSZ EN ISO 717-1:2000. Akusztika. Épületek és épületelemek hangszigetelésének értékelése. 1. rész. Léghangszigetelés.
- [II.21] MSZ EN ISO 717-2:2000. Akusztika. Épületek és épületelemek hangszigetelésének értékelése. 2. rész. Lépéshang-szigetelés.
- [II.22] ISO 226:1987. Normal equal loudness contours.
- [II.23] MSZ EN 29052-1:1994. Akusztika. A dinamikai merevség meghatározása. 1. rész: Lakóépületek födémszerkezeteiben úsztatóréteggént alkalmazott anyagok.
- [II.24] MSZ EN 29053:1994. Akusztika. Akusztikai célra alkalmazott anyagok. Az áramlási ellenállás meghatározása.
- [II.25] MSZ EN 20354:1994. Akusztika. A hangelnyelés mérése zengőszobában.
- [II.26] ISO 3382:1997. Measurement of reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters.
- [II.27] DIN 52217:1984. Bauakustische Prüfungen. Flankenübertragung. Begriffe.
- [II.28] MSZ 04-601:1988. Épületakusztika. Az épületen belüli hangszigetelés vizsgálata.
- [II.29] ISO 11654:1997. Acoustics- Sound absorption for use in buildings. Rating of sound absorption.
- [II.30] MSZ EN ISO 3822-1: Akusztika. Vízellátási rendszerekben alkalmazott szerelvények és berendezések zajkibocsátásának laboratóriumi vizsgálata. 1. rész: Mérési módszer.
- [II.31] MSZ EN ISO 3822-2: Akusztika. Vízellátási rendszerekben alkalmazott szerelvények és berendezések zajkibocsátásának laboratóriumi vizsgálata. 2. rész: Kifolyó- és keverőszelepek felszerelése és működtetése.
- [II.32] MSZ EN ISO 3822-3: Akusztika. Vízellátási rendszerekben alkalmazott szerelvények és beren-

dezősek zajkibocsátásának laboratóriumi vizsgálata. 3. rész: Átfolyószelepek és szerelvények felszerelése és működtetése.

- [II.33] MSZ EN 200:1989. Egészségügyi szerelvények kifolyószelepeinek és keverőcsaptelepeinek általános műszaki követelményei.
- [II.34] MSZ EN 13163:2002. Építőipari hőszigetelő termékek. Gyári készítésű expandált polisztiroltermékek. Műszaki előírás.

III. Méretezési módszerek

- [III.1] VDI 2571, 1976 Schallabstrahlung von Industriebauten.
- [III.2] Reis F. és társai: Tervezési segédlet. Hangszigetelés tervezése lakó- és vegyes funkciójú épületek felújításához. FÉ-15. Gyorsjelentés Kiadó Kft., 1997. március.
- [III.3] Beiblatt 1 zu DIN 4109 Schallschutz im Hochbau. Ausführungsbeispiele und Rechenverfahren.
- [III.4] Út 2-1.302:2000. Közúti közlekedés számítása. Útügyi műszaki előírás.
- [III.5] VDI 2719:19. Schalldämmung von Fenstern und deren Zusatzeinrichtungen.
- [III.6] EN 12354-3: Building acoustics – Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements – Part 3: Airborne sound insulation against outdoor sound.
- [III.7] EN 12354-1: Building acoustics – Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements – Part 1: Airborne sound insulation between rooms.
- [III.8] EN 12354-2: Building acoustics – Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements – Part 2: Impact sound insulation between rooms.
- [III.9] EN 12354-4: Building acoustics – Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements – Part 4: Transmission of indoor sound to outside.
- [III.10] prEN 12354-6: Building acoustics – Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements – Part 6: Sound absorption in enclosed spaces. Final draft.

IV. Alapvető szakkönyvek, kézikönyvek, amelyek az épített környezet akusztikai minőségének valamilyen elemét ismertetik (elmélet, méretezések stb.)

- [IV.1] Beranek, L. L. (szerkesztő): Noise and Vibration Control. McGraw-Hill Company New York, 1971.
- [IV.2] Fasold, W., etc. (szerkesztő): Taschenbuch Akustik. VEB Verlag Technik Berlin. 1. kiadás, 1984.
- [IV.3] Croome, D. J.: Noise, Building and People. Pergamon Press Oxford, 1977.
- [IV.4] Kutruff, H.: Room Acoustics. Applied Science Publishers Ltd. London. 2. kiadás, 1979.
- [IV.5] Skudrzyk, E.: The Foundations of Acoustics. Springer Verlag Wien, New York, 1971.
- [IV.6] Cremer, L.: Die Wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik. Band III. Wellentheoretische Raumakustik. S. Hirzel Verlag, Leipzig.
- [IV.7] Cremer, L.–Heckl, M.: Structure-borne Sound. Springer Verlag Berlin. 2. kiadás, 1988.
- [IV.8] Cremer, L.–Heckl, M.: Körperschall. Springer Verlag Berlin. 2. kiadás, 1996.
- [IV.9] Harris, C. M. (szerkesztő): Shock and Vibration Handbook. McGraw-Hill New York, 4th edition, 1996.
- [IV.10] Reis F.–Várfalvi J.–Zöld A.: Az épületfizika alapjai építészmérnök hallgatók számára. Egyetemi jegyzet.
- [IV.11] Fasold, W.–Veress, É.: Schallschutz+Raumakustik in der Praxis. Verlag für Bauwesen, Berlin, 1998.
- [IV.12] Tarnóczy T.: Hangnyomás, hangosság, zajosság. Akadémia Kiadó, Budapest, 1984.
- [IV.13] Tarnóczy T.: Teremakusztika. Akadémia Kiadó, Budapest, 1984.
- [IV.14] Szentmártoni T.: Zajtalanítás. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1963.
- [IV.15] Pritz T.: AKUSZTIKA. Rezgéscsökkentő anyagok dinamikai tulajdonságai. Akadémiai Kiadó, Budapest, 1996.
- [IV.16] Weisstein, E. W.: CRC Concise Encyclopedia of Mathematics. CRC Press Boca Raton, London, 1999.

V. Cikk, könyv, egyéb hivatkozások

1. fejezet

- [1.1] Dölle, L.: Lakóházak és ipari épületek hangvédelme. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1955.

2. fejezet

- [2.1] *Kurze, U. J. és társai*: Sound attenuation by barriers. Applied Acoustics.
- [2.2] *Rathe E. J.*: Note on two common problems of sound propagation. Journal of Sound and Vibration. 10(3), 1969, pp. 472.
- [2.3] *Maekawa, Z.*: Noise reduction by distance from sources of various shapes. Applied Acoustics.
- [2.4] *Maekawa, Z.*: Noise reduction by screens. Applied Acoustics.
- [2.5] *Kuttruff, H.*: Stationäre Schallausbreitung in Langräumen Acustica. Vol. 69, No. 2. (1989), pp. 53.

4. fejezet

- [4.1] *Reis F.*: The influence of excitation on the radiation loss of plates. Proc of INTERNOISE'87, Beijing.
- [4.2] *Reis F.*: Zárt hangtérből gerjesztett lemez sugárzási foka. Kép- és Hangtechnika XXXIV, 1988. febr. pp. 13.
- [4.3] *Maidanik, G.*: Response of ribbed panels. Journal of the Acoustical Society of America 34, 1962. pp 809.
- [4.4] *Schmitz, A. és társai*: Accuracy of sound insulation measurements of heavy walls in test facilities. Proc. of the Sixth International Congress of Sound and Vibration, 1999. Copenhagen, pp. 263.
- [4.5] *Crocker, M.*: Sound transmission, using Statistical energy Analysis. Journal of Sound and Vibration 9(3), 1996.
- [4.6] *Ljunggren, S.*: Airborne sound insulation of thin walls. Journal of the Acoustical Society of America., 89(1991), pp. 2324.
- [4.7] *Ljunggren, S.*: Airborne sound insulation of thick walls. Journal of the Acoustical Society of America., 89(1991), pp. 2338.
- [4.8] *Gösele, K.*: Zur Längsleitung über leichte Außenwände. Bauphysik, 12(1990), H:5, pp. 145.
- [4.9] *Gösele, K.*: Verringerung der Luftschalldämmung von Wänden durch Dickenresonanzen. Bauphysik, 12 (1990), H:6, pp. 187.
- [4.10] *Weber, L. és társai*: Schalldämmung von Lochsteinen – neue Erkenntnisse. Bauphysik, 20(1998), H:6, pp. 239.
- [4.11] *Reis F.*: „Inhomogén, periodikus szerkezetű falazatok léghanggátlása” c. T030238 témaszámú OTKA kutatás. Kutatóhely: BME ÉSZÉGI Épületakusztikai Laboratórium.
- [4.12] *London, A.*: Transmission of Reverberant Sound through Double Walls. Journal of the Acoustical Society of America. (22), (2), 1950. pp. 270.
- [4.13] *Sharp, B. H.*: Prediction methods for the Sound Transmission of Building Elements. Noise Control Engineering (11), (2), 1978. pp. 53.
- [4.14] *Nilsson, A. C.*: Some acoustical properties of floating floor constructions. Journal of the Acoustical Society of America (61), (6), 1977.
- [4.15] *Khilman, T.*: Transmission of structure-borne sound transmission in buildings. National Swedish. Institute for Building Research, 1967.
- [4.16] *Reis F.*: Falak rugalmas szerkezeti kapcsolatai a hangszigetelés fokozása érdekében. OTKA kutatás. Kutatóhely: BME ÉSZÉGI Épületakusztikai Laboratórium. Témaszám: 17797.
- [4.17] *Reis F.*: Model Study on Elastical Coupling. Proc. of INTERNOISE'97 Budapest, 1997. pp. 699-704.
- [4.18] *Reis F.*: Vibration transmission of asymmetric T form junctions Proc. of ICA 2001, Rome.
- [4.19] *Vér, L.*: Proc. of Forum Acusticum 1995 Amsterdam.

6. fejezet

- [6.1] *Fletcher, H.–Munson, W. A.*: Loudness, its definition, measurement and calculation. Journal of the Acoustical Society of America, (82), 1933.
- [6.2] *Békésy Gy.*: Experiments on hearing. McGraw-Hill, New York, 1960.
- [6.3] *Robinson, D. W.–Dadson, R. S.*: Threshold of hearing and equal loudness relations for pure tones, and loudness function. Journal of the Acoustical Society of America, (29), 1957, pp. 1284.
- [6.4] *Whittle, L. S., etc.*: The audibility of low frequency sound. Journal of Sound and Vibration, (21), 1972, pp. 431.

7. fejezet

- [7.1] *Greifahn, B.*: Lärmwirkung und Hypertonie. Zeitschrift für Lärmbekämpfung. 41,(2), 1994. március.
- [7.2] *Berglung, B.–Berglund, U. etc.* (szerkesztők): Adverse effect of community noise. Nordic Council of Ministers, Oslo, Norway, 1984.
- [7.3] *WHO kiadvány*: Environmental Health Information. Guidelines for Community Noise.
- [7.4] *Andersson, K. etc.* (szerkesztők): Health Effect of Community Noise. Evaluation of the Nordic Project on “The health effects of community noise”. Nordic Council of Ministers, 1988.
- [7.5] *Kryter, K. D.*: Community annoyance from aircraft and ground vehicle noise. Journal of the Acoustical Society of America 72(4), 1982. október.
- [7.6] *Schulz, T. J.*: Synthesis of social survey on noise annoyance. Journal of the Acoustical Society of America 64(2), 1978. október.
- [7.7] Position paper on dose response relationships between transportation noise and annoyance. European communities, 2002.
- [7.8] *Vos, J.*: Annoyance, caused by simultaneous impulse, road-traffic and aircraft sounds: a quantitative model. Journal of the Acoustical Society of America. 91, (6), 1992. június.
- [7.9] *Houtgast, T.*: The effect of ambient noise on speech intelligibility in classrooms. Applied Acoustics, 14, 1981.
- [7.10] *Bradly, J. S.*: Speech intelligibility studies in classrooms. Journal of the Acoustical Society of America. 80,(3), 1986. szeptember.
- [7.11] *Ortschied, J. etc.*: Structural noise control from a psychological point of view. Contributions to psychological acoustics. szerkesztette Schick, A., etc. Bibliotheks- und Informationssystem der Universität Oldenburg, 1991.
- [7.12] *Taylor, W.*: Journal of the Acoustical Society of America. 38, 113, 1965.
- [7.13] *Peutz*: Articulation loss of consonants as a criteria for speech transmission in a room. Journal of the Audio Engineering Society 19(1971), 11, pp. 920.
- [7.14] *Houtgast, T. és társai*: A review of MTF concept in room acoustics. Journal of the Acoustical Society of America 77(1985), pp. 1060.
- [7.15] *Lazarus, H. és társai*: Bewertung der Sprachkommunikation. Zeitschrift für Lärmbekämpfung. 49(2002), No 3. pp. 104.

9. fejezet

- [9.1] *Bite Pálné*: Adatközlés mérési tapasztalat alapján.
- [9.2] *Hajdú S.*: Adatközlés mérési tapasztalatok alapján.
- [9.3] *Reis F.*: Környezetvédelmi kutatás. Tanulmány: A környezeti zaj elleni védelem követelményeinek rendszere (Témaszám: 25.756) BME Épületakusztikai Laboratórium Kutatási jelentés 2002. Budapest.
- [9.4] *Reis F.*: Predicting in Situ Sound Insulation. Proc. of INTERNOISE '93 Leuven, 1993. pp. 991-994.
- [9.5] *Reis F.*: Practical Aspects of Predicting in Situ Sound Insulation Proc. of the Third International Congress on Air – and Structure borne Sound and Vibration 1994 Montreal. pp. 345-352.
- [9.6] *Reis F.*: Structure borne sound propagation in predicting in situ sound insulation. Bericht aus dem Fraunhofer – Institute für Bauphysik B-BA 4/1995.
- [9.7] *Reis F.*: The Effect of Heat Insulating Hollowed Brick Blocks on the Sound Insulation between Rooms. Proc. of Euronoise 2003, Naples.
- [9.8] *Gerretsen, E.*: Calculation of airborne and impact sound insulation between dwellings. Applied Acoustics 19(1986), 245-265.
- [9.9] *Gerretsen, E.*: Calculation of sound transmission between dwellings by partitions and flanking structures. Applied Acoustics 12(1979), pp. 413-433.
- [9.10] *Reis F.*: Habilitációs tézisek BME Építészmérnöki Kar 2001.
- [9.11] *Reis F.*: Vibration transmission of asymmetric T form junctions. Proc of the 17th International Congress on Acoustics, 2001, Rome, Italy.