SZÉCHENYI ISTVÁN EGYETEM
MŰSZAKI TUDOMÁNYI KAR
ÉPÍTÉSZETI ÉS ÉPÜLETSZERKEZETTANI TANSZÉK

SZAKDOLGOZAT

TEREMAKUSZTIKA A DOBORJÁNI LISZT FERENC KONCERTTEREMBEN

Készítette:

Sós Attila
építészmérnöki szak

Konzulens:

Horváth Tamás
egyetemi tanársegéd

Győr, 2012

1. Bevezetés ... 1
2. A hang, a hallás tulajdonságai, léghangterjedés ... 3
2.1. Alapfogalmak ... 3
2.2. Rezgések és hullámformák ... 6
2.3. Hallás ... 8
2.4. Hallástartomány meghatározása ... 9
2.5. Hangerősség, hangosság ... 10
2.6. Egyenértékű A-hangnyomásszint (L_{Aeq}) ... 11
2.7. Megítélési szint (L_{AM}) ... 12
3. Belső terek akusztikai jellemzői ... 13
3.1. Hangvisszaverődés – sound reflection ... 13
3.2. Hangelnyelés – sound absorption ... 16
3.3. Hangterelés, hangvetők – sound raft, shapes ... 19
3.4. Hanggátlás – sound attenuation ... 20
3.5. Hangszigetelés – sound insulation ... 21
3.6. Utózengési idő – reverberation time ... 22
3.6.1. Utózengési idő kívánt értéke és a tolerancia séma ... 24
3.6.2. Sabine formula ... 25
3.6.3. Eyring formula ... 26
3.6.4. Kuttruff formula ... 26
3.6.5. Utózengési idő mérése ... 27
3.7. Visszhang – echo sound ... 28
3.8. Egyéb teremakusztikai fogalmak, jelzők, mértékek ... 29
3.9. Teremarányok, méretek ... 30
4. Akusztikai ismeretek bővülése ... 31
4.1. Ókor ... 31
4.1.1. Görög színház ... 31
4.1.2. Római színház ... 33
4.2. Középkor ... 34
4.3. Újkor ... 35
4.4. XIX század ... 36
4.5. Napjaink ... 38
4.5.1. Magyarországi kortárs építészet ... 39
4.5.1.1. Művészetek Palotája, Budapest ... 39

4.5.1.2. Kodály Központ, Pécs 42
4.5.2. Külföldi kortárs épületek 46
4.5.2.1. Kristálypalota, Reykjaík 46
4.5.2.2. Operaház, Oslo 48
4.5.2.3. Liszt Ferenc Hangversenyterem, Doborján 50
5. Doborjáni hangversenyterem számítása 56
5.1. Előzmények, tendenciák, tolerancia séma 56
5.2. Akusztikai program lehetőségek 58
5.2.1. Odeon 58
5.2.2. COMSOL 59
5.2.3. IMMI 60
5.2.4. LspCAD 61
5.2.5. CARA 62
5.3. Doborjáni terem vizsgálata CARA programmal 64
5.3.1. I. eset 65
5.3.2. II. eset 66
5.3.3. III. eset 67
5.4. Utózengési idő számolása az MSZ EN 12354-6 szerint 70
5.4.1. I. eset 73
5.4.2. II. eset 74
5.4.3. III. eset 75
5.5. Eredmények összehasonlítása 76
6. Befejezés 78
Összegzés 80
Summary 81

Irodalomjegyzék 82

Mellékletek 90

Elérhetőségek 94

1. Bevezetés

Mindennapi életünk során számos hanghatás ér minket. Zenét hallgatunk, gépekkel dolgozunk és sétálunk az utca zajában. Hangok tömkelege vesz bennünket körül bárhová is megyünk. Természetesnek vesszük létezésüket, hiszen a fülünkkel érzékeljük őket.

Az akusztika vagy más néven hangtan az emberi fül számára hallható hangok keletkezésével, terjedésével és azoknak az élő szervezetre kifejtett hatásával foglalkozó tudomány. Fizikai, nyelvészeti, építészeti, zenei vonatkozásai mindmáig mutatják, hogy milyen fontos szerepe van életünkben ennek a fogalomnak. Így vált célommá az, hogy olyan szakdolgozatot írjak, ami építészek számára is kellő ismeretanyagot biztosít ebben a témában.

A hallható hangok akusztikáját elemezve eljuthatunk az térakusztikához, amely az épületekbe, termekbe beszűrődő vagy ott keletkező hangok egészségileg nem károsító, zavaró mértékről való csökkentésével, illetve előadótermek, színháztermek, hangversenytermek esetén a terem belső kiképzéséből adódó hangtorzítás csökkentésével foglalkozik. A térakusztika további három részfejezetre tagolható: szabadtéri-, stúdió- és teremakusztikára.

Dolgozatom végigkíséri az ember akusztikai élményeit a kezdetektől egészen napjainkig. Ahogyan az adott életkörülmények és helyzetek változtak, az akusztika mindig más és más szempont szerint volt fontos az ember számára. Már az ókortól kezdve megfigyelhetünk kifejezetten az akusztikai hatás fokozására kialakított építményeket.

Napjainkban a megvalósuló épületek, nagy létesítmények, összetett középületek tervezése során akusztikai feladatok is kidolgozásra kerülnek. Ezt rendelet és szabványok is megkövetelik. Kiemelendő kormányrendelet a 27/2008. (XII.3.) KvVM-EüM együttes rendelet (*a környezeti zaj- és rezgésterhelési határértékek megállapításáról*), amely mellett az OTÉK szerinti szabványokat is be kell tartani, például az MSZ 15601 szabványsorozatot.

Utóbbi szabványsorozat tartalmazza a homlokzati falra és az épület belső tereire vonatkozó hangszigetelési követelményeket.

A tervezői nyilatkozatok mellett a nemzetközi szabványok honosítása is folyamatos, de továbbra is vannak olyanok, amelyek csak idegen nyelven (angol, német, stb.) érhetőek el. Ezek tartalmazzák a különböző számítási és méretezési módszereket a témában. A tervezői igények és a rendeltetés követeli meg, hogy mikor kell, mikor szükséges, és mikor elengedhetetlen feltétel ezeknek az elkészítése. Kisebb létesítmények tervezése során azonban gyakran nem készül akusztikai munkarész, vagy csak korábban készült munkarészek adaptálása történik.

Szakdolgozatomban először a témával kapcsolatos alapfogalmakat tisztázom, majd néhány épület tanulmányozása után egy konkrét épületet (Doborján: Liszt Ferenc Hangversenyterem) ismertetek. Ebben az egyik legfontosabb teremakusztikai mértéket, az utózengési idő vizsgálom. A számításokat szabvány kíséretében és teremakusztikai szimulációs programmal is elvégeztem.

2. A hang, a hallás tulajdonságai, léghangterjedés

Szakdolgozatom ezen részében néhány, a témámmal kapcsolatos alapvető fogalmat járok körbe és tisztázom jelentésüket ,majd a hangterjedéssel és a hallás tulajdonságával foglalkozom.

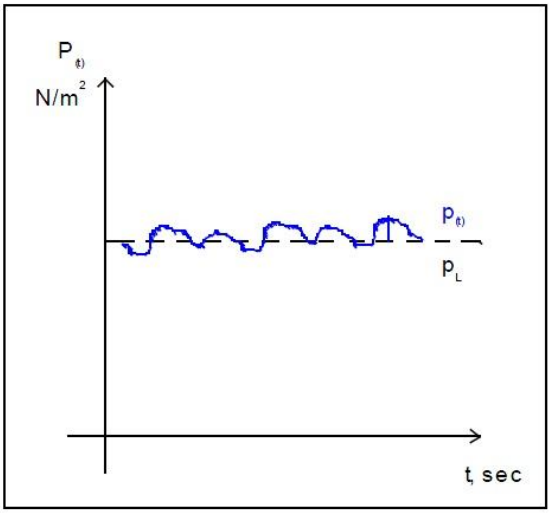
2.1. Alapfogalmak

Hangjelenség

„A levegőben rezgőmozgást végző rugalmas test, vagy például örvényes áramlás hatására a légnyomás körül keletkező kismértékű nyomásingadozás, nyomásrezgés.” [1.]

Közelítéssel megállapítható az állandó légnyomás értéke $p_L \approx 10^5$ N/m^2

A hang mindig hangteret létesít maga körül, melyben a hang terjed. Vagy nevezhetjük nyomásváltozásnak, ami *térben* és *időben* tovaterjed, ez a terjedés a hullámterjedés, amiről még a későbbiekben bővebben írok.



1. ábra. Légnyomás, hangnyomás $P_{(t)}$ eredő nyomás; $p_{(t)}$ hangnyomás; p_L légnyomás <1.>

Hangnyomás – hangnyomásszint (L_p)

A hangjelenség számszerűsítésére szolgáló akusztikai mennyiség, mely kifejezésére logaritmusos érték használt. A hangnyomás a normál légköri nyomáshoz adódik hozzá.

A p_0 érték egyben a hallásküszöb értékét is jelenti. Vonatkoztatási értékét (p_0 = 2,0 · 10^{-5} N/m^2) úgy határozták meg, hogy a hanghullám további fizikai jellemzőinek egység választásához illeszkedjen.

A p_{eff} helyére az effektív, valós értéket kell számoláskor behelyettesíteni.

$$L_p = 10 \cdot lg \left(\frac{p_{eff}^{\ 2}}{p_0^{\ 2}} \right) \qquad \textbf{[dB]}$$

Hangteljesítmény – hangteljesítmény szint (L_w)

A hangforrás erősségét szintén logaritmusos kifejező mennyiség a hangteljesítmény. Egy tetszőleges nagyságú, de a hang terjedési irányára merőleges irányú felületen áthaladó hangenergiát jelenti.

A képletben **W** a hangforrás akusztikai teljesítménye. A közeg rezgésbe hozásához szükséges munka, teljesítmény, aminek mértékegysége Watt.

$\mathbf{W_0}$ a vonatkoztatási szint értéke 10^{-12} W.

$$L_w = 10 \cdot lg \left(\frac{W}{W_0} \right) \qquad \textbf{[dB]}$$

Néhány hangforrás teljesítménye és hangteljesítmény szintje [2.]

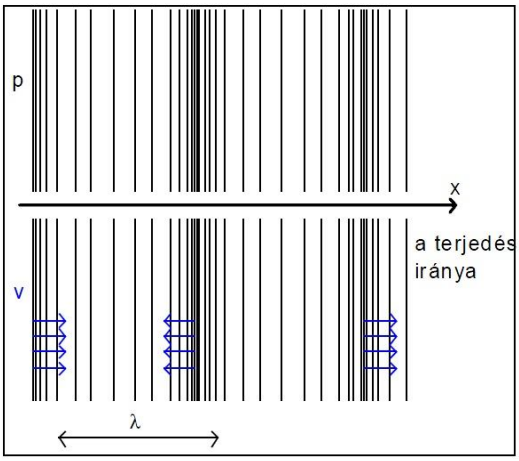
L_w [dB]	**W** [Watt, lg skálán]	
30	10^{-9}	abszorpciós hűtőgép
70	10^{-5}	társalgási beszéd
90	10^{-3}	kiabálás (emberi hang max.)
110	10^{-1}	zongora, orgona
120	10^{0}	légkalapács
130	10^{1}	orgona, üstdob
150	10^{3}	légvédelmi sziréna
180	10^{5}	rakétahajtómű

Hangintenzitás – hangintenzitás szint (L_I)

A hanghullámterjedés teljesítményterjedést is jelent, a terjedés irányára merőleges egységnyi felületen egységnyi idő alatt áthaladó teljesítményt az intenzitás jellemzi.

$$\mathbf{I} = \mathrm{p} \cdot \mathrm{v} = \frac{\mathrm{p}^2}{\rho_L \cdot \mathrm{c}} \qquad \mathbf{[W/m^2]}$$

A képletben **p** a hangnyomást, **v** a részecskesebességet, $\boldsymbol{\rho_L}$ a levegő sűrűségét, **c** a hangsebességet jelöli. Ezek közt a képlet szerinti összefüggés van.



2.ábra Síkhullámú hangterjedés szemléltetése <1.>

$$\frac{p}{v} = \acute{a}llandó = \rho_L \cdot c$$

Hangintenzitás - szint

$$L_w = 10 \cdot lg\left(\frac{I}{I_0}\right) \qquad \mathbf{[dB]}$$

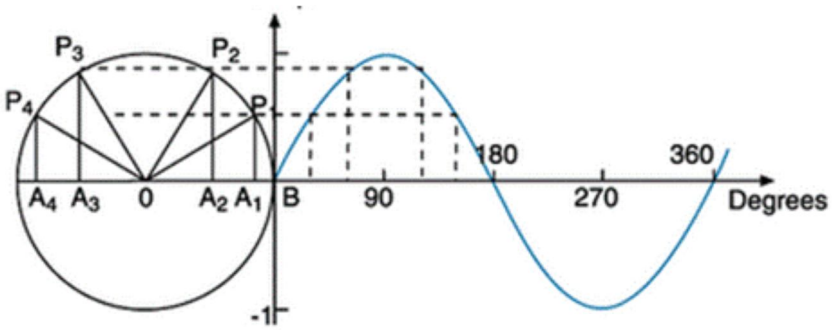
A hangteljesítmény és az intenzitás közötti összefüggés

„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” [1.]

$$\mathbf{W} = I \cdot S \qquad [\mathbf{W}]$$

2.2. Rezgések és hullámformák

Általános rezgés



3. ábra. Szinuszgörbe <2.>

Az ábrán látható hullám egy szinuszgörbe melyet a következőkkel jellemezhetünk:

- **amplitúdó:** a vízszintes tengelytől való távolság [egysége: konstans]
- **periódusidő:** a hullám ismétlődéshez szükséges idő [egysége: másodperc]
- **frekvencia:** egy másodperc alatt végzett rezgések száma [egysége: 1/másodperc, vagy közismert néven **Hz – Hertz**].

Hullámformák

Longitudinális hullám

A hullám terjedési iránya egybeesik a részecskék mozgásának irányával, azaz a hullám terjedési iránya megegyezik a rezgésiránnyal - akkor **sűrűsödési** és **ritkulási** helyek követik egymást. A hullámmozgás során a részecskék a szomszédságukban lévő részecskék által kifejtett erő hatására jönnek mozgásba. Longitudinális hullámra jellemző hogy a részecskék csak mozgásba jönnek a hullám terjedése során, egyensúlyi helyüket nem változtatják meg. Longitudinális hullám mindhárom halmazállapotú közegben létrejöhet – Az akusztika tanulmányozása során a gázokban történő hullámterjedésre használja.

Transzverzális hullám

A hullám terjedési iránya merőleges a részecskék mozgásának irányával, hullámterjedéskor **hullámhegyek** és **hullámvölgyek** figyelhetőek meg. Transzverzális hullám csak szilárd testekben keletkezhet.

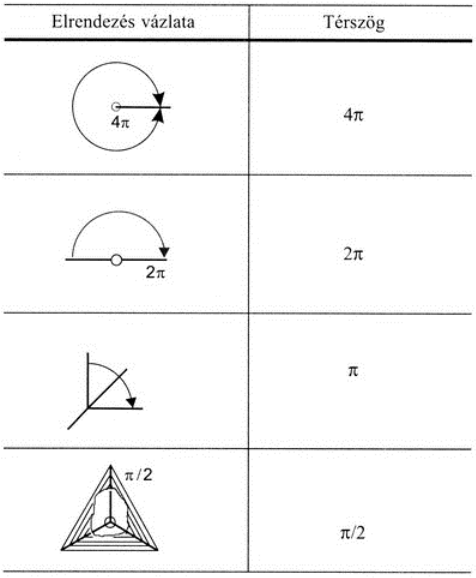
Hajlító, nyíró hullám

Szilárd lapos vagy hosszúkás testekben keletkező hullám. Az anyag alaki rugalmassága a meghatározó, tulajdonképpen egy geometriai deformáció terjedése hullámszerűen. Az akusztikában ezt leginkább egy húrok rezgésével jellemezhetjük, amely léghang formájában a térben szétterjed. [1.]

Hullámterjedés

A legegyszerűbb hullámterjedési forma a **síkhullám**. A síkhullám terjedése az azonos rezgési állapotú helyek – ahol a hangnyomás és a részecskesebesség azonos – *a terjedés irányára merőleges síkokat alkotnak*.

A másik akusztikában gyakran emlegetett hullámterjedési fogalom a **gömbhullám**. Ebben az esetben a hullám minden irányban egyenletesen terjed. A pontszerű hangforrásnak tekintett helyről kiinduló haladó hanghullám, amelynek azonos fázisú pontjai gömbfelületen vannak. A hangforrás és az azonos fázisú pontok között a hullám terjedési ideje állandó. [1.]



4. ábra. Térszög a hangforrás helye alapján <1.>

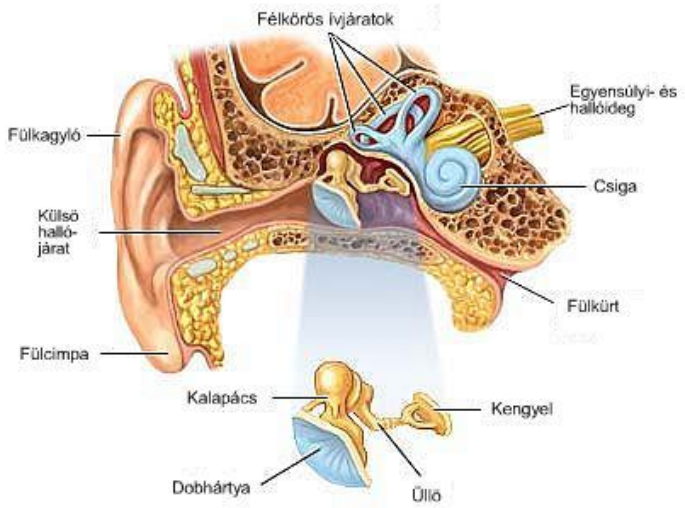
A térszög a hangforrás helye alapján ábra azt mutatja, egy kiinduló feltétel alapján egy gömbszimmetrikus hangforrást a tér különböző lehatárolási síkjába helyezve, a térszög feleződik, ami azonos hangteljesítmény mellett mindig 3 dB hangnyomásszint növekedést eredményez.

A térben kialakuló hangnyomásszint, pontsugárzók esetében a távolság megkétszerezésével 6 dB-el csökken. [1.]

2.3. Hallás

A teremakusztika végső megítélője az emberi értékelés. A körülöttünk lévő világot érzékszerveink segítségével fogjuk fel, és annak tudatában cselekszünk. Érzékszervünk egyike a fülünk, aminek segítésével a hangokat érzékeljük. A hallószervűnk a hallás és az egyensúlyozás érzékszerve, melynek három részét különböztetjük meg: a külső, középső és a belső fül.

A hangok, hanghullámok levegőrezgések útján érik el a fülünket, ami a hallójáraton át bejutva mozgásba hozza a **dobhártyát**. A dobhártya rezgéseit a **hallócsontocskák** (üllő, kalapács, kengyel) adják tovább a belső fülben lévő **csigának**. A hallócsontocskákat ízületek kapcsolják össze. A csigában lévő szőrsejtek vezetik tovább idegi impulzusok segítségével a hallóidegeken az agyközpontunknak. [4.]

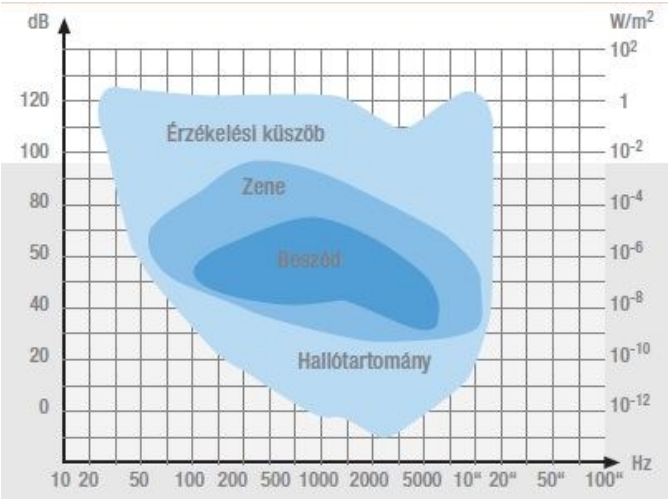


5. ábra. Fül részei <3.>

2.4. Hallástartomány meghatározása

A hallás alsó határát nevezzük **hallásküszöb**nek, amikor éppen érzékelni tudjuk a hangokat. **Fájdalomküszöb**nek vagy **érzékelési küszöb**nek nevezzük ezzel ellentétben a hallás felső határát. E két tartomány között helyezkedik a hallásfelület, amelyet érzékelni tudunk. Ezen tartományokban helyezkedik el a beszéd és a zenei érthetőséghez szükséges erősség.

Az emberi fül számára hallható kb. 16 Hz-től 20 kHz-ig terjedő hangok. Legérzékenyebb a fülünk 700 és 6000 Hz közötti hangok érzékelésére. Itt található ebben a tartományban az úgynevezett abszolút hangnyomásszint (20 μ N/m^2).



6. ábra. Hallótartomány a frekvencia és a hangerő függvényében <4.>

2.5. Hangerősség, hangosság

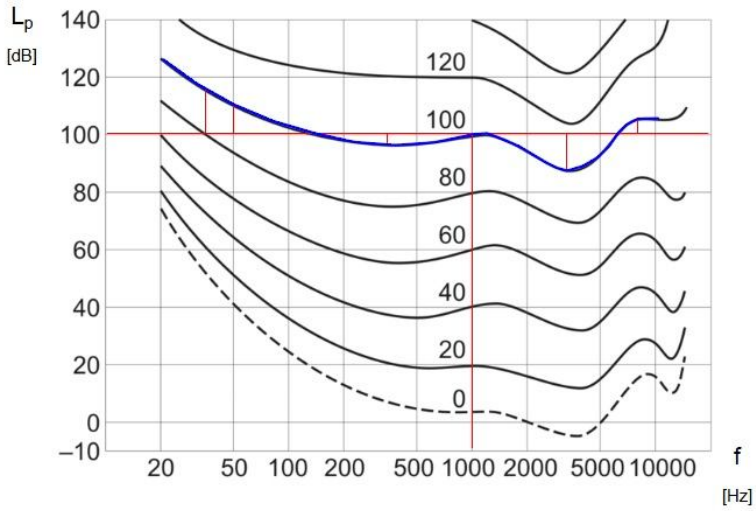
Mint ahogy az előbbi ábra abszcisszáján is látható a hallás nagymértékben függ a frekvenciától. Azonos hangnyomásszintű, de különböző frekvenciájú hangokat más hangosságúnak halljuk. Ahhoz, hogy össze tudjuk hasonlítani különböző frekvenciájú hangok szubjektív hangerősségét, a dB-el skálázott hangnyomásszint nem megfelelő. Az összehasonlításhoz vezették be a hangerősség fogalmát.

Egy hang erősségének meghatározásához az adott hangot össze kell hasonlítani egy etalonhanggal, vonatkozási hanggal, amelynek frekvenciája azonos hangosságérzetet keltő **1 kHz**-es hang. Majd ezt kell állítani olyan erősségűre, mint a megítélendő hang volt. Erre használatosak a *phon*-görbék vagy *Fletcher-Munson* görbék. Jele: L_N ; Mértékegysége: phon [4.]; [5.]

$$L_{p,1000Hz}\,[dB] = L_N\,[phon]$$

Tehát ez azt jelenti, hogy egy 100 phon hangerősségű hang olyan, mint egy 100 dB hangnyomásszintű 1kHz frekvenciájú hang.

A 0 phonnak megfelelő görbe a hallásküszöb frekvenciagörbéjével, a 120 phonnak megfelelő görbe a fájdalomküszöb frekvenciagörbéjével egyenlő.

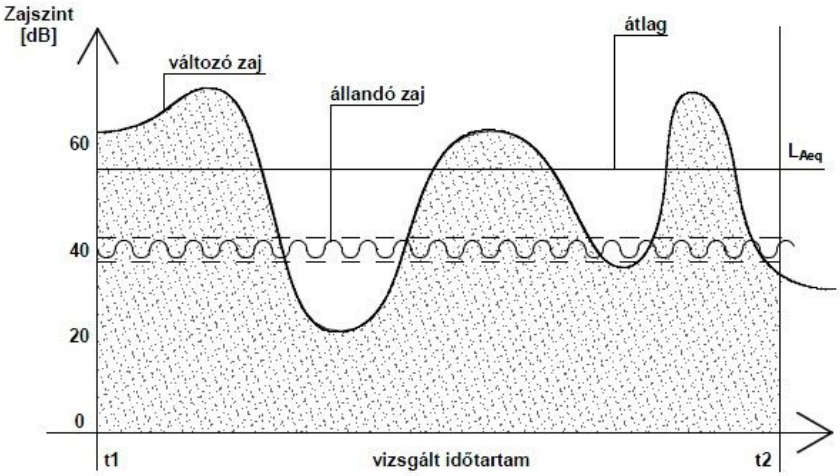


7. ábra. Phon-görbék: A vízszintes tengely a frekvenciát mutatja Hz-ben, a függőleges a hangnyomásszintet dB-ben. A görbék az azonos hangosságúnak érzékelt helyeket mutatják

2.6. Egyenértékű A-hangnyomásszint (egyenértékű A-szint), (L_{Aeq})

Az ekvivalens számolások elvégzéséhez szükség van egy súlyozott hangnyomásszint meghatározására, ami a terjes frekvencia tartományra vonatkozó hangnyomásszintek összegzését eredményezi. Ez az úgynevezett **egyenértékű A-hangnyomásszint**. Jele: $\mathbf{L_{Aeq}}$, mértékegysége: **dB(A)** .

Az időben változó zajok jellemzésére szolgál, olyan állandó zajnak felel meg, ami ugyanolyan hatással van az emberre, mint a vizsgált változó zajé.



8. ábra. Egyenértékű A-hangnyomásszint

Számolása logaritmusos alapon történő összegzés:

T – teljes időtartam (24 óra),

t – vizsgált időtartam (több tényező, különböző zajok esetén.

$$L_{Aeq} = 10\lg\left(\frac{1}{T}\sum_{i=1}^{N} t_i 10^{0,1Lpi}\right) = 10\lg\left(\frac{1}{T}\left(t_1 10^{0,1Lp1} + t_2 10^{0,1Lp2} + \ldots + t_N 10^{0,1LpN}\right)\right)$$

2.7. Megítélési szint (L_{AM})

Az **L_{AM} megítélési szint** az egyenértékű A-hangnyomásszintjéből indul ki. Ehhez a zaj jellegétől függő korrekciós tényezők adódnak hozzá. A korrekciós tényezők nagysága 0 - 6 dB lehet tényezőnként. Ezek a környezeti zaj értékelése szempontjából kedvezőtlen két jelenség hatását az impulzusos zajjelleg miatti és a tiszta hangú összetevő miatti korrekciós tényezők (K_{imp} és K_{ton}) adódnak hozzá. [1.]

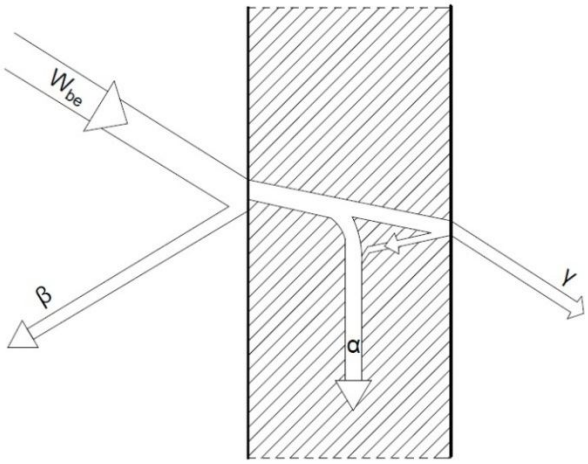
$$L_{AM} = L_{Aeq} + K_{imp} + K_{ton}$$

Ezekre az értékekre határértékeket találunk az épület helye, funkciója és a vizsgálat időpontja alapján a megfelelő érvényben lévő kormányrendelet alapján. Jelenleg például egy zajtól védendő területen lakóépületben lévő lakószoba L_{AM} megítélési szintje nappal (06-22 óra közt) 40 dB, éjjel (22-06 óra közt) 30 dB.

Épületek zajterhelését a homlokzattól 2 m-re, a talajtól 1,5 m vagy padlóvonaltól 1,2 m magasságban mért értékek alapján összegzik. [6.]

3. Belső terek akusztikai jellemzői

Az előző részben tárgyalt hanghullámok a terem határaihoz, felületeihez érve különböző akusztikai jelenségeknek vannak kitéve. Ebben a fejezetben azt mutatom be, hogy mi történik egy belső térben, miután a hanghullám elhagyta a hangforrást.



9. ábra. Hanghullám határoló felülethez érve

Az ábra azt szemlélteti, hogy mi történik, amikor egy hanghullám egy sima, kemény határoló felülethez ér. A hang valamilyen szögben nekiütközik a határoló felületnek. Ekkor az energiája három részre oszlik.

Egyik fele **visszaverődik** a falról (**β**), ennek iránya, visszaverődési szöge az adott burkolat és a hullámformája befolyásolja.

A hullám másik része **elnyelődik** (**α**) hő formájában, a szerkezetben. Speciális esete, amikor egy hanghullám vagy tevékenység rezgésbe hozza a szerkezetet. Ez a jelenség a testhang. Testhangot hozhat létre például a járkálás vagy a padlóra helyezett berendezések működése is.

A harmadik része a fal túloldalán **kisugárzik** (**γ**). Kisugárzás előtt újabb visszaverődés figyelhető meg, amely az elnyelődéshez kapcsolódik, azt erősíti. Jól kialakított épületszerkezetek esetén a kisugárzás nem tapasztalható.

Az energia megmaradás törvényéből és abból, hogy a hang is egy energia, megállapítható, hogy az elnyelt, visszavert és kisugárzott energia összege egyenlő a beeső hangenergiájával. Tényezőkben kifejezve százalékos értékeknek felelnek meg, melynek összege a száz százalék.

$$\alpha + \beta + \gamma = 1$$

3.1. Hangvisszaverődés - sound reflection

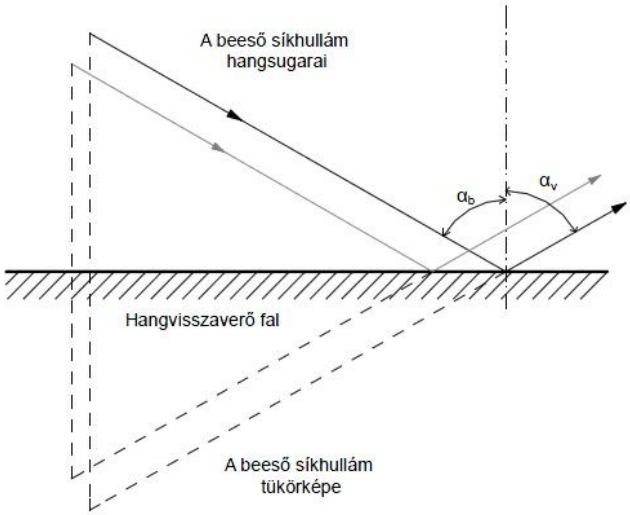
Már az ókorban megfigyelhető, hogy a legegyszerűbb akusztikai tervezési feladatokat figyelembe vették. Ez az úgynevezett **geometriai akusztika**, amellyel hozzávetőlegesen meg lehet oldani az akusztikai feladatokat a mai napig és ezt használja fel a számítógépes szoftverek többsége is.

Hangvisszaverési tényező a felírt energia megmaradás összefüggés alapján kapható. Ezek szerint a **visszaverődési tényező** (**β**) egyenlő a visszavert energia és a beeső energia hányadosával.

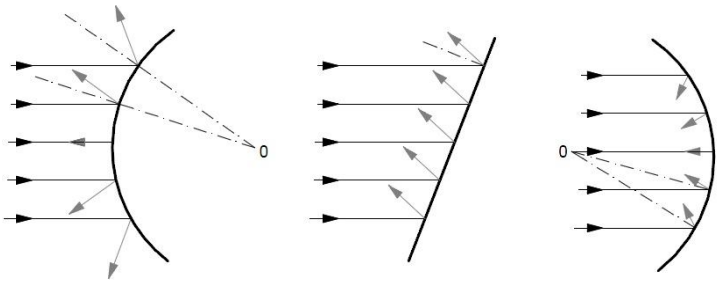
$$\beta = \frac{W_{visszavert}}{W_{be}}$$

A hanghullámok terjedésére is érvényes a **Fermat-elv**, mi szerint a hanghullám a hangforrástól az érzékelési pontig, a legrövidebb ideig tartó úton halad. Ha a terjedése vonalába akadály, elválasztás vagy elhatárolás kerül, törések jönnek létre. A hang ilyenkor *visszaverődik*, *elhajlik*, *torzul* vagy *megtörik*.

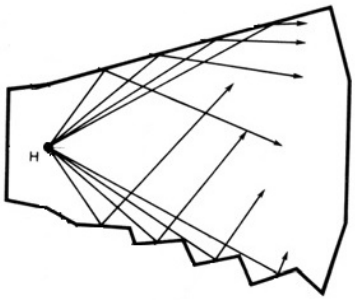
Az akusztika is az optikához hasonlóan értelmezi a visszaverődéseket. Kemény felületű falnak ütköző hanghullám visszaverődik, mint a fény a tükrön. Ezáltal lesz a hangnak egy beesési és egy visszaverődési szöge, mely egyenlő.



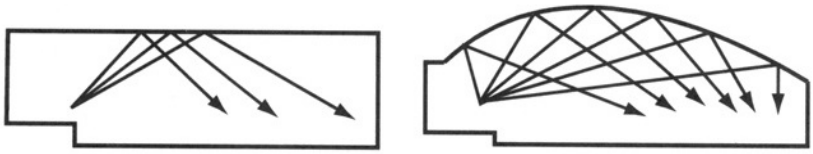
10. ábra. Beesési szög és visszaverődési szög szemléltetése



11. ábra. Síkhullámok visszaverődése domború, sík és homorú felületen



12. ábra. Oldalsó visszaverődések (alaprajz)



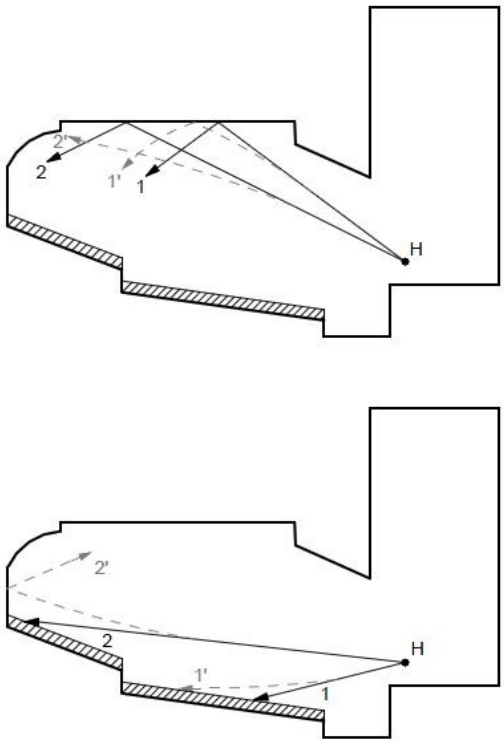
13. ábra. Mennyezeti visszaverődések (metszet)

*„A **Huygens-féle elv** azt mondja ki, hogy valamely hullámfelüet minden pontjából elemi gömbhullámok indulnak ki, s egy későbbi időpontban észlelhető hullámfelület ezeknek az elemi hullámoknak a burkolója.”* [3.]
Ezzel az elvvel jól magyarázható az akadálytalan hullámterjedés, a törés és a visszaverődés.

A Fersnel-féle módosítás szerint azonban a burkoló felületek helyett az elemi hullámok interferenciájával [1] magyarázható a hullám terjedése. Ez a módosított, **Huygens-Fersnel elv** alkalmas az elhajlási jelenségek leírására is.

1 **Interferencia:** fizikában a hullámtalálkozás jelenségét nevezik így

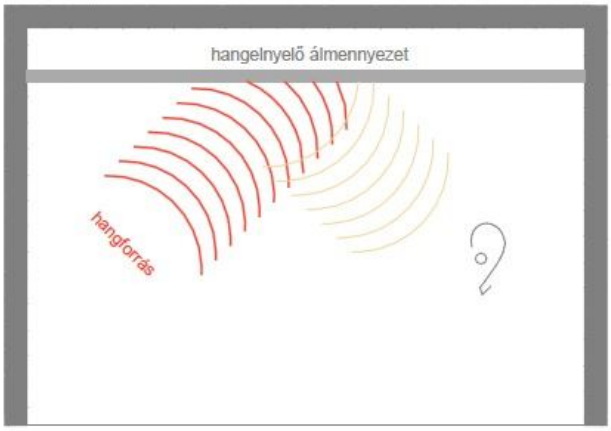
Az elhajlás elsősorban a légtér hőmérsékletének inhomogenitása következtében jön létre. Például ha a közönség hőmérséklete magasabb, akkor a hangsugarak felfelé történő elhajlását eredményezheti. Vagy a nem megfelelően szellőztetett termek esetén, amikor a hőmérséklet fölfelé emelkedik, az elhajlás hatására bizonyos mennyezeti visszaverődések kimaradhatnak. Ez azonban ritka jelenség és főként a szabadtéri előadásoknál fordul elő. [3.]



14. ábra. Hangsugarak elhajlásának szemléltetése különböző hőmérsékletű légtérben: Fent a hőmérséklet fölfelé növekszik; Lent a hőmérséklet fölfelé csökken

3.2. Hangelnyelés - sound absorption

A hangelnyelés, energia csökkenést jelent, a hanghullámok elérik a határoló szerkezetek felületét, ahol energiájukat elvesztik vagy energiát veszítve verődnek már csak vissza. A hanghullámok energiáját a térben nem csak a határoló felületek foghatják fel, hanem térbeli alakzatok (például a kárpitorozott székek vagy a teremben lévő emberek) is. Hangelnyelési képesség minden tárgyra jellemző. A termek megfelelő hangelnyelése határozza meg, hogy a hang a térben hangosabbnak vagy halkabbnak halljuk.



15. ábra. Hangelnyelés

Az anyagok **hangelnyelési tényező**vel (**α**) fejezhetőek ki, melynek mértéke 0 és 1 közé eső százalékos érték. Nulla a nem hangelnyelő, teljesen hangvisszaverő szerkezet, 1 a tejesen hangelnyelő szerkezet. Az elnyelt hangenergia és a beeső hangenergia hányadosaként számítható.

$$\alpha = \frac{W_{elnyelt}}{W_{be}}$$

A hangelnyelő anyagok rövidebb utózengési időt eredményeznek, ami végeredményben jobb akusztikát eredményez valamint a termek zajszintjét is csökkentik.

Leggyakrabban alkalmazott hangelnyelő burkolatok helyei ott vannak, ahol már nem kívánatos visszaverődések keletkeznének, ezért ezt próbáljuk kiküszöbölni azzal. Perforált burkolatok (gipszkarton, fa, fém) jó hangelnyelési tulajdonsággal rendelkeznek, a perforáció kialakítás széles skálájának köszönhetően.

Ideális hangelnyelő szerkezet nincs, ami teljesen hangelnyelő lenne, egyes szabványokban ez nyitott ablak esetét értékelik annak.

A különböző anyagok hangelnyelő tulajdonsága frekvencia tartományokban van meghatározva, mérve. Szabványok, termék katalógusok táblázatokban adnak tájékoztatást jellemző alap hangelnyelési tényező értékére. Egy tervezés során a burkolatok megválasztásánál ez iránymutató.

Anyag	Hangelnyelési tényező, α Oktávsávok középfrekvenciái Hz-ben					
	125	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**
Beton, vakolt tégla	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03
Téglafal, vakolat nélkül	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,07
Kemény padlóburkolat (pl. PVC, parketta) nehéz födémszerkezeten	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05	0,06
Lágy padlóburkolat, nehéz födémszerkezet-en; ≤ 5mm	0,02	0,03	0,06	0,15	0,30	0,40
Lágy padlóburkolat, nehéz födémszerkezet-en; ≥ 10mm	0,04	0,08	0,15	0,30	0,45	0,55
Fa padlóburkolat, parketta, párnafákon	0,12	0,10	0,06	0,05	0,05	0,06
Ablak, üveg homlokzat	0,12	0,08	0,05	0,04	0,03	0,02
Ajtó (fa)	0,14	0,10	0,08	0,08	0,08	0,08
Hálós függöny, 0-200 mm-rel kemény felület előtt	0,05	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02
Nagyméretű nyílások (legkisebb méret > 1m)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
50%-ban nyitott felületű szellőzőrács	0,30	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50

1. táblázat: MSZ EN 12354-6:2004 B melléklet: Anyagok hangelnyelése [7.]

A különböző szabványokban hangelnyelési osztályokat is találunk, ez szintén segítheti a tájékozódást az egyes burkolat típusok kiválasztásához. Hogyha például a gyártó nem hangelnyelési értéknek megfelelő százalékos értéket közöl, hanem hangelnyelési osztálynak megfelelő besorolást.

<table>
<tr><th>α értéke</th><th>Hangelnyelési osztály (a DIN EN ISO 11654 szerint</th><th>Hangelnyelési osztály (a VDI 3755/2000 szerint)</th><th>NRC [2]</th></tr>
<tr><td>0,90; 0,95; 1,00</td><td>A</td><td>kiváló hangelnyelő (extremly absorbing)</td><td rowspan="3">NRC ≥0,75</td></tr>
<tr><td>0,80; 0,85</td><td>B</td><td>kiváló hangelnyelő (extremly absorbing)</td></tr>
<tr><td>0,60; 0,65; 0,70; 0,75</td><td>C</td><td>erősen hangelnyelő (highly absorbing)</td></tr>
<tr><td>0,30; 0,35; 0,40; 0,45; 0,50; 0,55</td><td>D</td><td>hangelnyelő (absorbing)</td><td>0,5≤NRC≤0,75</td></tr>
<tr><td>0,15; 0,20; 0,25</td><td>E</td><td>alacsony hangelnyelő (hardly absorbing)</td><td>0,25≤NRC≥0,5</td></tr>
<tr><td>0,00; 0,05; 0,10</td><td>Nem osztályozott</td><td>hangvisszaverő (reflecting)</td><td>NRC <0,25</td></tr>
</table>

2. táblázat: hangelnyelési osztályok <3.>

3.3. Hangterelés, hangvetők - sound raft, shapes, canopies

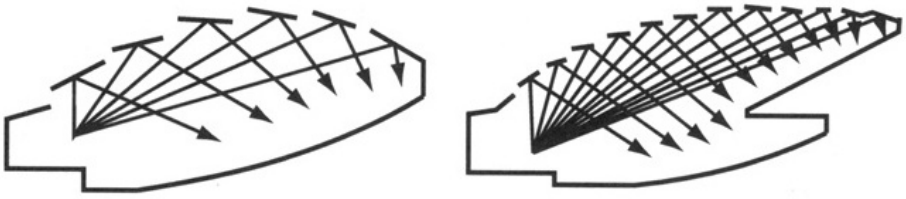
A hangvetők és hangterelők olyan akusztikai eszközök, amelyekkel a közvetlen hangot elsőrendű visszaverődések révén erősítik fel. A **hangvetők** a hangforrás hangjának közvetlen erősítését és irányítását szolgálja, a

[2] **Noise Reduction Coefficient** (NRC) – Zajcsökkentési tényező (hangelnyelési tényező)

hangterelők a terem távolabbi részéiben a visszavert hangnak a hangenergiában szegény helyekre való juttatását célozza.

16. ábra. Svájc: Auditorium Stravinski Hall <5.>

Az építészet során gyakran megfigyelhető a hangvetők és hangterelők földarabolása, kisebb méretű pajzsokra való osztása. Ez nagy figyelmet igényel ugyanis a hangvetőkről és a mögöttük lévő falról, mennyezetről visszaverődő hanghullámok között **interferencia** jöhet létre. [3.]

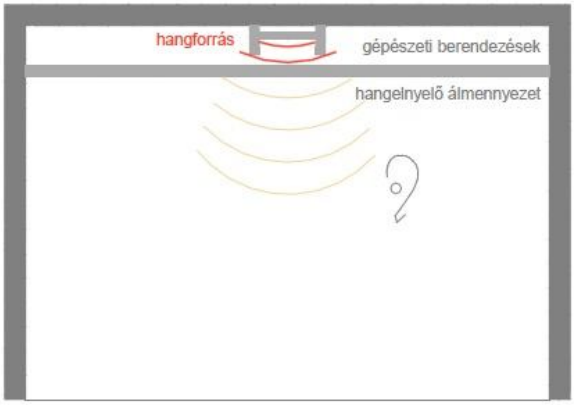


17. ábra. Hangterelők (metszet)

Gyakran alkalmazott megoldás az állítható hangterelők és hangvetők, ilyenkor a különböző zenei igényeknek és különböző helyeken lévő közönség pontos megcélzása is biztosítható. Állíthatóságával a terem használati lehetőségei bővülnek.

3.4. Hanggátlás - sound attenuation

Hanggátlásnak nevezzük azt, amikor azt szeretnénk elérni, hogy a termet zavaró hangok ne jussanak be az adott térbe.



18. ábra. Hanggátlás

A hanggátlás hangvisszaverő akadályokon következik be, és a hanghullámok terjedésének visszaverődés útján való akadályozását jelenti.

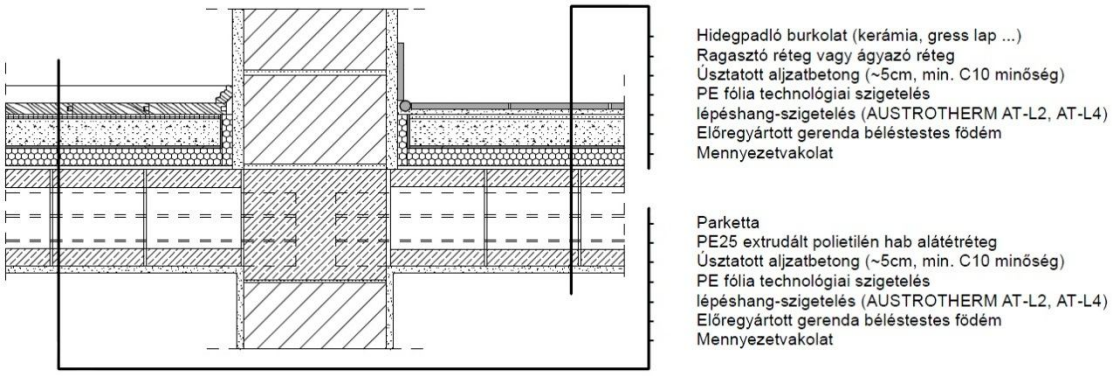
Ennek több formája ismert, az egyik hanggátlási folyamat, amikor a külső környező térből érkező zajokat akarjuk kizárni, a másik formája, amikor épületen belül keletkező hangokat gátoljuk meg a terembe való bejutását. Ezek leggyakrabban a gépészet által létrejövő hangok.

3.5. Hangszigetelés - sound insulation

Hangszigetelés, vagy más néven lépéshanggátlás, a hanggátlás speciális formája. Ezek leggyakrabban a több emeletes épületeknél figyelhető meg, amikor a felsőbb födém szerkezete használat során rezgésbe jön és testhang ként az alatta lévő helyiség mennyezetén jelentkezik. De szomszédos helyiségek esetén is megfigyelhető jelenség.

Fontos, épületszerkezeti feladat a lépéshangszigetelés megfelelő megoldása.

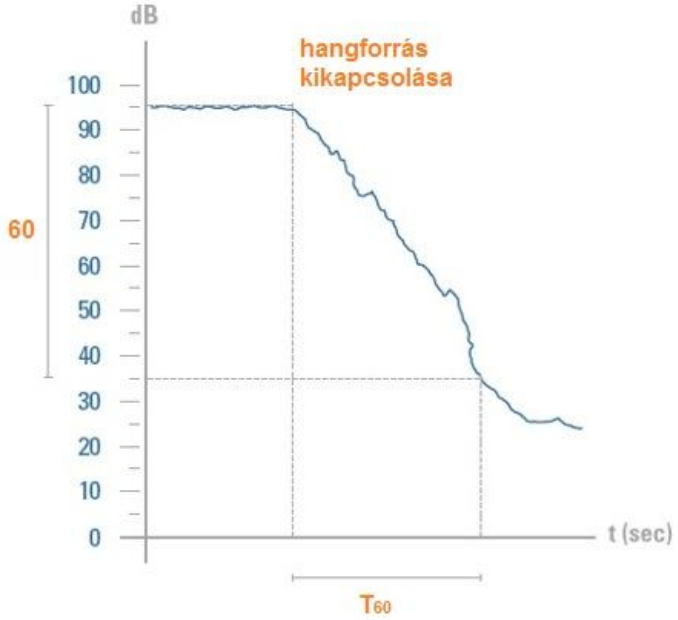
A lépéshang elleni szigetelést úsztatott padlóval kell megoldani. Úsztatott padlónak az olyan szerkezetet nevezzük, ami jó rezgéselnyelő réteggel van ellátva a tartófödémtől, a padló úszik, az úsztatórétegen. Fontos, hogy a falak, határoló szerkezeteknél is legyen hangszigetelő elválasztás.



19. ábra. Meleg és hideg padló lépéshangszigetelése

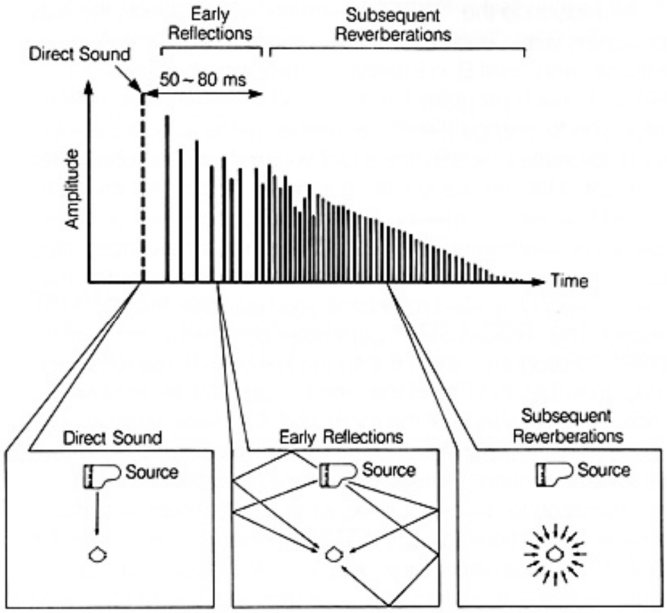
3.6. Utózengési idő - reverberation time

Az az időtartam, amely egy teremben (zárt hangtérben) a hangforrás lekapcsolása pillanatától eltelik, amíg a hangintenzitás szint egymilliomod részére csökken, avagy a kezdeti hangnyomásszint 60 dB-t esik.



20. ábra. Utózengési idő <6.>

Az utózengési idő tulajdonképpen egy lecsengési folyamat, a terem egyik minőségi jellemzője, akusztikailag érzékelteti a teremnagyságot és annak milyenségét.



21. ábra. Utózengés kialakulása <2.>

Az ábra mutatja a zongorától (hangforrástól) a hallgatóig eljutó ***közvetlen hangot***, az egy és kétszeresen visszaverődő hangokat (**korai reflexió**kat), valamint a megsokasodó és **összeolvadó reflexió**kat.

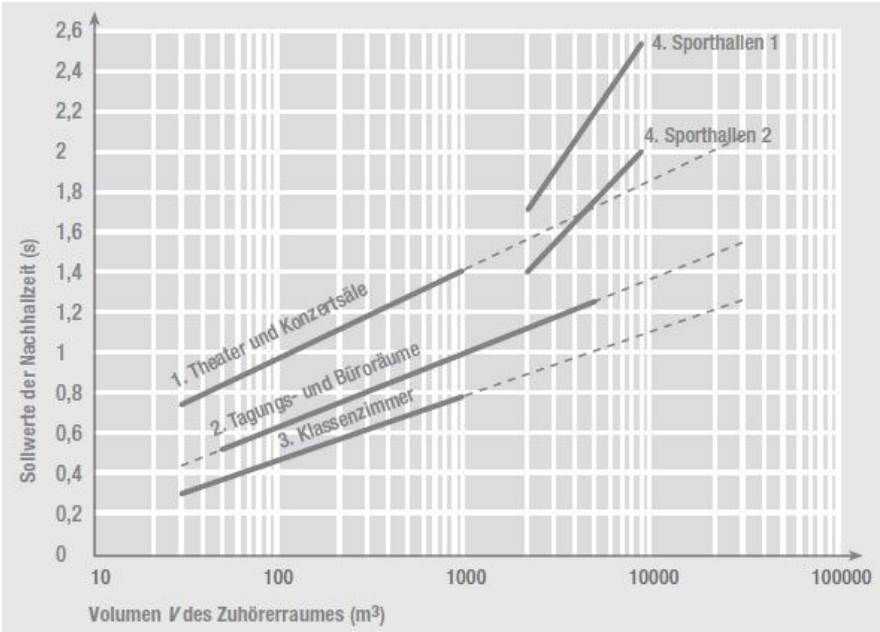
A sokszoros visszaverődések különbözőképpen érintik a különböző frekvenciájú összetevőket, ezért az utózengési idő pontosabb megállapításánál figyelembe kell venni azt a tényt, hogy a nagyobb frekvenciák hamarabb ”kikopnak”.

Utózengési idő felelős a beszédérthetőségért, a zene élvezhetőségért. Éppen ezért más utózengési idő szükséges egy teremben, mint egy teljesen más rendeltetésű koncertteremben. Az optimális terem használathoz meg vannak határozva a megfelelő utózengési idő tartományok, tapasztalatok útján.

- Kis termek, szobák esetében $T_{60} \leq 0{,}5$ s;
- Prózai beszédekhez esetében $T_{60} = 0{,}8 - 1{,}0$ s;
- Zenetermek, koncerttermek esetében $T_{60} = 1 - 2$ s;
- Nagy templomok belső tere elérheti $T_{60} > 3$ s.

3.6.1. Utózengési idő kívánt értéke és a tolerancia séma

A hang exponenciális függvény szerint halkul el fokozatosan. Egy teremben úgy, hogy a teret határoló felületeken többször visszaverődik a hang, amelynek egy része minden egyes visszaverődés alatt elnyelődik. Egyszerűen meghatározható a határoló felület (S, mértékegysége: m^2), a helyiség térfogata (V, mértékegysége: m^3) és a falak elnyelési fok tényezőjének (α) köszönhetően.



22. ábra. Utózengési idő névleges értékei különböző termekben <7.>; [8.]

Az utózengési idő pontos, elvárt értékének a meghatározására is lehetőség van a közelítő érték leolvasásán túl a fenti diagramról. Erre a **DIN 18041:2004** német szabvány ad lehetőséget. A szükséges utózengési idő jele a T_{soll}, a (sollwerte) szóból, mely a következő módokon van meghatározva teremrendeltetés alapján:

Színház és koncertterem esetén: $T_{soll} = [0{,}45 \cdot \lg(V) + 0{,}07]$ [s]

Tárgyaló- és iroda helyiség esetén: $T_{soll} = [0{,}37 \cdot \lg(V) - 0{,}14]$ [s]

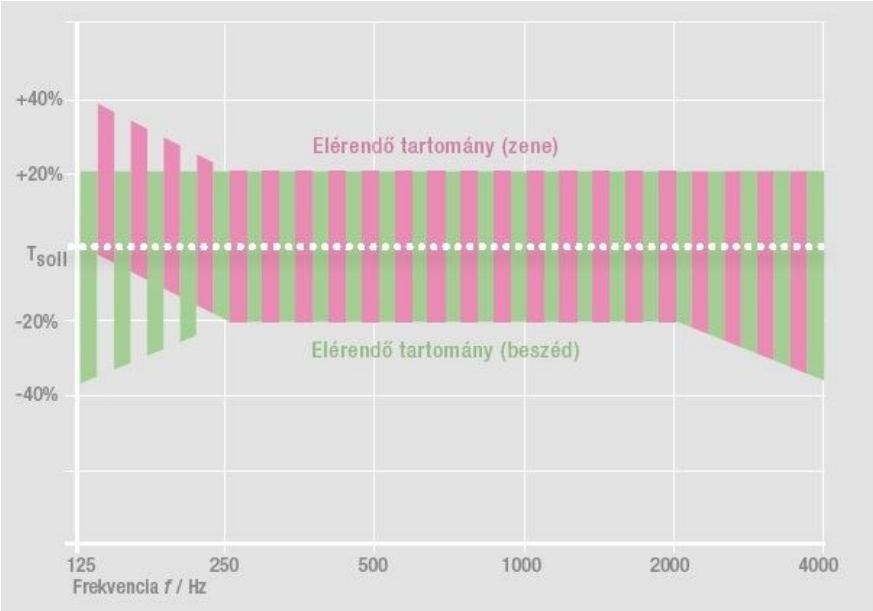
Tanterem esetén: $T_{soll} = [0{,}32 \cdot \lg(V) - 0{,}17]$ [s]

Térfogat nagyságában külön értelmezi a sportcsarnokokat:

Sport 1 ($2000m^3 \leq V \leq 8500m^3$) $T_{soll} = [1{,}27 \cdot \lg(V) - 2{,}49]$ [s]

Sport 2 $T_{soll} = [0{,}95 \cdot \lg(V) - 1{,}74]$ [s]

Az így megkapott értéket (T_{soll}) egy tolerancia határ közé tesszük, mely 20 %-os alsó és felső határt engedélyez 250 - 2000 Hz-es frekvencia érték között, továbbá 40%-os többletet ez alatt és felett.



23. ábra. Tolerancia séma felvétele <8.>; [8.]

Három képlet is található a különböző szakirodalmakban, amelyek tapasztalati, megfigyelésen alapuló úgynevezett **empirikus formulák** az utózengési idő meghatározására. Nem használhatóak nagyon nagy és nem négyszögletes terek esetében.

Az utózengési idő jelölésére sok betűjel használatos, ezek közül a legelterjedtebbek: T; T_{60}; T_{30}; T_{sec}; RT; T_N; τ(tau).

3.6.2. Sabine formula

Először **Wallace Clement Sabine** tett kísérletet az utózengési idő meghatározásra az 1800-as évek végén. Képlete a mai napig használt.

$$T_{60} = \frac{0{,}161 \cdot V}{A} \qquad [s] \qquad \text{[Sabine formula]}$$

$$A = \Sigma \alpha_i \cdot S_i = \alpha_1 \cdot S_1 + \alpha_2 \cdot S_2 \ldots + \alpha_i \cdot S_i \qquad [m^2]$$

Az utózengési idő értéke függ a terem **térfogat**ától (**V**) és az **abszorpció**tól, **elnyelés**től (**A**). Az abszorpció egy összegzéssel kapható, melyben minden

felület négyzetméter értéke (**S**) van megszorozva az adott felület **hangelnyelési tényező**jével (**α**).

Sabine formula nagy utózengési időknél használatos, egyenletes terjedést feltételez minden irányba. Pontatlanabb eredményt ad nagyobb és kisebb időállandó esetén.

3.6.3. Eyring formula [9.]

Egy másik használatos képlet az Eyring formula, amely kisebb termeknél használatos. A képlet akkor adja a legpontosabb eredményt, ha az egyenértékű hangelnyelési felület (α) közel egyenlők.

A képlet a Sabine formula további tapasztalatain alapul. A nevezőben a felület és egy úgynevezett átlagos alfával van logaritmus alapon összeszorozva. Azonos vagy közel hasonló burkolat kialakítás esetén előnyös.

$$T_{60} = \frac{0{,}161 \cdot V}{-S \ln(1-\overline{\alpha})} \qquad \text{[s]} \qquad \text{[Eyring formula]}$$

Az átlagos alfa a következő módon számítható:

$$\overline{\alpha} = \frac{1}{S}\sum_i S_i \cdot \alpha_i = \frac{1}{S_1 + S_2 + \ldots + S_i} S_1 \cdot \alpha_1 + S_2 \cdot \alpha_2 + \ldots + S_i \cdot \alpha_i \qquad [\text{m}^2]$$

3.6.4. Kuttruff formula [9.]

Heinrich Kuttruff bizonyította és alkalmazta az Eyring formula további korrekcióját.

Az Ő képlete a következő:

$$T_{60} = \frac{0{,}161 \cdot V}{S[-\ln(1-\overline{\alpha})] + \Delta + 4mV} \qquad \text{[s]} \qquad \text{[Kuttruff formula]}$$

Bevezetésre került egy Δ tényező és egy 4·m·V együttható, ami a levegő csillapítását veszi figyelembe térfogat függvényében. Utóbbi, hasonló módon mindegyik formulában használható (A_{air}).

A Δ érték számolásánál egy új, korábban figyelembe nem vett értékkel találkozhatunk, ez a **visszaverődés, reflexiós tényező** (**ρ**). A teljes hanghullámot egy egésznek tételezi fel, így a hangelnyelést (α) kivonva az egyből kapható a visszaverődési tényező.

Számítása: $\rho = 1 - \alpha$, átlagos visszaverődés tényező: $\overline{\rho} = 1 - \overline{\alpha}$

A teljes Δ a következő módon kapható:

$$\Delta = \frac{\sum_i \rho_i (\rho_i - \overline{\rho}) S_i^2}{(\overline{\rho} \cdot S)^2 - \sum_i \rho_i^2 \cdot S_i^2}$$

Kuttruff által bemutatott képlet nagyon jó egyetértésben van a számítógéppel szimulált eredményekkel és a valósággal.

3.6.4. Utózengési idő mérése

Az utózengési időt azonban mérhetjük is, nem csak számolhatjuk. Az utózengési idő mérése adja a tényleges adatot, azonban tervezéskor elengedhetetlen feltétel a formulákkal történő várható érték elemzése. A végeredményt mindenképpen mért, valós eredményekkel tudjuk alátámasztani hitelesen és pontosan.

Két féle mód is közismert az utózengési idő mérésére, a zajgenerátoros és az impulzusválaszos mérés.

Zajgenerátoros mérés

Ezzel a módszerrel, a zajgenerátor által létrehozott fehérzaj vagy rózsaszín zaj megszakítás utáni lecsengési időt mérjük.

Fehérzaj a hangtechnikában használatos véletlenszerű zaj, amire igaz az, hogy a teljes vizsgált hangnyomásszintje állandó. A rózsaszín zaj a fehérzaj -3 dB/oktávval csökkenő verziója.

Bekapcsolás és a terem hangterének energiával történő feltöltése után kikapcsoljuk, és mérjük azt az időt, ami alatt a generált hangnyomásszint 60 dB-t csökken. [5.]

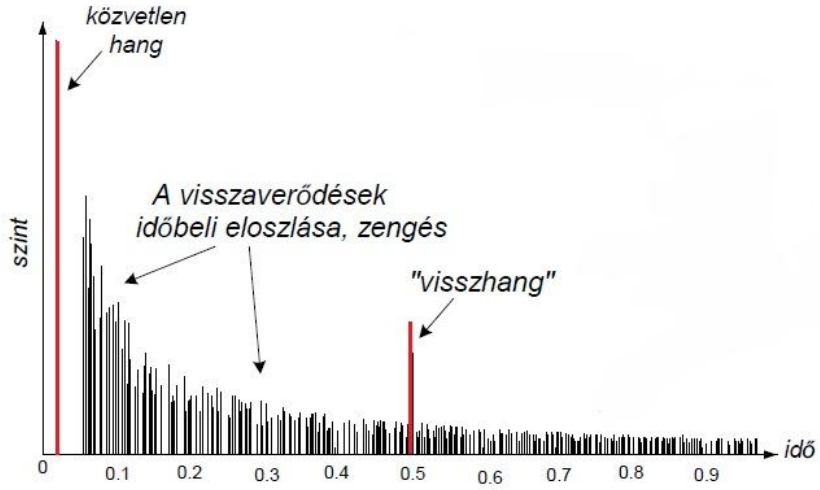
Impulzusválaszos mérés

Gyakoribb elterjedt mérési módszer az impulzusválasz vizsgálata, amikor egy teremben nagy teljesítményű impulzust gerjesztünk. Ez lehet riasztópisztoly vagy akár lufi durrantása is. Itt is azt az időt mérjük, amitől a kezdeti impulzus hangnyomásszintje 60 dB-t csökken. [5.]

3.7. Visszhang - echo sound

Visszhang a visszaverődés speciális esete, amikor az eredeti hangot és annak késleltetett, visszavert hangját külön halljuk, érzékeljük.

Visszhang akkor keletkezik, ha valamely hangjelenség visszaverődés következtében 0,1 s-nál (100 milisecundum) később hallunk. Normál állapotú levegőben ez az idő 34 m hangutat jelent, egy 17 m távolságban álló visszaverő felület visszhangot okozhat. Ilyen távolságok közepes méretű (2000 m^3 fölötti) termekben már előfordulhat, tehát minden akusztikai célú nyilvános helyiségben számolni kell a visszhang keletkezésének lehetőségével. [3.]



24. ábra. Visszaverődő hangok időbeli energia eloszlása <9.>

Az ábra szemlélteti a közvetlen hangot, melynek az energiája a legnagyobb. Időbeli eloszlással egyre több és egyre kisebb energiájú visszaverődések hallhatók. A hanghullám minden egyes visszaverődéssel veszít az energiájából ez a hangelnyeléssel magyarázott. Visszhangot az ábra 0,5 s-nál szemléltet. Ekkor első visszaverődés jön létre távolabbi pontról,

azonban az energiája még magas, miközben a többi közelebbi visszaverődés lényegesen veszített már energiájából (zengés).

Nagyobb termek tervezésénél igyekeznek tartani, hogy a hangforrás és a hallgató között sehol ne legyen 17 méteres vagy nagyobb útkülönbség lehetősége, ha mégis van, akkor hangelnyelő burkolatokat vagy hangterelőket alkalmazhatunk. [3.]

3.8. Egyéb teremakusztikai fogalmak, jelzők, mértékek

Világossági szint (Clarity, C_{80} [dB])

A közvetlen hang utáni 80 ms időintervallumban érkező, valamint az utána érkező összes hangenergia aránya, logaritmusos összefüggésben. A hangtisztaság megmutatja, hogy mennyire jól különíthetők el az egyes hangszerek hangjai egymástól.

Kezdeti elhalási idő (Early Decay Time, EDT [s])

A lecsengési folyamat kezdeti, első 10 dB csökkenése alapján számított utózengési idő. A szubjektív vizsgálatok alapján a kezdeti elhalási idő a hangzás teltségével, a zenei előadás közben érzékelhető zengősséggel hozható kapcsolatba.

Oldalhatás (Lateral efficiency, LE)

Ez a paraméter az oldal- és minden irányból, a kezdeti (80 ms) időintervallumban beérkező hangenergiák arányát adja meg. A paraméter kiemelten fontos a térérzetet jellemzésére (feeling of spaciousness).

Basszus kiemelés (Bass ratio, BR)

A teremben, a 125 Hz + 250 Hz oktávsávokban mért utózengési idő átlagérték viszonyszáma az 500 Hz + 1000 Hz tartományban mért átlagértékhez. Ez a paraméter a hangzás melegségére utal.

Színpadi ellátottság (Early Support, ST_{early})

Színpadon, zenészek akusztikai viszonyaira jellemző szám, a korai reflexiók energiája, mely meghatározza, mennyire hallják a zenészek magukat és egymást.

3.9. Teremarányok, méretek

A teremalakot és méreteit alapvetően a helyiségek funkciója és az építészeti adottságok határozzák meg. Teremakusztikai szempontból a teremalak megválasztását a fejlett szimulációs módszerek elterjedéséig inkább a hagyományokon és megfigyeléseken alapuló eszközök segítették.

Az adott alapterületet és a nézőszámot különböző hossz-szélesség arányokkal megkapható. Hogyha az oldalsó energiák arányának növelésére törekszünk, értelemszerűen keskenyebb alaprajzot kapunk. Ezzel magyarázható az, hogy minél keskenyebb egy terem, annál közelebbről és annál hamarabb halljuk az oldalfalakról történő visszaverődéseket.

„A legjobbnak mondott koncerttermekben a térfogat a nézőszám tízszeresére adódik. Ha kiindulásként a megkívánt nézőszám alapján biztosítja ugyanolyan nézőszám (alaprajzi terület) mellett." [10.]

Egyik teremakusztikai jelző, minőség meghatározó eleme az oldalról a direkt hangot közvetlenül visszaverő úgynevezett korai visszaverődések energiájának a száma.

Téglatest, „shoebox" alakú termeknél az ajánlott térfogatarányok:

$$\frac{H}{V} > 0{,}7 \text{ és } \frac{L}{W} < 2$$

H a terem magassága, W a szélessége, L a hosszúsága. Így a tejes térfogat H · L · W = V összefüggéssel kapható.

„Érdekes összefüggés, hogy a fenti képlet szerinti arányok az adott térfogat mellett elérhető legnagyobb utózengési időt biztosítják." [10.]

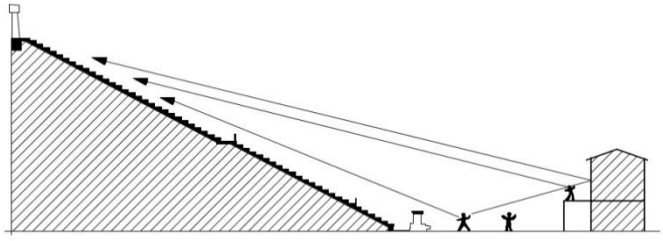
4. Az akusztikai ismeretek bővülése

4.1. Ókor

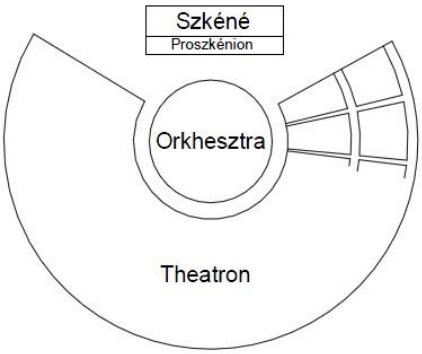
Az első építmények elsősorban a hang terjedés és visszaverődés jelenségeinek tudatos kihasználásán alapultak. Felismerték, hogy a szabad térben, sík felületen a beszéd nem túl nagy távolságig érthető, hogy az emelkedve a hang sokkal érthetőbb messzebb hallható. Szintén az ókor nagy felfedezése volt a félkör alakú emelkedő ülésrend. Ezek a tapasztalati megfigyelések vezettek az ókori színházak kialakulásához. Az ókori színházak között megkülönböztetünk két kort, a görög és a római kort.

4.1.1. Görög színház

Az első görög drámákat, szónoklatokat a templomok előtt tartották. Később alakult ki, hogy hegyoldalra vonult a nézősereg és onnan figyelte az előadásokat. Az előadások kezdetben csak a szónoki orkhesztra megépítéséről szóltak. Ezután alakult csak ki a színház három részből álló elődje: a szkéné, az orkesztra és a theatron.



25. ábra. A priénéi görög színház metszetrajza



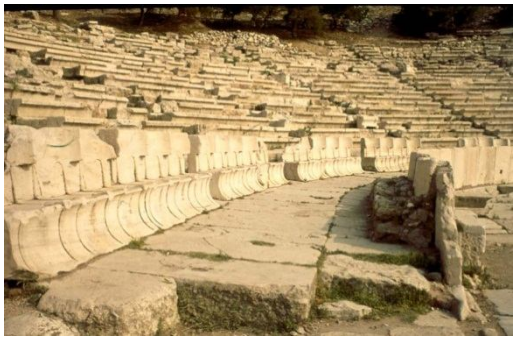
26. ábra. A görög színház hármas rendszere: szkéné, orkhesztra és theatron

Az **orkhesztra** kő borítású, kör alakú színpadtér, mely eleinte fából majd kőből készült. Az orkhesztra kőpadlózata a hang visszaverésére és szétszórására alkalmazott színpadtér volt. A **szkéné** eredetileg csak öltözőként, kelléktárként funkcionált, amelynek hatalmas visszaverő felületei a nézőközönség felé irányították a hangot. Később a szkéné kiegészült a **proszkénion**, ami maga a színpad volt. Elválasztva ezzel a színpadi műsort a kórusi énekléstől. A **theatron** az emelkedő ülésrendű nézőtér, félkör vagy patkó alakban az orkhesztra körül. Kezdetben fából készült ácsolt ülőhelyek voltak, később kőlapokkal borított vagy sziklába vésett lépcsőzetes ülőhelyeket alakítottak ki.

Hogy az akusztikai hangzáson javítsanak további eszközöket alkalmaztak, ez volt az úgynevezett **maszkok**. Vázákat, kőbe vésett színészi maszkokat helyeztek el különböző hangmagasságra bizonyos hangsorrendszer szerint. A színészi maszkok tölcsérszerű szájrésze a hang erősítését segítette.

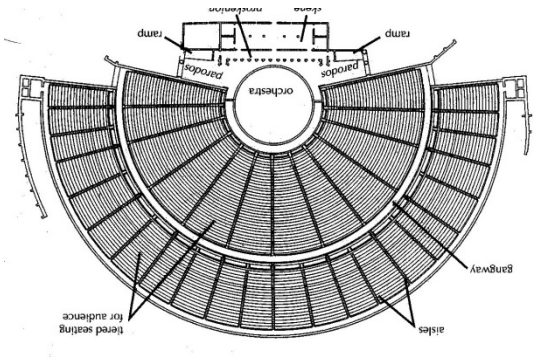
Tehát összességében megállíthatjuk, hogy a görög színházépítők a jó akusztikát a tájolás, alakformálás, és a játszótér környezetének összehangolt kialakításával érték el. Az ilyen és ehhez hasonló helyek, kitüntetett szerepet játszottak a szónoklásokhoz, a néphez intézett beszédekhez is.

27. ábra. Athén: Dionysos színház I. <10.>



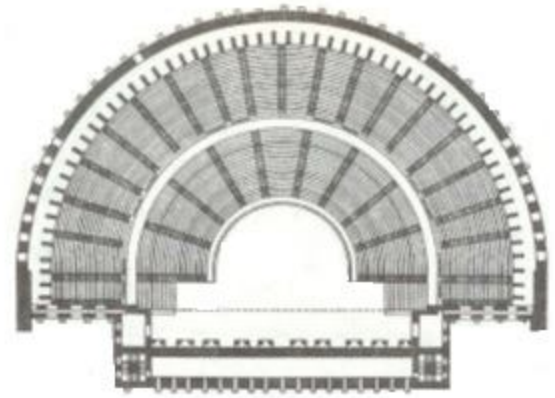
28. ábra. Athén: Dionysos színház II. <10.>

29. ábra. Epidauroszi színház <10.>



30. ábra. Epidauroszi színház alaprajza <10.>

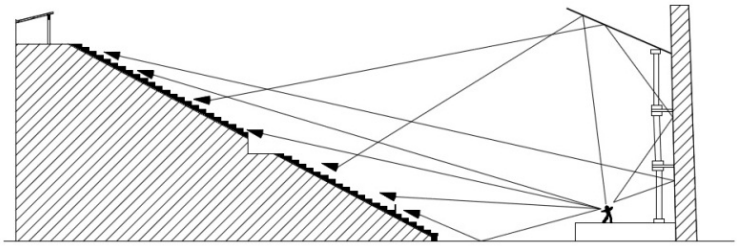
4.1.2. Római színház



31. ábra. A római kori aszpendoszi színház alaprajza, Építész: Zenon <11.>

A római színházak a görög színház elődjeihez képest jelentős átalakulásokon mentek át. A theatron és az orkhesztra félkör alakúvá vált, így a közönség közelebb került a színpadhoz. Később az orkhesztra is nézőtér része lett, ezzel lényegesen romlott, elveszett a korábban hasznos hangvisszaverő jellege.

A színház teljes beépítésével hatalmas hangvető felületek keletkeztek, ezek jelentősen növelték a hangelosztást. Technikai újításnak számított a legfelső sorok mögött elhelyezett a hangellátást javító tetővisszaverő szerkezetek – erre többnyire kifeszített vitorlavásznat alkalmaztak.



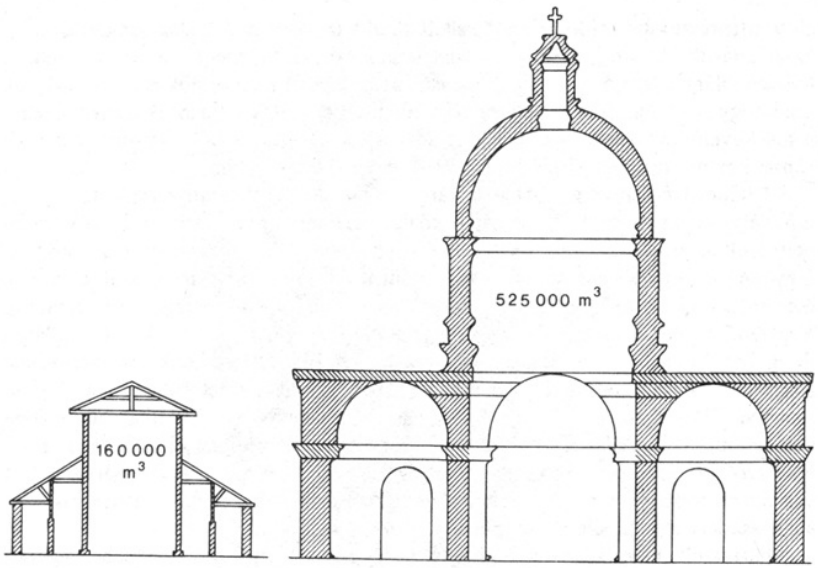
32. ábra. Az aszpendoszi római színház metszetrajza

A rómaiak nemcsak a szabadtéri hang tekintetében, hanem a különböző zárt terű előadótermek, vásárcsarnokok megépítésében is voltak vívmányaik. Ezek az épülete szolgáltak kiinduláskén a mai színházak, hangversenytermek és előadótermek megvalósulásában.

4.2. Középkor

Az akusztika az ókorban a színházépítészetre korlátozódott, középkorban ez átalakult templomépítészetté. Nagy Konstantin gondolatának is köszönhető ez többek közt, úgy gondolta, hogy a római birodalmat és kultúrát úgy mentheti át az új idők viharain, hogy államvallássá teszi a kereszténységet.

Az újonnan épülő templomok a gyülekezetekhez szóló prédikációk és közös énekek által támasztott követelményeknek kellett megfelelniük. Az építészeti stílusok hatására (romanika, gótika majd a reneszánsz) nagy belmagasságú, boltíves lefedésű épületek épültek. A boltívek és kupolák valamint a hatalmas sima, kővel borított falfelületei miatt nagy energiájú **visszaverődések** és **hosszú visszhangok** alakulnak, ezáltal lassú lesz a **lecsengési idő** is. Ezek nagyban rontották az épületek akusztikai tulajdonságát.



33. ábra. A régi (IV.századi) és az új (XVI-XVII. századi) római Szent Péter-templom körvonalrajza a méretek növekedésének összehasonítására <11.>

Elsősorban a templomokban kezdtek el vallási tárgyú előadásokat tartani. Ennek hatására jelent meg a templomokban a XV. században a színpad. Ez akusztikai javulást okozott, de egy idő után betiltották a színjátszást az egyre több világi előadás miatt. Ezt követően udvarokban, pajtákban kezdtek újra játszani, ami a görög kutúra újjáélesztését jelentette.

Mivel az időjáráshoz kellett alkalmazkodni, ami véglegesen meghatározta az előadások témáját és időpontját hamar felvetődött a gondolata annak, hogy a színjátszásnak épületet kell adni.

4.3. Újkor

Gyakran rendeztek paloták kastélyok termeiben szórakozató jellegű előadásokat hercegek, főurak szolgálatára. Ezek a termek azonban csak zenés előadásokra voltak alkalmasak.

A XVI. században jelentek meg az első zenei célra is alkalmazottan alakított templombelsők. A reformáció elterjedése ezt tovább siettette. Olyan gótikus templomok épültek, mint a lipcsei Thomaskirche, amelyek a korábbi templomokhoz képest, kis módosítással többcélú előadóterem, beszédekre, éneklésekre egyaránt alkalmas helyiség volt. Ilyen módosítások voltak a beépített padsorok, fa karzatok, szószékek áthelyezése.

A XVI. század közepén alakult ki a mai egyetemi előadótermek formai elődei Padovában és Bolognában. Ezekre a termekre a meredeken emelkedő amfiteátrumszerű padsorok a jellemzőek.

Galilei volt az első, aki foglalkozott akusztikai kérdésekkel, geometria levezetéseket alkalmazott hangterelések és hangvezetési tervek tanulmányozására. „*Ötven év tudományos munkája betetőzéseként a XVII. sz. közepén megjelenik ATHANASIUS KIRCHER két híres munkája a Musugia Universalis (1650) és Phonugia Nova (1673), amely új alapokra fektetik az akusztikát, és első tudományos tárgyalása a geometriai hangterjedésnek.*” [3.]

Majd Galilei után Mersenne, Gassendi és mások fejlesztik a hangtan tudományát, többek közt a terjedési sebesség mérésével.

A XVII. században újra fellendült a színházépítészet. Ezek a színházak hasonlítanak a görög-római színházak kinézetéhez, de nézősorokat egymás fölé helyezték el, és teljes tetőszerkezetet kaptak ezek az építmények. Új technikák is megjelentek, ilyen volt a **forgószínpad** vagy a kamarazenének is helyet adó **zenei árok**.

4.4. XIX század

A XIX. században, egymást követték a kisebb-nagyobb jelentőséggel bíró színházházak, és új épülettípusként a dalszínházak, operaházak világszerte.

A **Royal Opera House** (Királyi Operaház) London 1858-ban épült operaháza, mely a későbbi évek során további épületrészekkel bővült egészen az 1990-es évekig. De a főhomlokzata, az előcsarnok és a nézőtér végig megőrizte formáját. 2268 látogató befogadására alkalmas.

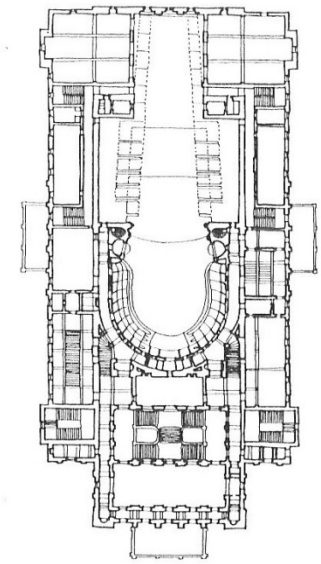
Egy másik világszínvonalú operaház Bécs városközpontjában épült 1861 és 1869 között, ez a **Staatsoper** (*Wiener Staatsoper*, Állami Operaház), francia neoreneszánsz stílusban. *August von Siccardsburg* és *Eduad van der Nüll* tervei alapján, amely mindegy 2200 látogató befogadására alkalmas.

34. ábra. Staatsoper 1900 körül <12.>

35. ábra. Staatsoper ma <12.>

Magyarországról legnevezetesebb a **Magyar Állami Operaház**, vagy Operaház néven közismert operákra, balettekre szakosodott színháza. 1875 és 1884 között épült fel neoreneszánsz stílusban, Ybl Miklós nyertes tervei alapján. Az akkori Fővárosi Közmunkák Tanácsának felkérésére több meghívott pályázó is részt vett.

36. ábra. Operaház légifotó <13.>



37. ábra. Operaház alaprajza <14.>

Az épület sajátossága, a színpadtechnikai berendezések tervezésével a bécsi *Asphaleia* társaságot bízták meg. Korábbi színpadgépezet működtetését, ami kézierővel végezték, a vízierő hasznosítása váltotta fel. A **vízhidraulikával** működő színpadgépészet a világon elsőként került alkalmazásra a magyar Operaházban. A berendezés – azon kívül, hogy szerkezetéből a gyúlékony faanyagot kiküszöbölték és helyette vasat használtak – lehetőség szerint megoldotta, hogy a díszlet és színpadmezők mozgatását, kézi erő helyett, hidraulikus hengerek végezzék, egységesen és áttekinthetően, egy-egy pontról vezérelten.

Egyéb színpadgépezethez tartozó újítást is alkalmaztak, például a **körhorizont-függöny** hidraulikus mozgatását és a színpad két hátsó sarkán elhelyezett, bútor-, jelmez- és kellékszállítás céljára szolgáló, négy emelettel összekötetésben álló teherfelvonót, amely szintén hasonló hidraulikus elven működött. Épületgépészeti berendezésekkel is korszerűen kialakított, a padláson víztározó medencéket építettek ki, záporberendezés megtáplálására tűz esetén. A világítást még légszesz vezetékekkel akarták megoldani, azt azonban hamar leváltotta az elektromos vezetékek.

A kezdeti állapot akusztikájáról kevés adat található, és hiányosak. Első felújítási munkálatokat 1912-ben végezték, ekkor az akusztika javítása érdekében alakítottak át néhány dolgot. Ilyen volt az előzetes kísérletek alapján, fa és cementrabiz burkolatok a nézőtér és a zenekari árok oldalán alkalmazott burkolatok. [11.]

„Ekkor alakították ki a földszinti ruhatárat, növelték a nézőtéri helyek számát, ezáltal süllyesztették és részlegesen a színpad alá tolták a zenekari árkot, lecserélték a székeket, kiszélesítették a közlekedőfolyosókat." [11.]

4.5. Napjaink

Manapság a termek sok tekintetben változatosabbak, amely leginkább méretükben, rendeltetésükben, kialakításukban mutatkozik meg. Sajnos gyakran anyagi okokból megpróbálunk többcélú épületeket, termeket építeni, amit nem mindig sikerül a megfelelő akusztikai igények megtartása mellett megvalósítani. Számtalan olyan esettel találkozhatunk, amikor építészetileg megfelelően kialakított termekben elektronikus berendezéseket hívnak segítségül.

Fontos, hogy az akusztikus és az építész teljes összhangban dolgozzon együtt, hogy esztétikailag a legjobb és akusztikailag a legtökéletesebb termet hozhassák létre. Mindenekelőtt viszont a legfontosabb az, hogy az épület rendeltetése pontosan meghatározott legyen. Olyan ez, mint egy tökéletesen megkomponált mű, minden hangnak a helyén kell lennie!

4.5.1. Magyarországi kortárs építészet

4.5.1.1. Művészetek Palotája, Budapest (2005)

Alapterület: 72.000 m^2

Bruttó alapterület: 22.664 m^2 (csak a hangversenyterem)

Tervező: ZOBOKI-DEMETER & Társai

Akusztika: Artec Consultants Inc, New York
Russell Johnson

38. ábra. MŰPA homlokzata <15.>

39. ábra. MÜPA hangversenyterme <16.>

Funkció:

Többfunkciós kulturális létesítmény. Jellemzője, hogy az épület egyszerre ad teret három művészeti ágnak, ezek a zene, a vizuális- és a színházművészet. Kiállítóhelyei, hangversenyterme, és színházterme egymástól függetlenül tud működni. A Fesztivál Színház, a Nemzeti Hangversenyterem és a Ludwig Múzeumon túl az épület kínálatát könyv- és ajándékboltok is színesítik. A kiszolgáló zónában pedig öltözők, társalgók, irodák, fogadó-, tároló- és technikai helyiségek valamint több próbaterem található.

Tervezés:

A **Bartók Béla Nemzeti Hangversenyterem** építészeti szempontból is a Palota meghatározó egysége. Férőhelyeinek száma: 1544 ülőhely, 158 pódiumülés, 72 padülés, 14 mozgássérült és 6 pótszékkel, összesen 1794 személy befogadására alkalmas egy időben. A hangversenytermet akusztikai adottságok tekintetében Európa legjobb koncerttermei között tartják számon. Világszínvonalú akusztikai berendezéseit a *Russell Johnson* vezette élvonalbeli

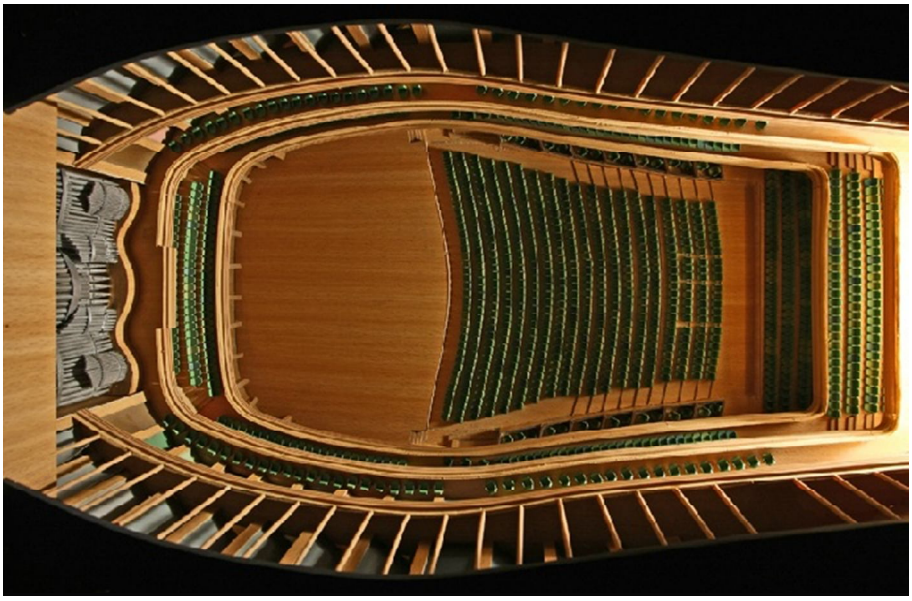
amerikai akusztikus-cég tervezte. A minőségi hangzás elérését korszerű színpadtechnikai- és kommunikációs rendszer segíti.

A koncertterem az épület magjában foglal helyet, formájának jellegzetessége a már említett „cipős doboz” ”shoebox”. A pódium mozgathatósága révén három különböző színpadméret és az éppen rendeltetésnek megfelelő zenekari árok kialakítását teszi lehetővé. A terem további akusztikai eleme, a pódium felett elhelyezkedő, a nézőtér fölé is benyúló három, külön-külön mozgatható elemből álló hangvető. Ezekkel állítható az éppen előadásra kerülő zenemű teremakusztikai követelményei, a hangvető megfelelő magasságba állításával. A hangvetőn helyeztek el világítási, hangfelvételi és hangrögzítő elemeket is.

A hangvetők üzemi mozgástartománya 18,0 méter, összsúlya 45 tonna, melyet 40 db acélsodronyon függeszt fel.

40. ábra. MŰPA hangversenyterem, látványterv <17.>

Változó akusztikát szolgáltató elem az oldalfalak mentén elhelyezkedő zengőkamrák rendszere, melyek tulajdonképpen nagyméretű vasbeton ajtók. Az ajtók nyitott állapota befolyásolja az utózengést. A legkisebb zengőkamra ajtó mérete 1,80 x 3,60m súlya 1,8t, a legnagyobb 2,30 x 7,60m, súlya 4,8t. Továbbá a koncertterem teljesen körbefüggönyözhető, mellyel az utózengési idő 1 másodperc alá is csökkenthető, de az összes (58 darab) zengőkamra ajtajának kinyitásával helyenként elérhető a 4 másodperces utózengési idő is elérhető, így biztosítva a zeneművek számára az éppen ideális akusztikai viszonyokat. [12.]; [13.]

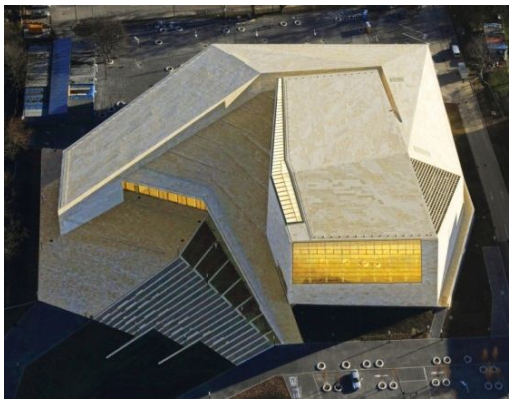


41. ábra. MŰPA látványterv, felülnézet <17.>

42. ábra. MŰPA látványterv, metszet <17.>

4.5.1.2. Kodály központ, Pécs (2010)

Nettő terület: 11.144 m^2
Generáltervező: Építész Stúdió Kft.
Akusztika: Arató-Borsi Éva, Alabárdos Zsuzsanna, Nagy László
Akusztika konzulens: Anders Christian Gade (Dánia)



43. ábra. Kodály központ, légifotó <18.>

44. ábra. Kodály központ, koncertterem <18.>

Funkció:

Az épület elsősorban hangversenyek, akusztikus koncertek számára optimális, ugyanakkor az eltérő akusztikai igényű előadásokra (balett, konferencia) is alkalmas.

Tervezés:

Az épület térszervezése hármas tagolású. Központi magja rejti a 999 fős hangverseny- és konferenciateremet, az ezt körül ölelő közlekedő területek, és további szólampróba- és konferenciatermekre tagolódik. Letisztult purián környezetben jelenik meg a falpillérek mögött feltáruló nagyterem, melyet csápszerűen szerteágazó többszintes térrendszere tovább bonyolít.

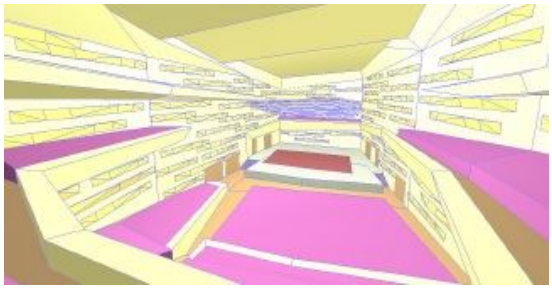
A színpad feletti 7 elemből álló mozgatható, állítható hangvetővel biztosítható a pódiumon játszódó zenészek számára a mindenkori hangzásigénynek megfelelő akusztikai hangzás.

A nézőtéri székek kialakítása a terem multifunkciós használatát szolgáltatják, hidraulikus billentőmű segítségével a földszinti lejtős rész síkpadlóssá tehető, és a székek a hátsó karzat alá tolhatóak. További mobil

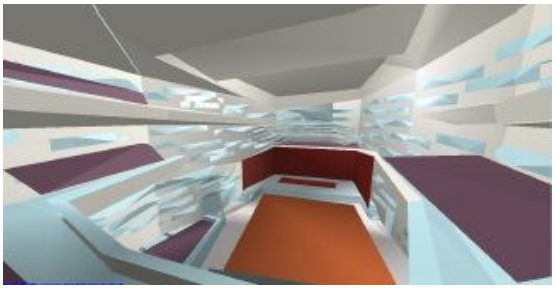
kialakítások is vannak az épületben, ilyen például a ruhatár, melynek kialakítása időszaktól függően felére csökkenthető. [14.]

További akusztikai adatokat az **Auditorium Acoustics** cikkéből tudhatunk meg, mely a **Kotschy és Társai Kft.** helyszíni és modell alapján laborban mért eredményeit tartalmazza. [15.]

Elsőként a terem paramétereit tagalja. Itt tudjuk meg, hogy a koncertterem módosított cipős doboz formának feleltethető meg, két szinti erkéllyel. A térfogata megközelítőleg 13 000 m^3, méretaránya 42 x 22 x 18m (hosszúság x szélesség x magasság). Sajátossága, hogy egyszerre ad teret a nagy szimfóniás zenekaroknak és kórusnak is.



45. ábra. Akusztikai modell nézet – szimfonikus koncert (CATT, Kotschy and Partners Ltd.) <19.>



46. ábra. Akusztikai modell nézet – bankett (Odeon, Gade Mortensen Akustik A/S) <19.>

Mérések I. - A székek hangelnyelésének mérése

A mérés laboratóriumi körülmények között történt, az MSZ EN ISO 354:2003 szabvány alapján. A kapott eredmény lényegesen eltér az egyes irodalmi források eredményeitől. Ezt a viszonylag kis helyiségben (236m^3) sok székkel (20 db) végzett méréssel magyarázták.

	Hangelnyelési tényező, α Oktávsávok középfrekvenciái Hz-ben					
	125	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**
üres székek (empty seats)	0,20	0,35	0,30	0,40	0,50	0,55
elfoglalt székek (occupied seats)	0,40	0,45	0,40	0,60	0,75	0,60

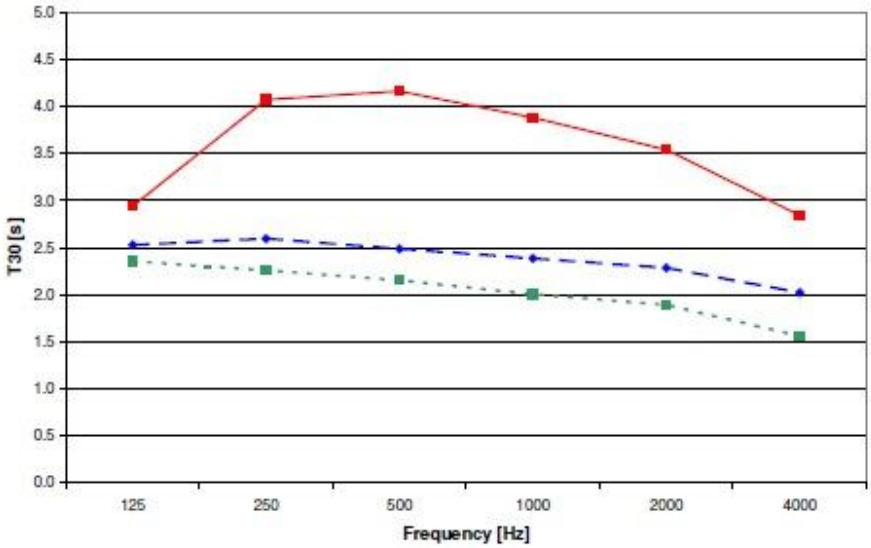
3. táblázat: hangelnyelési értékek

Mérések II. - Koncertteremi mérések

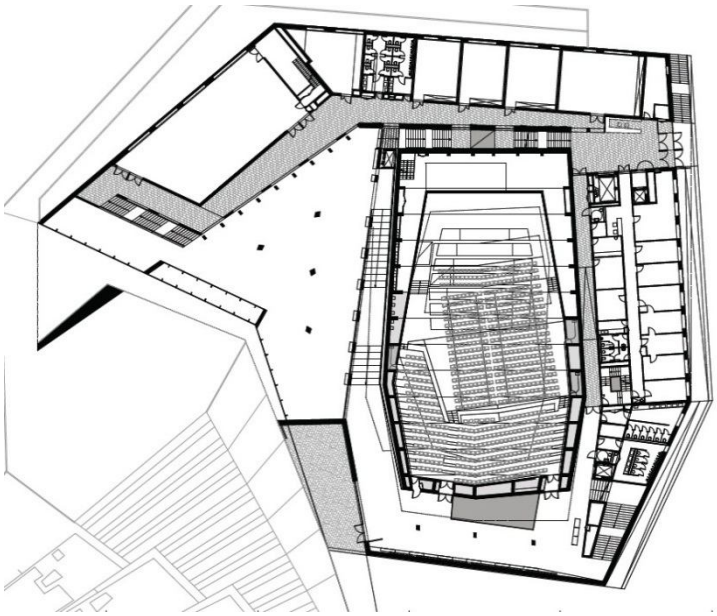
A méréseket három időpontban, három terem használati állapotban mérték. Elsőként üres teremben székek nélkül, majd székek berendezésével, úgy nevezett „zenekari próba” állapotában. Végül 75%-ban elfoglalt székek állapotát szimulálva.

47. ábra. Helyszíni mérés székek nélkül <19.>

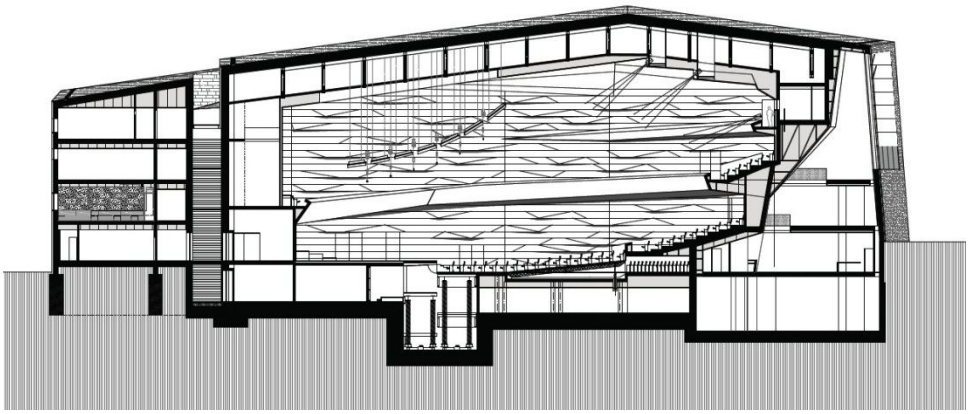
48. ábra. Székek <19.>



49. ábra. Átlagos utózengési idő a teremben székek nélkül (piros, folytonos görbe), szabadon lévő székekkel (kék, szaggatott görbe), és 75%-ban elfoglalt teremben (zöld, pontozott görbe) [15]; <19.>



50. ábra. Kodály központ, alaprajz <18.>



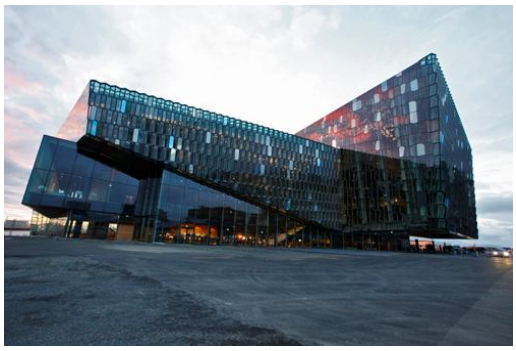
51. ábra. Kodály központ, metszet <18.>

4.5.2. Külföldi kortárs építészet

4.5.2.1. Kristálypalota, Reykjavík, Izland (2011)

HARPA Concert & Conference Centre

Bruttó terület:	29.000 m^2
Generáltervező:	Henning Larsen Architects
Társtervező:	Batteriid Architects
Akusztika:	Artec Consultants Inc.



52. ábra. HARPA homlokzata <20.>

53. ábra. HARPA 1800 fős Koncertterme <20.>

Funkció:

Izland kikötőjében található épület, mely elsősorban az Izlandi Szimfonikus Zenekar és opera otthonát szolgálja, emellett számos nemzetközi és hazai találkozó és konferencia lebonyolításának is helyt ad. Az épület műszakilag jól felszerelt: képes vendégül látni óriási koncerteket, kiállításokat vagy akár bankettek és gyűlések is lebonyolíthatóak benne.

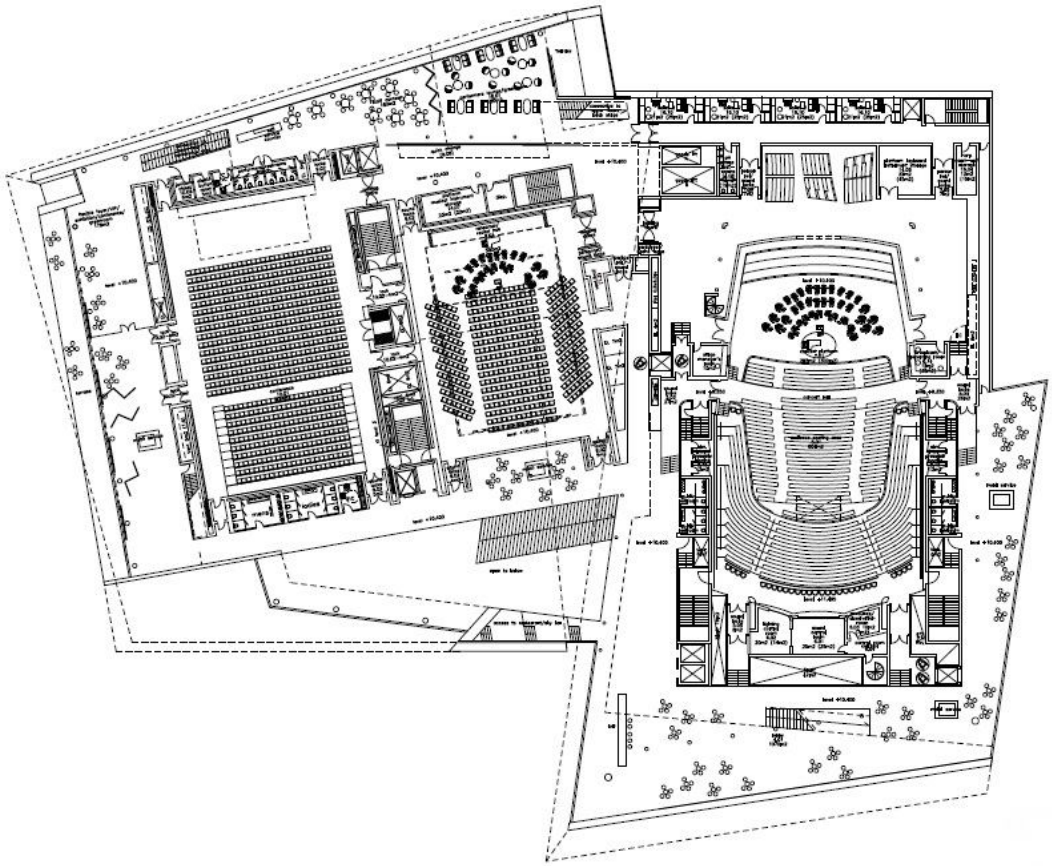
Tervezés:

Az épületben található három nagyobb, nyolc kisebb terem és több kis tárgyaló, illetve különböző eseményekhez kapcsolódó kiszolgáló és személyzeti helyiségek. A tervezés során gondoltak arra, hogy az épület használatnak megfelelően alakítható legyen. Egyszerre alkalmas nagy események **egyidejű megrendezésére**, **egymás zavarása nélkül**.

A különböző termek egységes koncepcióját a Föld elemei ihlették és minden teremnek megvan a saját személyisége, amelyek Izland természeti

viszonyait tükrözik. Ilyenek a változó éghajlati-, és fényviszonyokat megjelenítő termek színvilága, vagy a bazaltsziklázat hatását keltő homlokzat.

Az 1800 fős Edborg koncertterem kialakításával a világ élmezőnyébe lépett, az akusztikai terveket az Artec Consultants készítette, ugyanaz a csapat, akik a Bartók Béla Nemzeti Koncertterem (Művészetek Palotája) kialakításáért voltak felelősek Budapesten. [16.]

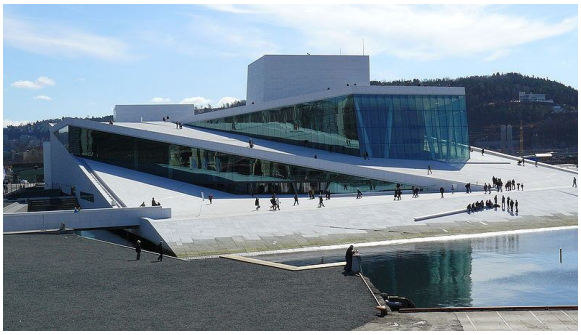


54. ábra. HARPA koncert és konferencia terem alaprajz, I. szint <21.>

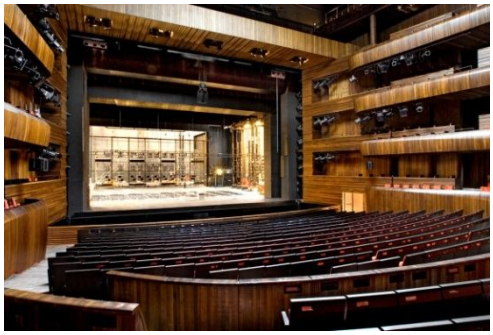
4.5.2.2. Operaház, Oslo, Norvégia (2008)

Oslo Opera House

Bruttó terület:	38.500 m^2
Tervező idoda:	Snøhetta AS
Építészek:	Martin Dietrichson, Ibrahim El Hayawan, Chandani Ratnawira, Harriet Rikheim, Marianne Saetre
Akusztika:	Brekke & Strand Akustikk AS, Arup Acoustic



55. ábra. Oslo Opera House, homlokzata <22.>



56. ábra. Oslo Opera House, belső <22.>

Funkció:

A jéghegyre emlékeztető, fehérmárvánnyal burkolt új oslói operaházat egy csapásra világhírűvé vált Snøhetta tervezte. Megvalósulása óta a legnagyobb kulturális célú épület lett Norvégiában. Közel 1100 helyiséget foglal magába, melyben helyet kapott hangversenyterem és színházterem is.

Tervezés:

A terv koncepciója három fő elemen alapszik, ezek: a "hullámfal", a "gyár" és a "szőnyeg". Az épület tervének szerves része volt az anyagok, és azok súlyának, színének, textúrájának és hőmérsékletének figyelembe vétele. A Snøhetta iroda építészete jellemzően narratív, és épületeikben az anyagok a terek meghatározó elemeiként működnek, azok találkozásán keresztül alakul ki házaik építészete.

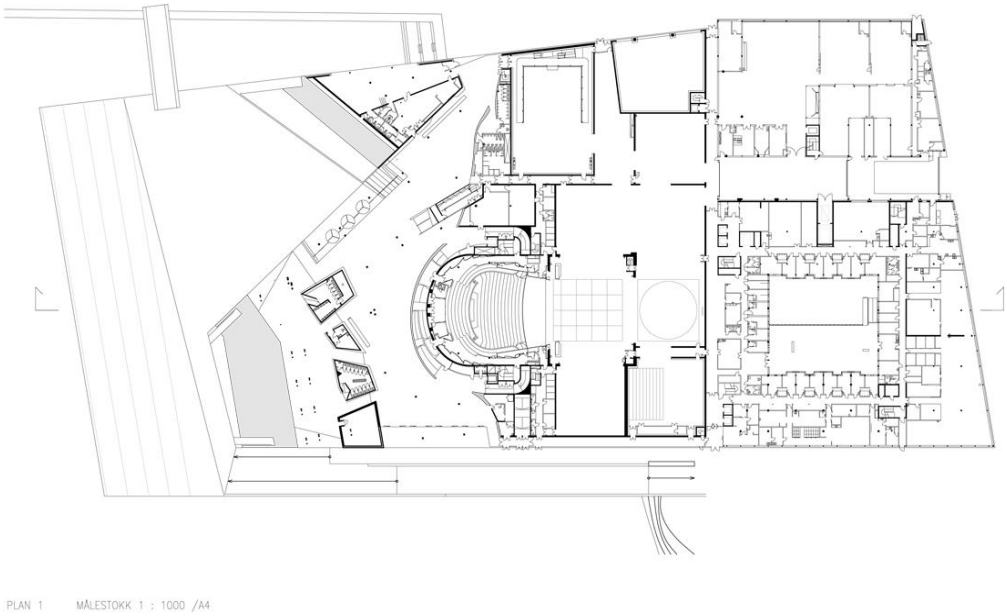
Nagy hangversenyterme 1370 férőhelyes, patkó alakú. Az ezt körülölelő három galériára vezető főlépcsőből, és további helyiségekből áll. Továbbá található

még az épületben egy 400 férőhelyes, kisebb koncertek, banketteknek helyt adó terem és színházterem is.

A nagyterem zenekari árok három emelő segítségével magasságban és alapterületben állítható, ezek működtetése a homlokzati felületbe beépített napelemeknek köszönhetően energiatakarékos működtetésre alkalmas. A nagyterem tölgyburkolatait a megfelelően sötét árnyalat elérésére ammóniával kezelték. A javarészt kézműves munkával készült faborítással ékes belső tereket a neves izlandi képzőművész, Ólafur Elíasson több alkotása díszíti.

A hangzással kapcsolatos követelményeknek is megfelel az épület, ugyanis sem szellőzőrendszer, sem környezeti zajok nem zavarják az előadásokat. Zenekari próbatermek zajszintje 17 dB.

A színházterem rendelkezik két mozgatható emelő toronnyal, melynek köszönhetően csökkenteni és növelni lehet a színpadnyílást. A zenekari árok magassága és mérete is állítható, az előadások és a közönség rendeltetésének megfelelően. Az ülőhelyek elrendezése is változtatható, hagyományos vagy amfiteátrum rendszer kialakítása szerint. [17.]; [18.]



57. ábra. Oslo Opera House, alaprajz <22.>

4.5.2.3. Liszt Ferenc Hangversenyterem, Doborján, Ausztria (2006)

Concert Hall Raiding, Konzertsaal in Raiding

Nettó terület: 900 m^2

Építész iroda: Kempe Thill Architects, Németország

Építész: Oliver Thill

Akusztika: Müller-BBM, Planeg, Németország
Karlheinz Müller, Michael Wahl

58. ábra. Liszt Ferenc Hangversenyterem, Homlokzat <23.>

59. ábra. Liszt Ferenc Hangversenyterem, Koncertterem <23.>

Funkció:

Liszt Ferenc halálának 120. évében és 195. születésnapjára emlékezve épült fel az egykori szülőháza mellett a mai Doborján (Raiding, Ausztria Burgenland tartomány) kis lakossági számú településén. Az épület külső megjelenése visszafogott, fehér homlokzata és cipős doboz formája alkalmazkodik a település házaihoz, és jól kitűnik a vidéki zöld környezetben. Zeneterme 600 fős hallgatóság befogadására alkalmas

Tervezés:

Az épület egy L alakú telken helyezkedik el, amely magában foglalja a szülőházat is - szerves kapcsolatban van vele, azáltal hogy a nagyméretű akril nyílászárók zavartalan rálátást biztosítanak rá.

Az épület megközelíthető a szülőház felől, a hátsó telken kívülről a parkolók felől, és a Liszt Ferenc utcáról, ezen három homlokzatán nagy nyílászáró felület és oldalaiban elhelyezett enyhe rámpák vezetnek a bejárathoz.

Az épület központjában a már említett 600 fős koncerttermet takar, amelyet kiszolgáló és fogadócsarnokként szolgáló helyiségek vesznek körül két szinten. Belső burkolatánál a fenyőfa kazetta dominál. Ezt az anyagot alkalmazták a koncertterem kialakításánál is. A falakon ~2,5 x 3,5 m-es rétegelt ragasztott fenyőfa táblák vannak rögzítve. A burkolat legfelső rétegét domború kialakítású, ezt a burkolati módot alkalmazták a korlátnál is. Ezek a burkolatok biztosítják a hangvisszaverődést.

A színpad mintegy 80 cm magas pódiumként emelkedik a közönséggel szembe. A hallgatóság padozata a hátsó sorokban enyhén emelkedő széken foglalhat helyet. A székek mindenhol egyformák, szabadon mozgatható kárpitorozottak. A hátsó sorokban fennáll annak a „cipős doboz" formának a hátránya, hogy nem mindenki láthatja az előadást. Ez leginkább az emeleti széksorokra jellemző.

A Detail Magazin közlése szerint:

*„In the Franz Liszt Hall for chamber music (without electro-acoustic amplification), the optimum reverberation time is approximately **1,6 - 1,8 s** in the mid-frequency range."* [19.]

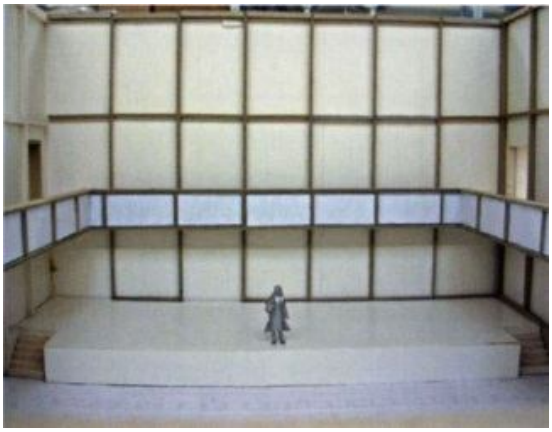
„A Liszt Ferenc kamarazenei koncertteremben (elektro-akusztikai erősítés nélkül) az optimális utózengési idő hozzávetőlegesen **1,6 - 1,8 s** középfrekvencia tartományban."

„Generally speaking, the shape of a hall should be long, narrow and high. The auditorium in Raiding was optimized in this respect in a second design phase"

„Általánosságban elmondható, hogy a terem formája hosszú, keskeny és magas kell, hogy legyen. Doborján hangversenytermét e tekintetben a második tervezési fázisban optimalizálták."

„In a concert hall, roughly 10-20 per cent of the sound energy is trasmitted in the from of direct sound. The rest is reflected from the walls, ceiling and floor.” [19.]

A koncertterem hangenergiájának körülbelül 10-20 százalékát, amelyet közvetlen hang adja. A maradék visszaverődik a falakról, a mennyezetről és a padlóról.



60. ábra. Koncertterem makett <24.>

61. ábra. Koncertterem fény látványterv <24.>

„The surface texture plays an important role in scattering the sound. ... In order to ensure a good distribution of sound within the present space and at the time avoid "flutter echoes", the spruce sheet elements were given three-dimension curvature.” [19.]

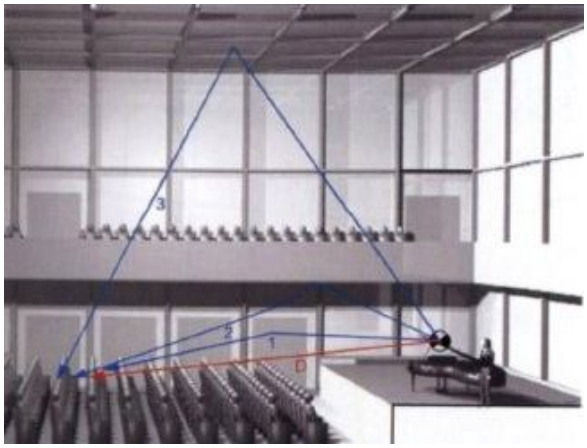
„A felület textúrája fontos szerepet játszik a hangzásban. … Annak érdekében, hogy jó legyen hang eloszlás a teremben és elkerülje a "visszhangzást", a lucfenyő lap burkolatok háromdimenziós görbületet kaptak.”

„The seating also plays a decisive role not only in terms of comfort, but acoustically, too. The aim is to balance out different levels of occupation in the hall. Measurements were therefore taken for the proposed seats with and without an audience.” [19.]

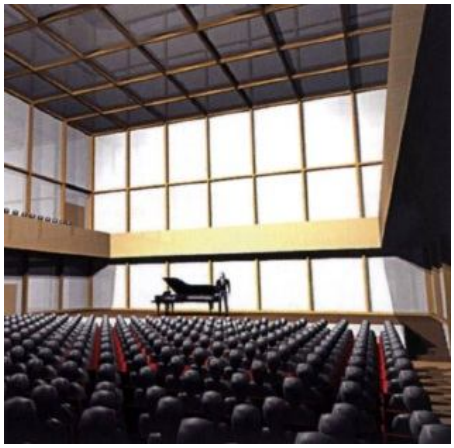
„Az ülések is meghatározó szerepet töltenek be, nemcsak a kényelem szempontjából, de akusztikailag is. A cél az volt, hogy egyensúlyban tartsa a különböző szintű foglalkozásokat a teremben. A méréseknél figyelembe vették az üléseket közönséggel és közönség nélkül is.”

„The hall has proved to be an excellent venue for the works of Franz Liszt; but in other concert for soloists and ensembles, too, one sees how vivid chamber music can sound, given the appropriate acoustic environment." [19.]

„A terem bebizonyította, hogy kiváló helyszíne Liszt Ferenc műveinek, de egyéb szólisták és együttesek koncertjeinek is helyt ad. Látható, hogy a kamarazene milyen elevenné válik a megfelelő akusztikai környezetben."



62. ábra. Közvetlen hang és elsődleges visszaverődések <24.>

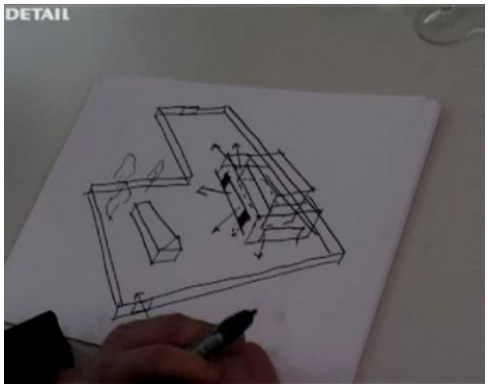


63. ábra. Akusztikus látványterv <24.>

A **DetailPlus** által közölt videóból, több fontos dolgot megtudhatunk az épülettel kapcsolatosan.

Az építésszel készült interjúból tudhatunk a telek fontosságáról és a szülőházzal szervesen kialakuló L alak létrejöttéről. A tájolásról, hogy a koncerttermet úgy igyekeztek elhelyezni a telken, hogy az több irányból megközelíthető legyen.

64. ábra. Detail Plus video, Oliver Thill {1.}



65. ábra. Detail Plus video,épület elhelyezkedés {1.}

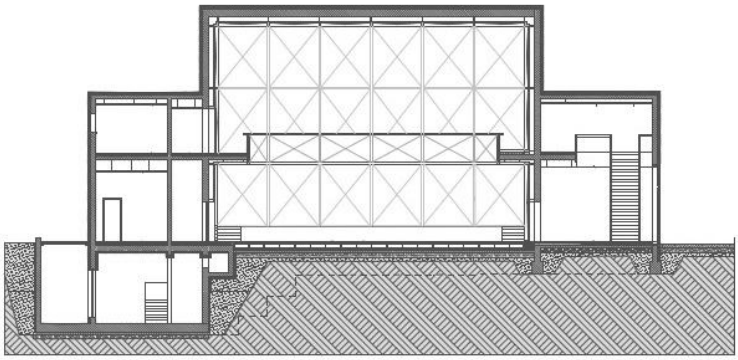
Az akusztikai résznél megjegyzi, hogy mindenképpen el akarták kerülni, hogy a terem tele legyen technikai felszerelésekkel. Burkolat kialakításánál pedig végig egy 3 m-es modulban gondolkoztak, amit a falakon alkalmaztak. Így esett a választásuk a fenyőfa kazettás fára, mely 3 rétegű falemez és a 3D-s fűrésszel domborúra vágott legfelső réteg összeragasztásából áll.

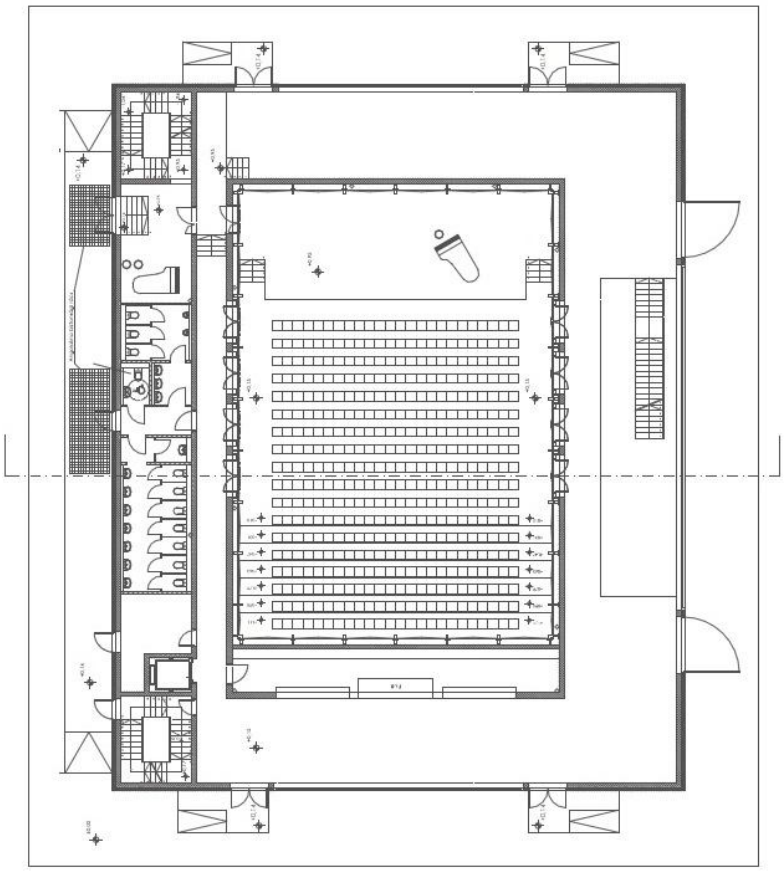
Továbbá, kiemeli az akrilüveg alkalmazását, melynek nagy szerepe volt a választásnál. Hiszen a kilátást és a szülőházra történő zavartalan rálátást biztosítja. Az üveg mérete 18 x 4m, mely hőingadozásra akár 18 cm-t is képes tágulni. Ezt teflonszalagon történő csuszáztatással oldották meg és széles rejtett ablakkeretekkel. A probléma az akrilüveg hőátbocsátási tényezőjével volt, ugyanis az rosszabb, mint a hőszigetelő üvegé. De összességében az üvegfelület elenyésző a homlokzat teljes felületéhez, így kapta meg az épület az osztrák energetikai bizonyítványt.

Végül az alkalmazott homlokzati anyagról beszél. Nem akartak egyszerű nemes vakolatot alkalmazni, mondván az nem elég nemes egy koncertteremhez. Így a helyszínen felvitt poliuretán fóliát választották. Előnye, hogy a tetőn el lehetett hagyni a bádog és vízszigetelő munkákat és az épület egy fehér porcelánra hasonlít. {1.}

66. ábra. Koncertterem <23.>

67. ábra. Koncertterem <23.>





68. ábra. Doborján koncertterem, metszet, alaprajz

Épületről készített tervek a mellékletben találhatóak.

5. Doborjáni hangversenyterem számítása

5.1. Előzmények, tendenciák, tolerancia séma

Tervezéskor a rendeltetésnek megfelelő utózengési időt próbáljuk elérni. Ilyenkor a hangelnyelő anyagok mennyiségét számoljuk ki, ami a csillapítást okozza majd a teremben. Először a helyiség felületeit számoljuk ki, hogy hol és milyen arányban mekkora felületen tervezünk hangcsillapító burkolatot alkalmazni, majd az alkalmazott szerkezetek hangelnyelési tényezőivel és az ehhez szükséges burkolatok megválasztásával próbáljuk elérni a kívánt értéket.

A doborjáni hangversenyterem tanulmányozása során ezzel szemben már a szakirodalom által közölt értékekre hivatkozhattam és a számításokkal be tudtam bizonyítani, hogy a valóságban milyenek a terem paraméterei. [19.]

Először egy ajánlás szerint szeretném ellenőrizni a termet megfelelőségét. Ez egy **Reis Frigyes** rendeltetéstől függő előadásban találtam, amely a térfogat és a hallgatóság száma alapján történő ajánlás.

<u>Ajánlott helyiség méretek befogadó fő alapján:</u>

- beszéd célú termek: 3-5 m^3/fő
- opera, zenetermek: 5-8 m^3/fő
- hangversenytermek: 7-12 m^3/fő [20.]

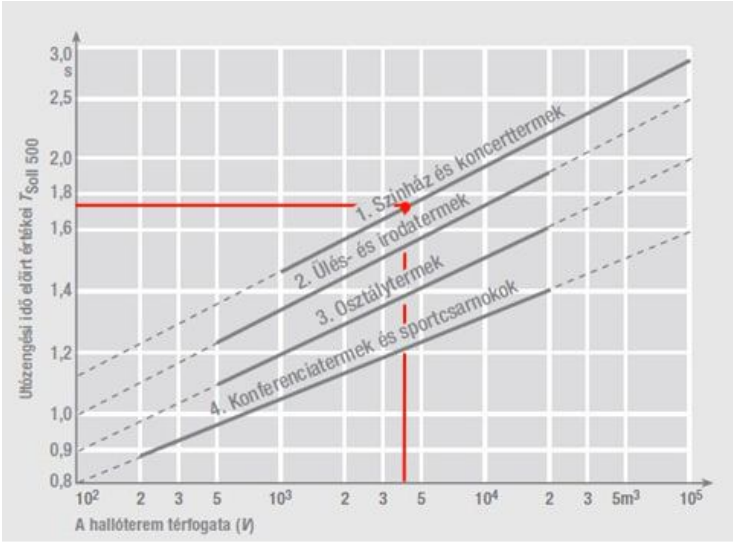
A doborjáni hangversenyterem térfogata megközelítőleg a fő befoglaló méretek szorzatából kapható, melyből a ruhatár kivonandó.

V = (Hosszúság x Szélesség x Magasság) ≈ **4670,75 m^3**.

Tudva hogy a terem befogadása **600 fő**re képes. A térfogatot elosztva a befogadó fők számával, **7,78 m^3/fő** értéket kapunk. A kapott érték az alsó határához közelít, de megfelelő hangversenyterem típusban.

A legfontosabb teremakusztikai jellemző, az utózengési idő meghatározásra különböző logaritmusos skálák találhatóak. A rendeltetés és a térfogat meghatározásán túl fontos szempont, hogy a leolvasás a frekvencia érték tudatában történjen.

A következő ábráról hozzávetőlegesen leolvashatjuk az utózengési idő értékét 500 Hz-es középfrekvencián. A leolvasás azonban pontatlan, de gyors megítélésnek, ellenőrzésnek használható.



69. ábra. utózengési idő

Így a doborjáni hangversenyterem előírt utózengési értéke színház és koncertterem kategóriában:

1,6 [s] < T_{60} < 1,8 [s] közé esik.

Leolvasásunk szintén megfelelőnek tekinthető, ugyanis ezt az értéket közölte a **Detail Magazin** is. [18.]

Pontosabb értéket megkapásához a **DIN 18041:2004** német szabványt használtam. A szabvány szerint: színház és koncertterem esetén az előírt utózengési idő képletből kapható:

$$T_{soll} = [0{,}45 \cdot \lg(V) + 0{,}07] \text{ [s]}$$

Behelyettesítve saját adatokkal:

$$T_{soll} = [0{,}45 \cdot \lg(4670{,}75) + 0{,}07] = \mathbf{1{,}72} \quad \text{[s]}$$

Ezek után tolerancia séma felvétele következett, mely középfrekvencia értékek esetében (250 Hz és 2000 Hz között) +/- 20%-al toltam el, az alsó és a felső határ megkapásához (alsó határ T=1,38 [s], felső határ T=2,06 [s]). Alacsony frekvencia értékek (250 Hz alatt) és magas frekvencia értékek (2000 Hz felett) esetén 40%-os törés is megengedtem, ezt szaggatott vonallal jelöltem az ábrán. Ez a tolerancia sémát használtam később a programos vizsgálat során is. A tolerancia séma értelmezésére szintén a DIN 18041:2004 szabvány alapján történt. [8.]

70. ábra. Értelmezett ideális utózengési tolerancia séma

5.2. Akusztikai program lehetőségek

A mai számítástechnikai világban egyre több felhasználó szintű alkalmazás kerül forgalmazásba. Ez a fejezetrész, egy része a számítógéppel történő teremakusztikai szimulációnak, auralizációnak a gyűjteményéből. A programok alkalmazása előtt tájékozódás és ismeretgyűjtés szükséges.

5.2.1. Odeon Room Acoustic Modelling Software

(Teremakusztikai Modellező Program)

71. ábra. Logó <25.>

Az Odeon szoftver az épületek belső akusztikáját szimulálja. A geometriai és felületi tulajdonságokból számolt, illusztrált akusztikai paraméterek alapján a valóság közeli hangzás is meghallgatható.

Az Odeon hangforrás visszaverődés (image-source) módszerrel kombinált fénysugárkövetést használ a fénytörés tulajdonságainak meghatározására.

Nagyon jól alkalmazható és szemléletes bemutatások készítésére alkalmas. A 3D-s modellektől az animációs kis filmekig széles formátumot lefed. A szoftvernek több (3 féle) verziója is rendelkezésre áll a felhasználási igények alapján.

Felhasználási területek:

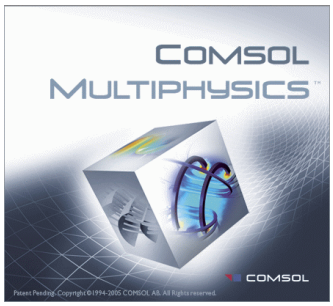
- Koncert- és opera termek, színházak, templomok és mecsetek;
- Nyitott terű irodák, előcsarnokok, éttermek, zenei stúdiók;
- Metró és vasútállomások, repülőtér terminálok;
- Ipari környezetek, bonyolult geometriájú kültéri területek. [21.]

Felhasználhatósága a doborjáni épülettel kapcsolatban.

Doborjáni épülettel kapcsolatosan látványos és valósághoz nagyon közeli bemutatásokat készíthetnék mind matematikai eredmények, mind hangzás, mind prezentációk tükrében. A szoftver felhasználói liszensszel áll rendelkezésre, de a hivatalos weboldalról elérhető próba verziójával mindenki ismerkedhet. Az adatbázisában található épületekkel pedig meg is nézheti mire képes program. Modellként megtalálható az Aspendos ókori görög színház többek közt.

5.2.2. COMSOL Multiphysics Modeling and Simulation Software - Acoustics Module

(COMSOL - Multifizikai Modellező és Szimulációs Szoftver - Akusztikai modul)



72. ábra. Logó <26.>

A COMSOL programcsomag egy összetett sok modulból felépülő, mérnöki problémák modellezésére és megoldására alkalmas szoftver. A program végeselemes módszerrel, parciális differenciálegyenletekkel dolgozik, képes különböző fizikai folyamatok egyidejű leírására.

Kétféleképpen végezhetjük vizsgálatainkat: a grafikus kezelőfelületen és a MATLAB [3] programnyelven. [22.]

Az akusztikai modul sajátosságai

Az akusztikai modul világszínvonalú megoldást kínál az akusztikai modellezésre. Ez a modul kifejezetten azoknak fejlesztette a COMSOL, akik olyan eszközökkel dolgoznak, amik akusztikai hullámokat mérnek, hoznak létre, vagy terveznek.

Felhasználási területei (csak az akusztikai modul):

- terem- és épületakusztikai vizsgálatok.
- mikrofonok, hangszórók, hallókészülékek, sonar készülékek (hangradarok) vizsgálatai; [23.]

Felhasználhatóság a doborjáni épülettel kapcsolatban:.

Természetesen ezt a szoftver nem egyszerű termek felépítésére fejlesztették elsősorban, de elvégezhető vizsgálatok során megoldható lehet egy előadóterem és egy több ezer fős koncertterem is. A vizsgálatok elvégzéséhez azonban komoly előtanulmányok szükségesek.

5.2.3. IMMI - The Noise Mapping Software

(Zajprognózis készítő szoftver)

73. ábra. Logó <27.>

Ez a program a zaj terjedésével, és annak épületekre gyakorolt hatásával, modellezésével foglalkozik. Vannak olyan helyzetek, amikor szükség van részletes tájékoztatásra a zaj terjedéséről. Ennek a modellezésére használható az IMMI, a számítógépes környezetmodellező szoftver. Az IMMI zajtérképeket állít elő, amelyek

[3] A MATLAB egy speciális programrendszer, amely numerikus számítások elvégzésére lett kifejlesztve és emellett egy programozási nyelv. A The MathWorks által kifejlesztett programrendszer képes mátrix számítások elvégzésére, függvények és adatok ábrázolására, algoritmusok implementációjára és felhasználói interfészek kialakítására

feltérképezik a többszörös zajforrások terjedését és egyidejűleg egy helyen prezentálják a zaj tökéletes és részletes ábrázolását.

A 2D-s és 3D-s rajzokon, modelleken, megadott pontokban meghatározott hangnyomásszint (decibel) értékek alapján rajzolja ki a vonal és felületi projekció görbéket (3D-os modellezés esetén a hangnyomásszint érték térben, három koordinátával megadva). Ezek a projekciók meghatározható zajhatárértékek között változnak, melyekhez színeket rendelhetünk hozzá. Jellemzően piros színtől (zajforrás helye) a világosabb, gyengébb színekig.

Felhasználási területei:

- Közlekedési eszközök és hozzájuk kapcsolódó létesítmények zajkibocsátása és terjedésének (közúti zaj, vasúti zaj, légi közlekedés stb.) vizsgálata;
- Ipari és munkahelyi zaj vizsgálata;
- Auditóriumok, koncerttermek, mozik hangszigetelés vizsgálata. [24.]

Felhasználhatósága a doborjáni épülettel kapcsolatban

A hangversenyterem kis településen, mezővárosban található, melynek népessége a 2008-as adatok szerint 835 fő. [25.]

Ez azonban nem jelenti azt, hogy közlekedés forgalmi zajnak nincs kitéve az épület, amit jelen esetben egy épületet érő zajhatárértékek felállítása mellett elemezhetnénk. Ehhez azonban forgalmi adatszámlálásra, elemzésre lenne szükség.

5.2.4. LspCAD - Loudspeaker Computer Aided Design (Számítógéppel segített hangszóró tervezés)

74. ábra. Logó <28.>

Ez a program elsősorban az akusztika fontos technikai eszközére, a hangszórók tervezésére fókuszál. Természetesen ez a szoftver is több (2 féle) verzióban áll rendelkezésre a felhasználói igények tükrében.

Felhasználási területek:

- Hangszóró tervezés
- A hangszóró dobozának modellezése előre meghatározott modellekkel és a legnépszerűbb doboztípusokkal.
- Frekvenciaváltó[4] modellezése mindkét, aktív és passzív analóg és digitális filterrel. [26.]

Felhasználhatósága a doborjáni épülettel kapcsolatban

Doborjáni épülettel kapcsolatosan ez a program nem lenne hasznosítható, mivel nem alkalmaztak semmilyen technikai berendezést, hangszórót vagy hangerősítőt. Viszont nagyon hasznos program tud lenni például egy olyan teremben, ahol a rossz hallás problémáját akarják megoldani burkolatbontás, alakítás nélkül vagy tervezéskor már eleve ezzel dolgoztak.

5.2.5. CARA - Computer Aided Room Acoustics

(Számítógéppel segített teremakusztika tervezés)

75. ábra. Logó <29.>

Az ELAC Technische Software (ETS) által kifejlesztett német program, mely költséghatékony és jól használható szoftveres megoldás a teremakusztikai tervezés számítógépes lehetőségei közül.

A program fő moduljai, felhasználhatósági területei:

- Terem kialakítás (Room Design)
- Terem akusztikai számítások (Room Acoustics Calculations)
- Prezentáció szemléltetés 2D és 3D diagramokkal (Presentation of Results)
- Hangsugárzó tervező (Loudspeakers editor)

[4] Főképpen hangosítási rendszerekben használatos eszköz, a bejövő jelet frekvenciatartományokra bontja, így a hangszóró tölcsérek a hozzájuk tartozó frekvencia részt kapják (pl. a magas sugárzók csak a magasakat stb).

A CARA két különböző kiadásban áll rendelkezésre a felhasználók számára

- *CARA 2.1 Plus* teljes kezelőfelületű korábban kiadott szoftver
- *CARA 2.2 Plus Power Pack* – frissített kiadású szoftver, amely már tartalmazza a hangszóró tervező modult is.

A CARA kezelőfelülete angol és német nyelven áll rendelkezésre. Továbbá a CARA biztosít a program felhasználásához és működtetéséhez szükséges oktató videókat tartalmazó (training) lemezeket is. [27.]

Lehetőséget biztosít a termek létrehozására és berendezési tárgyainak megtervezésére ismerős CAD felület kezelésével. Hasonló elveken tetszőleges hangsugárzókat is megtervezhetünk, de adatbázisában is találunk. A program először analizálja a teremet és annak utózengési idejét. Majd a hangszórók és a hallgatók elhelyezésével optimalizálási stratégiákat dolgoz ki a jobb hangzás (egyenletesebb eloszlás) érdekében. [28.]

További speciális számítások (*Special Calculation*) kiválasztásával lehetséges, itt találunk olyat, hogy:

- Frekvencia válasz és elhelyezkedés (*Frequency Responses and Location Diagramm*)
- Utózengési diagram és utózengési idő (*Reverberatin Diagram and Reverberation Times*)
- Hangtér kalkuláció (*Sound Field Calculations*), ezzel készíthetünk 3D-s képeket vagy animációt is akár a frekvencia és idő függvényében. Amit a hangnyomásszint (*SPL (sound pressure level) Target*) opcióval 2D-s diagramon is megtekinthetünk. [29.]

5.3. Doborjáni terem vizsgálata CARA programmal

Tervezési folyamat

A terem kialakítással indul a tervezési folyamat, a program sajnos nem kompatibilis más CAD programok fájljainak a fogadására, importálására, ezért magunk építhetjük meg és hozhatjuk létre benne berendezési tárgyainkat.

Elsőként felkínál lehetséges épületalaprajzokat (négyszögtől egészen az összetettekig), amelyeknek a megfelelő paramétereit változtatva kaphatjuk meg az épületünk befoglaló méretét. Minden határoló felülethez rendelhetünk felületi anyagot, a kialakított térben. 3D objektumokat hozhatunk létre, attól függően, hogy a padlón, a térben, vagy függesztett objektumként szeretnénk azt elhelyezni. Így körülményesen, de minden szükséges tárgy létrehozható.

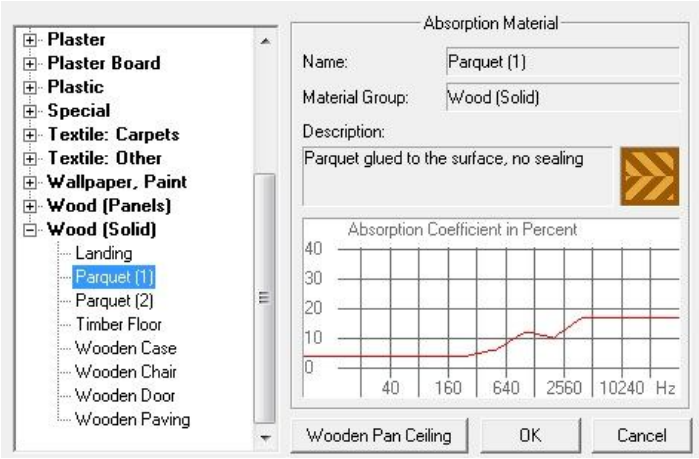
Mivel Doborján hangversenytermét technikai berendezések, hangerősítők és hangszórók nélkül oldották meg, ezért azt a lehetőségét a programnak, hogy a hangszóró és a hallgatók közötti optimalizálás, nem használtam.

Egy hangforrást helyeztem el a színpadon és utózengési időt vizsgáltam három teremállapotban. Ezek az állapotok az üres terem berendezési tárgyak nélkül, a kemény felületű térbeli alakzatokkal (színpad, karzat, lépcsők), valamint a kemény felületű térbeli alakzatokkal és kárpitorozott székekkel történő vizsgálat.

Egy hallgatót (*listener*) elhelyezve, amit jellemzően a terem utolsó sorába tettem, megtekinthetjük a 3D-s modellt. Itt tehetünk a teremben egy körsétát, és a burkolatok megfelelő állításával folyamatosan végezhetünk vizsgálatokat *Acoustic Ambiance* lehetőséggel.

Program által kínált anyagokat alkalmaztam, de lehetőség van további anyagok felvételére is a kívánt anyag megfelelő frekvencia határokon történő hangelnyelésének százalékos megadásával.

Az utózengési idő vizsgálatánál a **DIN 18041**-es szabvány alapján értelmezett tolerancia sémát, a program készítette görbékkel azonos ábrába, manuálisan rajzoltam, ezzel szemléltetve a megfelelőséget adott vizsgálati állapotban.



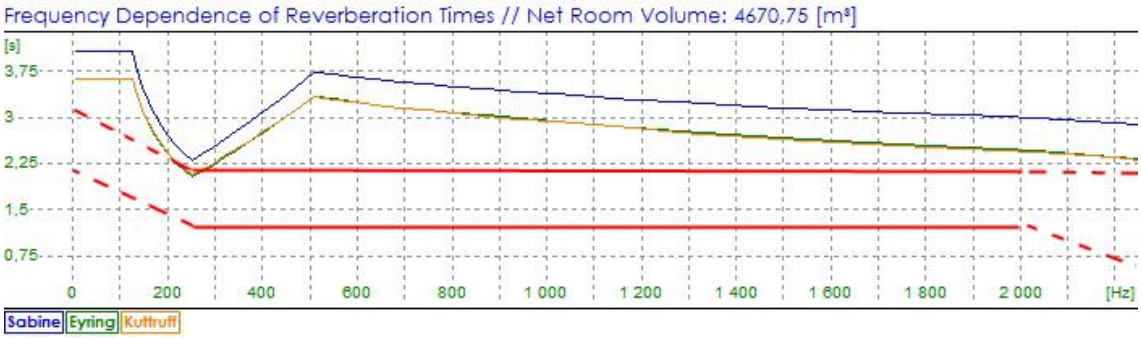
Alkalmazott burkolatok: fa panelek, fa ajtók, parketta és textilburkolat a székekre (wooden panels, wooden door, parquet, textile carpet); továbbá egyediként felvett burkolat a Rigips Big Quattro perforált gipszkarton katalógus által közölt értékei.

76. ábra. burkolat kiválasztása, egyidejűleg látható a hangelnyelési tényező százalékos görbéje frekvencia beosztással

5.3.1. I. eset - berendezetlen üres terem

Először a terem üres állapotát vizsgáltam a falak és a padló burkolatával. A térbeli objektumok (karzat, lépcsők, székek) elhagyásával.

77. ábra. modell I. eset



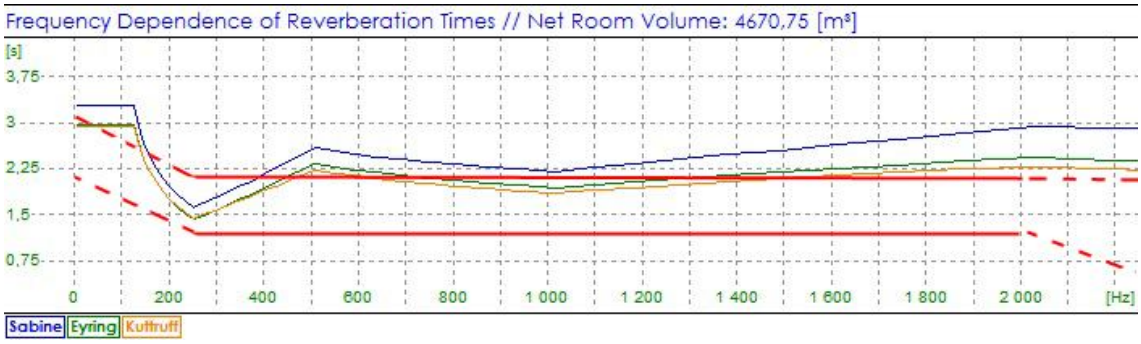
78. ábra. üres terem utózengési görbéi

Az így kapott görbénken jól látszik, hogy nagyon a tolerancia sémán kívülre esnek. Ez a berendezési tárgyak hiányának is értelmezhető. Gyakori tapasztalati példa, hogy egy üres terem visszhangos, így nem meglepő ez az eredmény.

5.3.2. II. eset - az I. eset kemény felületű térbeli alakzatokkal

79. ábra. modell II. eset

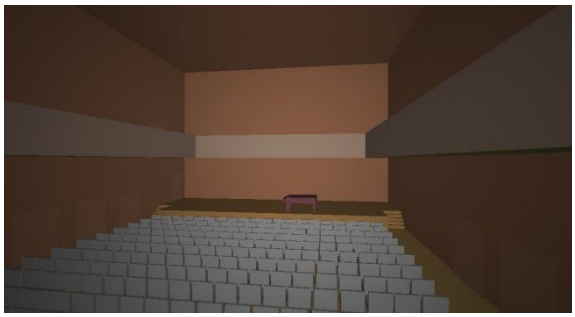
A következőként egy újabb terem állapotot vizsgálok. Ez már majdnem a teljes terem üzemszerű kialakítása. Itt már a közbenső födém, karzat, korlát és a karzat alatt elhelyezett perforált gipszkarton is segítette az egyre közelebbi valóság helyzetet.



80. ábra. utózengési görbék térbeli alakzatokkal I.

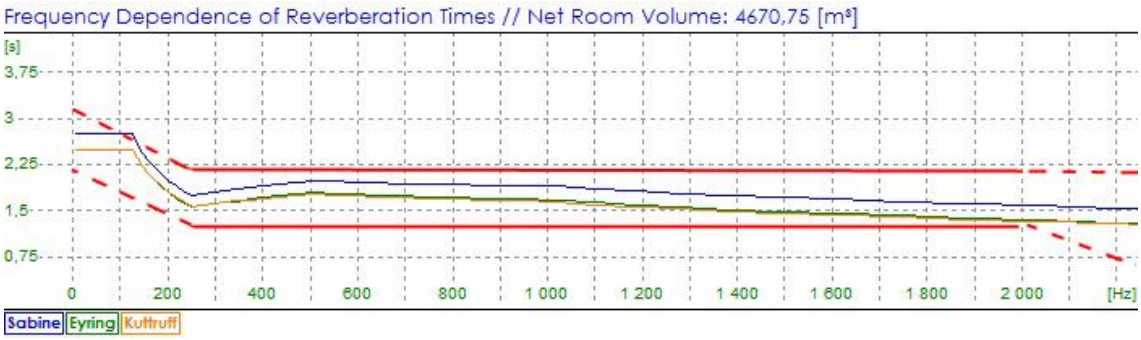
Az itt kapott görbék már közelítik a tolerancia sémát, néhol el is éri azt. Azonban a megfelelősség ennél szélesebb frekvencia tartományban szükséges, mert nincs mindig egy azonos frekvencián szóló hangversenytermi előadás. Kell a középfrekvencia értékek közti megfelelés, még akkor is, hogyha a bizonyos tartományban akár meg is felelne a séma szerint (mély hangok esetén). Szerencsére ez az állapot nem a használati állapot, nem kell hangerősítőt vagy technikai berendezést hívni segítségül, hogyha ilyet látunk és még nincs a teremben elhelyezve az összes berendezési tárgy. Jellemzően hangelnyelő felületű székek, padok, függönyök segítik a megoldást ilyenkor.

5.3.3. III. eset - berendezési tárgyakkal, használati állapotban



81. ábra. modell III. eset

Végső vizsgálat a teremben kialakított székekkel történt. Mint ahogyan azt források is közölték, és a kárpitorozott székekről tudható, hogy hangelnyelési felületként vannak jelen a teremben, ezért elengedhetetlen feltétel az azzal történő vizsgálat.

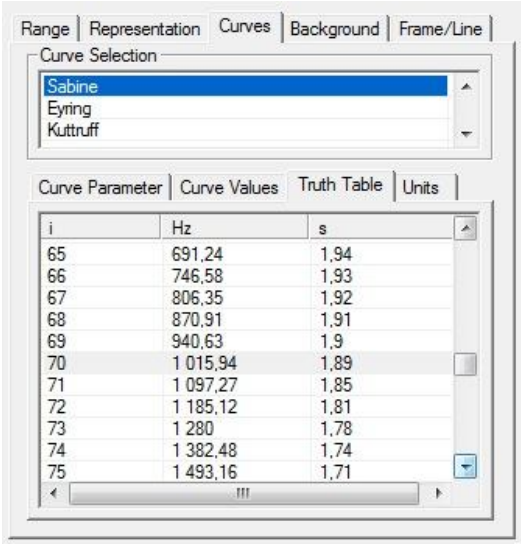


82. ábra. utózengési görbék térbeli alakzatokkal II.

Az így történt vizsgálattal megfelelőnek bizonyult a terem, ugyanis a 250 Hz – 2000 Hz-ig terjedő sávban mindhárom formula alapján rajzolt görbe, a felvett tolerancia séma alsó és felső határa közé esik.

Összehasonlítás:

A kapott eredmények, hogy összehasonlíthatóak legyenek azonos frekvencia értékben olvastam le. A program lehetőséget biztosít a diagramok szemléltetése mellett a frekvencia értékekhez tartozó pontos utózengési idő leolvasására.

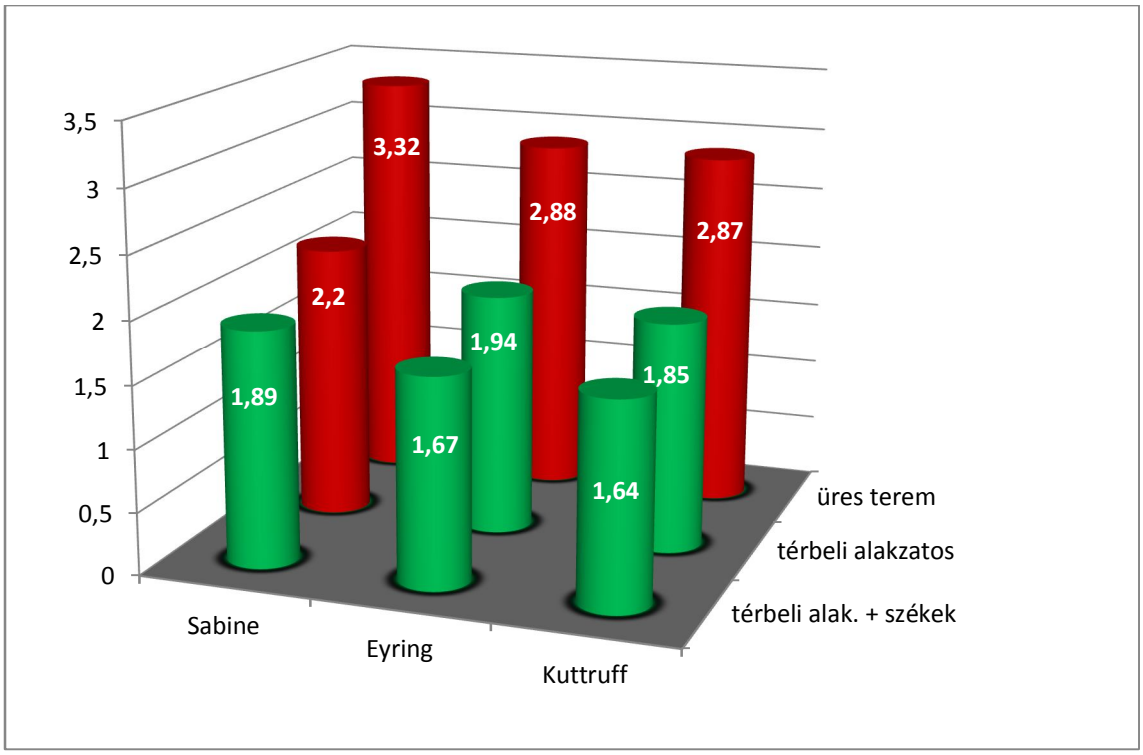


83. ábra. i - görbe töréspontjának sorszáma; **Hz -** adott törésponthoz tartozó frekvenciaérték; **s** - az adott értékhez tartozó utózengési idő

	CARA program eredményei (~1000 Hz-es frekvencián leolvasott érték)		
	Sabine	**Eyring**	**Kuttruff**
Üres terem (I. eset)	3,32 [s]	2,88 [s]	2,87 [s]
Térbeli alakzatokkal (II. eset)	2,20 [s]	1,94 [s]	1,85 [s]
Térbeli alakzatokkal és kárp. székekkel (III. eset)	1,89 [s]	1,67 [s]	1,64 [s]

4. táblázat: utózengési idő értékek

A kapott eredmények a különböző formulákban 0,45 – 0,25 [s] szórást mutatják, amelyekről megállapítható, hogy a Sabine formula kiemelkedő, az Eyring és a Kuttruff formula pedig közel azonos eredményeket szemléltetnek.



84. ábra. utózengési idő értékek diagram: piros nem megfelelő, zöld megfelelő érték

A kiemelkedés abból adódhat, hogy a Sabine formula egyenletes terjedést feltételez minden irányba, a terem modusait elhanyagolva. Az egyenlőség az átlagos hangelnyelési tényezővel történő számolás eredményével magyarázható Eyring és Kuttruff értékek esetén.

Megjegyzendő, hogy a teremben a hallgatóság jelenlétével további hangelnyeléssel számolni kell. Ez esetben előfordulhatnak ez alatti érték is.

5.4. Utózengési idő számítása az MSZ EN 12354-6 alapján

Az MSZ EN 12354-6 szabvány 2004. augusztus 1-jén közzétett angol nyelvű változatának 2006. január 1-jén kiadott magyar nyelvű változata alapján végzett számolás.

Alkalmazhatósági területe:

Ez a szabvány épületek zárt tereinek eredő egyenértékű hangelnyelési felületét vagy utózengési idejét meghatározó számítási modellt ismertet. A számítási elsősorban építőanyagok és berendezési tárgyak hangelnyelését jellemző, mért adatokon alapul. Közelítő számítással meghatározott tulajdonságaiból származó tapasztalatokon alapul. Nem használható nagyon nagy méretű, vagy szabálytalan alakú terek esetében.

A szabvány tartalmazza néhány anyag hangelnyelési tényezőjét (MSZ EN 12354-6 B melléklet: Anyagok hangelnyelése). A számolás során én is ezeket az adatokat és katalógusokban találhatóakat használtam fel.

1000 Hz-es oktávsáv adataival számoltam, a számoláshoz felhasznált adatokat a következő táblázatok tartalmazzák.

Anyag	Hangelnyelési tényező, α Oktávsávok középfrekvenciái Hz-ben					
	125	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**
Kemény padlóburkolat (pl. PVC, parketta)	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05	0,06
Fa padlóburkolat, parketta, párnafákon	0,12	0,10	0,06	0,05	0,05	0,06
Ajtó (fa)	0,14	0,10	0,08	0,08	0,08	0,08
Rigips Big Quattro (perforált gipszkarton, katalógus adat)	0,20	0,35	0,65	0,80	0,65	0,55
Akusztikus burkolat (CARA szoftver adatai alapján) [5]	0,13	0,24	0,20	0,16	0,16	0,16

5.táblázat. Anyagok hangelnyelése [7.]

[5] **Wooden panels** – Wooden panel about 10 mm thick, smooth surface, 20 mm cavity behind
Fa panelek – Fa panel körülbelül 10 mm vastag, sima felület, 20 mm légrés

Térbeli alakzat	Hangelnyelési tényező, A_{obj} Oktávsávok középfrekvenciái Hz-ben					
	125	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**
Önmagában álló szék, fa	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04	0,04
Önmagában álló szék, kárpitorozott	0,10	0,20	0,25	0,30	0,35	0,35
Csoportban lévő, ülő vagy álló személy, 1 fő/6m^2 alapterület; jellemző legkisebb érték	0,05	0,10	0,20	0,35	0,50	0,65

6. táblázat. Térbeli alakzatok [7.]

Alakzatelrendezés	Hangelnyelési tényező, α_s Oktávsávok középfrekvenciái Hz-ben					
	125	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**
Székek 0,9 – 1,2 méterenkénti sorokban, fa ill. műanyag	0,06	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16
Székek 0,9 – 1,2 méterenkénti sorokban, kárpitorozott; jellemző legkisebb érték	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,50
Székek 0,9 – 1,2 méterenkénti sorokban, kárpitorozott; jellemző legnagyobb érték	0,50	0,70	0,80	0,90	1,00	1,00

7. táblázat. Alakzatelrendezés [7.]

Az utózengési időt a számított eredő egyenértékű hangelnyelési felület, a zárt, üres helyiség térfogata és a térfogatarány alapján határozza meg a szabvány.

A teljes képlet a következő:

$$T_{60} = \frac{55{,}3}{c_0} \cdot \frac{V(1-\psi)}{A}$$

c_0	–	a hang terjedési sebessége levegőben,	[m/s]
V	–	a zárt terem teljes térfogata,	[m^3]
A	–	eredő egyenértékű hangelnyelési felület	[m^2]
Ψ	–	térfogatarány	[-]

A képlet elején található **55,3/c_0 arány**, a korábbi formulákban lévő **0,161** konstans számnak felel meg (mértékegysége s/m, hogy a számolás végén az eredményt másodpercben kapjuk), mely úgy kapható, hogy a hang terjedési sebességét 343,5 m/s-nek vesszük fel. Ez a hőmérséklet függvénye is.

<u>Eredő egyenértékű hangelnyelési felület meghatározása:</u>

$$A = \sum_{i=1}^{n} \alpha_i \cdot S_i + \sum_{i=1}^{n} A_{obj} + \sum_{k=1}^{n} \alpha_{s,k} \cdot S_k + A_{air}$$

A felületek és hangelnyelési tényezőik szorzatösszegzése + térbeli alakzatok egyenértékű hangelnyelési felületének összegzése + alakzatelrendezés által takart felület nagysága szorozva alakzat hangelnyelési tényezőjével + levegő hangelnyelése

<u>Térfogatarány:</u>

$$\psi = \frac{\sum_{i=1}^{n} V_{obj}}{V}$$

A kemény felületű térbeli alakzat térfogat osztva a teljes térfogattal összefüggésből számítható.

V_{obj} – a kemény felületű térbeli alakzat térfogata

A kemény felületű térbeli alakzatok egyenértékű hangelnyelési felülete a térfogatuk függvényében becsülhető a következő módon:

$$A_{obj} = V_{obj}^{2/3}$$

5.4.1. I. eset - berendezetlen üres terem

számoláshoz a leegyszerűsített Sabine formula használható.

$$A = \Sigma\alpha_i \cdot S_i = \alpha_1 \cdot S_1 + \alpha_2 \cdot S_2 \ldots + \alpha_i \cdot S_i$$

$$T_{60} = \frac{0{,}161 \cdot V}{A}$$

V - a terem teljes térfogata **4670,75** **[m^3]**

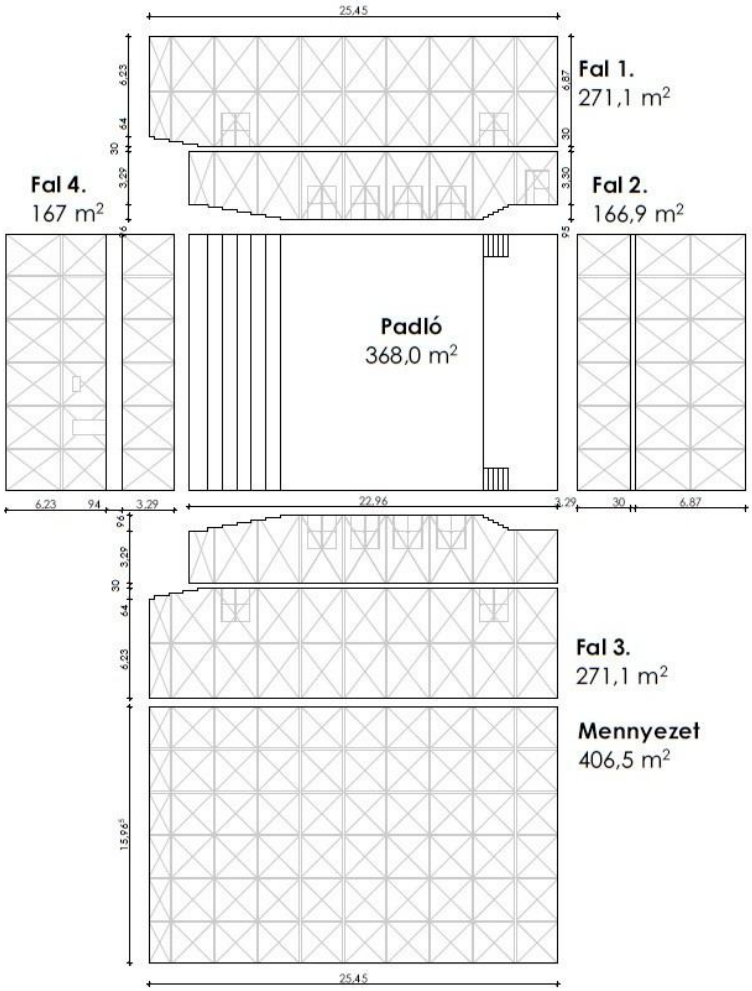
A - eredő egyenértékű hangelnyelési felület **228,56** **[m^2]**

(üres terem térbeli alakzatok, és levegő hangelnyelése nélkül)

Itt használt anyagok hangelnyelési tényezői:

$\alpha_{padló}$ = 0,05

$\alpha_{fal} = \alpha_{mennyezet}$ = 0,16



A = 0,05 · 368 + 0,16 · (406,5 + 271,1 + 166,9 + 271,1 + 167) **= 228,56** [**m^2**]

$$\mathbf{T_{60}} = \frac{0{,}161 \cdot 4670{,}75}{228{,}56} = \mathbf{3{,}29}\ [\mathbf{s}]$$

5.4.2. II. eset - az I. eset kemény felületű térbeli alakzatokkal (színpad, karzat, lépcsők)

számoláshoz használható képlet:

$$A = \sum_{i=1}^{n} \alpha_i \cdot S_i + \sum_{i=1}^{n} A_{obj} + A_{air}$$

$$T_{60} = \frac{0{,}161 \cdot V(1-\psi)}{A}$$

V - a terem teljes térfogata **4670,75** **[m^3]**

A - eredő egyenértékű hangelnyelési felület **373,22** **[m^2]**

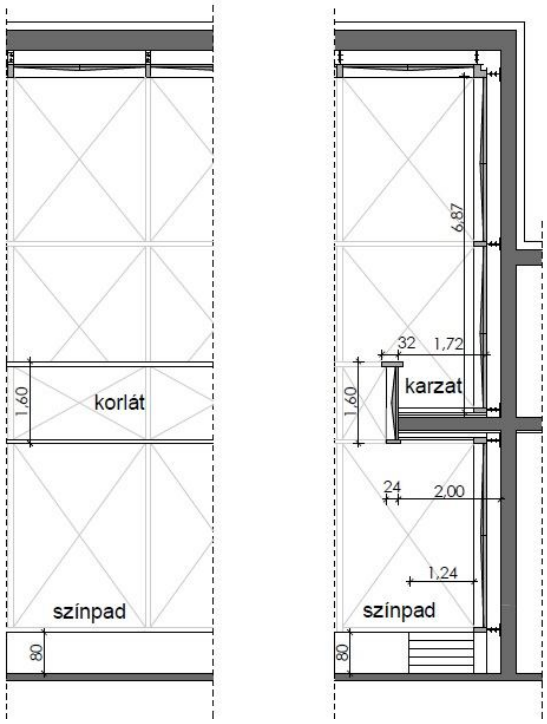
(üres terem térbeli alakzattal, és a levegő hangelnyelésével)

Ψ - térfogatarány **0,037** **[-]**

<u>Térbeli hangelnyelő objektumok:</u>

színpad:	69,26 [m^3]
lépcsők összesen:	49,03 [m^3]
karzat födém:	41,88 [m^3]
karzat korlátja:	10,47 [m^3]

ΣV_{obj} = 170,64 [m^3]



<u>Térfogatarány:</u>

$$\Psi = \frac{170{,}64}{4670{,}75} = 0{,}037$$

Karzat alatti födém: 121,8 [m^2]

$\alpha_{perf.gipszkarton}$ = 0,80

$$A_{obj} = V_{obj}^{2/3} = 69{,}26^{2/3} + 49{,}03^{2/3} + 10{,}47^{2/3} + 41{,}88^{2/3} = 47{,}10\ [m^2]$$

A_{air} (általános esetben) = 0,12 [m^2]

A = 228,56 + (121,8 · 0,80) + 47,10 + 0,12 = **373,22** [**m^2**]

$$\mathbf{T_{60}} = \frac{0{,}161 \cdot 4670{,}12(1-0{,}037)}{373{,}22} = \mathbf{1{,}94}\ [s]$$

5.4.3. III. eset – berendezési tárgyakkal, használati állapotban

számoláshoz használható képlet:

$$T_{60} = \frac{0{,}161 \cdot V(1-\psi)}{A}$$

$$A = \sum_{i=1}^{n} \alpha_i \cdot S_i + \sum_{i=1}^{n} A_{obj} + A_{air}$$

V	- a terem teljes térfogata	**4670,75**	**m^3]**
A	- eredő egyenértékű hangelnyelési felület	**423,09**	**[m^2]**
	(üres terem térbeli alakzattal, és a levegő hangelnyelésével)		
Ψ	- térfogatarány	**0,045**	**[-]**

További térbeli objektum amit figyelembe vehetünk az a székek és az emberek jelenléte. A szabvány tartalmaz adatot egy darab kárpitorozott szék A_{obj} értékére.

Egy darab kárpitorozott szék 1000 Hz oktávsáv frekvencián A_{obj} = 0,30

Doborjáni koncertterem 600 fős ezért 600 székkel számoltam.

600 · 0,30 = 180 [m^2]

<u>Székek hangelnyelés-</u>

<u>ének becsült értéke:</u> $180^{2/3}$ = 31,87 [m^2]

<u>Alakzatelrendezés</u> által

takart felület: 600 · (0,45 · 0,45) S_k= 121,5 [m^2]

Alakzatelrendezés hangelnyelési tényezője: α_k = 0,40

121,5 · 0,40 = 48,6 [m^2]

<u>Szék térfogata:</u> 600 ·0,05 = 30 [m^3]

ΣV_{obj} = 170,64 + 30 = 200,34 [m^3]

<u>Térfogatarány:</u> $\psi = \frac{200{,}34}{4670{,}75} = 0{,}043$

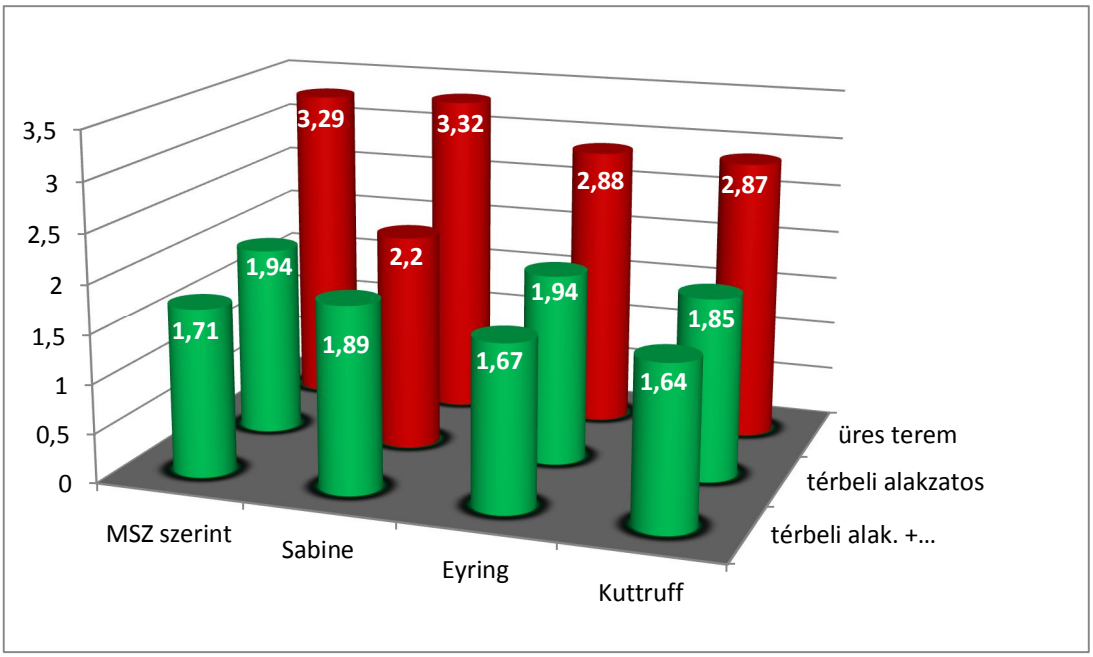
$$\mathbf{T_{60}} = \frac{0{,}161 \cdot 4670{,}75(1-0{,}043)}{423{,}09} = \mathbf{1{,}71}\ [s]$$

5.5. Eredmények összehasonlítása

	Számolás eredménye (1000 Hz-en)	**CARA program eredménye** (~1000 Hz-en)		
		Sabine	**Eyring**	**Kuttruff**
Üres terem	3,29 [s]	3,32 [s]	2,88 [s]	2,87 [s]
Térbeli alakzatokkal	1,94 [s]	2,20 [s]	1,94 [s]	1,85 [s]
Térbeli alakzatokkal és kárpitorozott székekkel	1,71 [s]	1,89 [s]	1,67 [s]	1,64 [s]

8. táblázat: utózengési idő értékek

A kapott eredmények alapján megállapítható, hogy a szabvány szerinti számolás és a program szerint optimalizált eredmények azonos szórást mutatnak. A berendezési tárgyak (térbeli alakzatok) jelenlétével egyre kisebb az eredmények különbözősége. A szabvány alapján kiszámított eredmények, a Sabine és az Eyring formula szerint kapott programbeli eredmények közötti értékek tartományában találhatóak.



85. ábra. utózengési idő értékek diagram: piros nem megfelelő, zöld megfelelő érték

A számítások eltérése több forrásból adódhat. Az egyik ilyen pontatlansági forrás a burkolatok különbözősége. Bár igyekeztem hasonló burkolatokat alkalmazni mindenütt, ahol csak lehetett, sőt a falburkolatra ugyanazt az értéket használtam mindkét számolásban, más helyeken azonban a program és a szabvány által közölt értékeket.

Egyéb pontatlanság származhat a modell megépítéséből, vagy a számítások kerekítési értékeiből.

A terem végső megítélője az ember. A hallás szubjektív képesség és az ember minden esetben hallgatóként van jelen a teremben. Jelenlétével számolnunk kell úgy, mint aki többlet textilfelület és ottlétével hangelnyelést okoz. Ez az utózengési idő további csökkenését eredményezheti.

A hallgatóság jelenlétével és szubjektív megítélésével adja minden esetben a megfelelő teremakusztikai paramétert.

A kapott eredmények a III. esetben - melyben a székek, mint térbeli alakzatok és hangelnyelő textilfelületek vannak a teremben -, a Detail által közölt értékeket támasztják alá. [19.]

6. Befejezés

Meggyőződésem, hogy az ókorban megalapozott akusztikai ismereteket felhasználva és tovább fejlesztve az építészet folyamatosan alkalmazta az ott megszerzett ismeretanyagot. Napjainkra sokat változott, fejlődött az akusztika tudománya, de a legfontosabb meghatározó elvei ugyanazok maradtak. Például a visszaverődések, a geometriai akusztika tudatában tervezünk máig. Ezt használja ki program többsége is.

A bemutatott teremakusztikai szoftverek nagyon jó és fejlődő irányt mutatnak a számítógépes szimuláció terén. Ugyanez mondható el a szabványok terén is, folyamatosan megújulnak kutatások és labormérések, kísérleteknek köszönhetően. Bár vannak idegen nyelven elérhető nemzetközi szabványok, de folyamatosan bővülő a fordított magyar nyelvű változatuk is, melyek nagy segítői egy adott akusztikai feladat elvégzésének.

Fontos, hogy a tervezési folyamat során a rendeltetésnek megfelelően legyenek kialakítani helyiségeinket. Ezt folyamatos modell optimalizálással, tervezés specifikációval és mérések ellenőrzésével érhetjük el a megfelelő minőségű érzet keltését tűzve ki célul. Lényeges szempont, hogy az akusztikus, építész, hang technikus és sok más dolgozó, aki részt vesz a tervezésben, kivitelezésben teljes összhangban dolgozzon együtt, hogy esztétikailag a legjobb és akusztikailag a legmegfelelőbb termet hozhassák létre.

A teremakusztikát minősítő jelzők és formulák egyre pontosabbak eredményt szolgáltatnak. Az utózengési idő csak egy a teremérzetet keltő teremakusztikai szempontok meghatározó tényezői közül. A felsorakoztatott egyéb teremakusztikai fogalmak, jelzők, mértékek és továbbiak csak tovább részletezik, pontosítják a megfelelősséget megkövetelve.

Gyakran egy épületben található a zene és színházművészet igényeknek megfelelő többfunkciós létesítmény, ahogyan az a *Művészetek Palotájá*nál tapasztalható. A jövőre tekintettel is hasonló épületek épülésére számíthatunk, ahogyan az elmúlt évtizedekben ez történt a világ különböző pontjain. Épülnek ugyan kevesebb fő befogadására alkalmas létesítmények folyamatosan, mint például a feldolgozott *Doborján Liszt Ferenc Hangversenyterme*.

Számolásommal is bizonyítottan kiváló helyszíne Liszt Ferenc műveinek előadására, és egyéb szóló előadásokra. Utózengési ideje megfelelő és a DIN 18041 -es szabvány szerinti értelmezett tolerancia séma közt található.

Összegzés

Szakdolgozatomban olyan teremakusztikai ismeretek elsajátítását tűztem ki célul, melyek építészeti szempontból elengedhetetlenek koncerttermek, hangversenytermek és egyéb hanggal kapcsolatos termek tervezésénél.

Szakdolgozatom első részében a témához szorosan kapcsolódó alapfogalmakat tanulmányoztam. Ezt követően bővebben foglalkoztam a belső terek akusztikai jellemzőivel. Ennél a témakörnél ismertetem az egyik legfontosabb teremakusztikai paramétert az utózengési időt, de itt kapott helyet többek között a hangvisszaverődés, hangelnyelés, hangszigetelés, hanggátlás és a visszhang is.

Egyre nagyobb, egyre komplexebb épületeket tervezünk, melyekben gyakran társul a vizualitás és a hangzás világa, ezért többfunkciós és akusztikailag változtatható termeket hozunk létre zengőkamrákkal, hangterelőkkel.

Az akusztikai ismeretek bővülése részben az ókortól napjainkig terjedő akusztikai szemlélet fejlődését mutatom be. Kortárs épületek elemzésével igazolom, hogy nem elvetendő a téma és érdemes vele foglalkozni. Az egyik ilyen épület a Doborjánban található Liszt Ferenc hangversenyterem. Az épület terveinek elkészítése után végeztem el az akusztikai paraméterek közül kiemelt utózengési idő számolását.

Vizsgálataimat az MSZ EN 12354-6 szabvány alapján végeztem, valamint CARA (számítógéppel segített teremakusztikai tervezés) szoftverrel. Az eredményeket végül összehasonlítva és a tanulságokat leszűrve összegeztem. A vizsgálatokat három állapotban végeztem: berendezetlen üres teremben, kemény felületű térbeli alakzatos teremben és használható állapotban székekkel. Az ismertetett adatok a harmadik esetben megerősítik a Detail Magazin által közölt utózengési idő értékét.

Az akusztikai program lehetőségek részben a piacon megtalálható legfontosabb számítógépes alkalmazás tervezőprogramjait gyűjtöttem össze. A mellékletben a teremakusztikai tervezéskor és számoláskor legtöbbet használt anyagok hangelnyelési tényezőjét soroltam fel.

Summary

The aim of my thesis the acquisition of so hall acoustics knowledge, from which architectural viewpoint essential concert rooms, concert halls and any other place which has connection to other room designing methods.

I had studied a few standard concepts which have very close reference to my subject, in the first part of my thesis. Following this I have taken up a bit deeper with acoustics parameters of interior rooms. By this topic among other things I review a really significant room acoustics parameter called reverberation time. In this section I also placed things like sound reflection, sound absorption, sound insulation, sound attenuation and the echo sound.

We plan increasingly bigger and more complex buildings, the visuality and the world of the sound join often in these, because of this we create multi-functional and acoustically can be made change halls. For example resonance chambers or canopies suspended.

Inside my essay in the part of acoustics idea flare I represent the developments of acoustics approaches from ancient times until nowadays. I am justifying more contemporary building attested, that this theme is needed to attend. One of the buildings like the Raiding Concert Hall of Franz Liszt. I resolved upon his reverberation time calculation stressed among the acoustical parameters after plans of the building.

My examinations was done the based on norm of MSZ EN 12354-6 and as well as CARA (Computer Aided Room Acoustics) software. Finally after I had got these results I could done a comparison and a summary from the edification. I did my test in three section, which was inside an empty room, in a stong surface room including spatial shapes, and with chairs in used condition. These dates which were informed show that there is a correspondance between the reverberation time and it is published in Detail Magazin the rates of third occurrence.

Inside the acoustics program possibilities part I collected the most important computer designer applications which can be found on the market. I listed some most useful factors from absorption coefficients of building materials and these thing are included in appendix, what could be needful during planning room acoustics and under countings.

7. Irodalomjegyzék

Egyéb források:

{1.} **Detail Plus** – interjú Oliver Thill építésszel – videó
http://www.detail-online.com/architecture/topics/oliver-thill-visits-detail-007601.html
(2012. április 22.)

Könyvek, magazinok, rendeletek, szabványok:

[1.] **Reis Frigyes:** *Az épületakusztika alapjai*,
Terc kiadó, Budapest, 2003.

[2.] **Hunyadi Zoltán, Koronkay Andrea Juharyné, Reis Frigyes:** *Építészeti akusztika*; Műegyetemi kiadó, Budapest, 1994.

[3.] **Tarnóczy Tamás:** *Teremakusztika I-II.*, Akadémiai kiadó, Budapest, 1986.

[4.] **Tarnóczy Tamás:** *Hangnyomás, hangosság, zajosság*, Akadémiai kiadó, Budapest, 1984.

[5.] **Wersényi György:** *Műszaki akusztika*, egyetemi jegyzet, 2010.

[6.] **27/2008. (XII. 3.) KvVM-EüM** együttes rendelet a környezeti zaj- és rezgésterhelési határértékek megállapításáról

[7.] **MSZ EN 12354-6:2004** *Épületakusztika.* Épületek akusztikai minőségének becslése az elemek teljesítőképessége alapján. 6. rész: Hangelnyelés zárt térben

[8.] **DIN 18041:2004** „Hörsamkeit in kleinen bis mittelgroßen Räumen” (Acoustical quality in small to medium-sized rooms) - Reverberation time vs. amount of absorption

German Standard

[9.] **Reinhard O. Neubauer:** Estimation of reverberation time in rectangular rooms with non uniformly distributed absorption using a modified fitzroy equation; (*Seventh International Congress On Sound And Vibration)*
Internetes elérés: http://www.ib-neubauer.com/Literatur/7th_ICSV_2000_Garmisch_Partenkichen.pdf
(2012. április 28.)

[10.] **Fürjes Andor Tamás**
A helyiség alakja , 2010.05.20.
http://www.aqrate.hu/files/aQ-wp-HU-teremalak-030317.pdf
(2012. április 28.)

[11.] **Császár László,** *Épülettípusok a kiegyezés utáni Magyarországon*, Építésügyi Tájékoztatási Központ, Budapest, 1995.

[12.] **Átrium**, 2005. (10. évf.) 1. sz. 58-65. old.
Művészetek Palotája, építész: Zoboki-Demeter és Társai

[13.] *Művészetek Palotája - részletek a műszaki leírásból, rajzok és fotók*
http://epiteszforum.hu/node/3525
(2012. 04. 28.)

[14.] **Alaprajz**, 2011. (18. évf.) 2. sz. 4-15. old.
Mészkő violin: Kodály Központ, Pécs

[15.] **Auditorium Acoustics**, Vol. 33. Pt. 2 2011.

A. Kotschy, A.B. Nagy, F. Tamás, A. C. Gade, "Kodály Centre - Pécs, New concert hall, objective and subjective results"

[16.] **Octogon Architecture Design** online
Kristálypalota Reykjavíkban
http://www.octogon.hu/archinfo/uj+epuletek/kristalypalota+reykjavikban+1.html
(2012. 04. 28.)

[17.] **Arch Daily architecture website**
Oslo Opera House / Snohetta
http://www.archdaily.com/440/oslo-opera-house-snohetta/
(2012. 04. 28.)

[18.] *Az új oslói operaház*
http://epiteszforum.hu/node/9655
(2012. 04. 28.)

[19.] **Detail Magazine**, 3/2009.
Concert Hall Raiding, Konzertsaal in Raiding, 216-227. old

[20.] **Reis Frigyes előadás**
http://www.epitesz.bme.hu/document/2071/original/00003123.pdf
(2012. 04. 28.)

[21.] *Odeon Room Acoustic Modelling Software*
http://www.odeon.dk/pdf/Brochure_10.pdf
(2012. 04. 28.)

[22.] COMSOL Multipysics termékcsalád
http://comsol.gamax.hu/termekeink#Acoustics
(2012. 04. 28.)

[23.] *Acoustics Module*
http://www.comsol.com/products/acoustics/
(2012. 04. 28.)

[24.] *IMMI zajprognózis készítő szoftver*
http://enviroplus.hu/termekek/immi/
(2012. 04. 28.)

[25.] *Lakosság statisztikai adatok*
http://www.statistik.at/web_en/statistics/population/index.html
(2012. 04. 28.)

[26.] *LspCAD*
http://www.ijdata.com/
(2012. 04. 28.)

[27.] *CARA 2.2 Plus Power Pack*
http://www.cara.de/ENU/index.html
(2012. 04. 28.)

[28.] **Híradástechnika**; LXIII. évfolyam 2008/5. 35-44. old.
Wersényi György; *Számítógépes teremakusztikai szimuláció hangtér optimalizálásához*

[29.] *CARA (Computer Aided Room Acoustics) Room Acoustics software by Bryan Gladstone*
http://www.positive-feedback.com/Issue8/cara.htm
(2012. 04. 28.)

Képjegyzék, ábrajegyzék:

<1.> **Reis Frigyes:** Az épületakusztika alapjai,
Terc kiadó, Budapest, 2003.,

<2.> *Felkészülési segédlet a Zenei Akusztika tárgy, Ludmány András, 2011*
http://fenyi.sci.klte.hu/oktatas/Akusztika/Akusztika_1_felev.pdf
(2012. április 21.)

<3.> *Az emberi fül anatómiája*
http://www.webbeteg.hu/mediatar/ful-orr-gegeszet/50/a-ful-anatomiaja
(2012. április 21.)

<4.> *AMF Álmennyezeti rendszerek, Akusztika program 3. rész*
http://www.amfgrafenau.de/dynamic/files/pros/3-Akustik_H.pdf
(2012. április 21.)

<5.> *Svájc: Auditorium Stravinski Hall*
http://www.hifi.ir/wp-content/uploads/2010/04/Concert-hall.jpg
(2012. április 22.)

<6.> *Nachhallzeit*
http://www.franner-laermschutz.at/content/laermschutzlexikon/nachhallzeit.jpg
(2012. április 22.)

<7.> *AMF Akustik Programm Teil 3*
http://www.amfgrafenau.de/dynamic/files/pros/1-K_Teil%203%20Akustik_D.pdf
(2012. április 22.)

<8.> Szabályozott térakusztika
http://www.proidea.hu/knauf-amf-kft-228083/amf-thermatex-acoustic-range-almennyezet-338501/a_23_d_9_1268141082253_amf_akusztikai_thermatex_acoustic_range.pdf
(2012. április 29.)

<9.> *„Gyakorlati Épületfizika – építészeti akusztika a gyakorlatban”*
Fürjes Andor Tamás
http://www.aqrate.hu/files/aQ-slide-HU-epuletakusztika_gyakorlatban-101114.pdf
(2012. április 22.)

<10.> *A görög lakóház, a hellenisztikus város és a hellén középület építészet*
www.eptort.bme.hu/doc/okor/hellas_3.ppt
(2012. április 22.)

<11.> **Tarnóczy Tamás:** *Teremakusztika I-II.*, Akadémiai kiadó, Budapest, 1986. 1. fejezet: Az akusztika szemlélet fejlődése

<12.> *Staatsoper (Bécs)*
http://hu.wikipedia.org/wiki/Staatsoper
(2012. április 22.)

<13.> *Magyar Állami Operaház*
http://hu.wikipedia.org/wiki/Magyar_Állami_Operaház
(2012. április 22.)

<14.> *Magyar Állami Operaház*
Császár László, Épülettípusok a kiegyezés utáni Magyarországon, Építésügyi Tájékoztatási Központ, Budapest, 1995. 64. old.

<15.> *Művészetek Palotája: kultúrából ötös*
http://premier.mtv.hu/Hirek/2010/03/11/15/Muveszetek_Palotaja_kulturabol_otos.aspx
(2012. április 25.)

<16.> *Művészetek Palotája*
http://mupa.hu/
(2012. április 25.)

<17.> *Zoboki-Demeter & Társai Építésziroda*
http://www.zda.hu
(2012. április 25.)

<18.> *A kőcsiga belül – a pécsi Kodály Központ belsőépítészete*
http://epiteszforum.hu/node/18520
(2012. április 25.)

<19.> *Kodály Centre - Pécs, New concert hall, objective and subjective results*
http://www.kotschy.hu/lib/AA2011_Kotschy_1v0.pdf
(2012. április 25.)

<20.> *Kristálypalota Reykjavíkban*
http://www.octogon.hu/archinfo/uj+epuletek/kristalypalota+reykjavikban+1.html
(2012. április 22.)

<21.> *Harpa – új hang a zenei palettán*
http://epiteszforum.hu/node/18669
(2012. április 22.)

<22.> *Oslo Opera House / Snohetta*
http://www.archdaily.com/440/oslo-opera-house-snohetta/
(2012. április 22.)

<23.> *Hangversenyterem Doborjánban*
http://epiteszforum.hu/node/4880
(2012. április 22.)

<24.> *Concert Hall Raiding, Konzertsaal in Raiding*
Detail Magazine, 3./2009., 216-227. old.

<25.> Odeon Room Acoustics Software
http://www.odeon.dk/
(2012. április 28.)

<26.> Comsol Acoustics Module
http://www.comsol.com/products/acoustics/
(2012. április 28.)

<27.> *IMMI zajprognózis készítő szoftver*

http://enviroplus.hu/termekek/immi/
(2012. 04. 28.)

<28.> *LspCAD*
http://www.ijdata.com/
(2012. 04. 28.)

<29.> *CARA 2.2 Plus Power Pack*
http://www.cara.de/ENU/index.html
(2012. 04. 28.)

8. Mellékletek

Anyagok és burkolatok hangelnyelési tényezői (α)

Absorption Coefficients *α* of Building Materials and Finishes

Anyagsűrűség (Material density): 1 ounce/cubic yard = 0.037079776 kg/m^3 or 1 kg/m^3 = 26.968878969 oz/yd^3

Padló anyagok (Floor Materials)	**125 Hz**	**250 Hz**	**500 Hz**	**1000 Hz**	**2000 Hz**	**4000 Hz**
Beton vagy csempe (concrete or tile)	0.01	0.01	0.015	0.02	0.02	0.02
Linóleum/PVC betonon (linoleum/vinyl tile on concrete)	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02
Fa kötőgerendákon (wood on joists)	0.15	0.11	0.10	0.07	0.06	0.07
Parketta betonon (parquet on concrete)	0.04	0.04	0.07	0.06	0.06	0.07
Textil betonon (carpet on concrete)	0.02	0.06	0.14	0.37	0.60	0.65
Textil hab alátét (carpet on foam)	0.08	0.24	0.57	0.69	0.71	0.73

Ülések anyagai Seating Materials	**125 Hz**	**250 Hz**	**500 Hz**	**1000 Hz**	**2000 Hz**	**4000 Hz**
telejen foglalt – párnázott szövet (fully occupied - fabric upholstered)	0.60	0.74	0.88	0.96	0.93	0.85
foglalt fa padok (occupied wooden pews)	0.57	0.61	0.75	0.86	0.91	0.86
üres – párnázott szövet (empty - fabric upholstered)	0.49	0.66	0.80	0.88	0.82	0.70
üres fém/fa ülések (empty metal/wood seats)	0.15	0.19	0.22	0.39	0.38	0.30

Fal anyagok (Wall Materials)	**125 Hz**	**250 Hz**	**500 Hz**	**1000 Hz**	**2000 Hz**	**4000 Hz**
Tégla (Brick)	0.03	0.03	0.03	0.04	0.05	0.07
Tégla vakolt festett (Brick painted)	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03
Betöntömb - nyers Concrete block – coarse)	0.36	0.44	0.31	0.29	0.39	0.25
Betontömb - festve (Concrete block – painted)	0.10	0.05	0.06	0.07	0.09	0.08
Függöny: 10 oz/sq szövet struktúra (Curtain: 10 oz/sq yd fabric molleton)	0.03	0.04	0.11	0.17	0.24	0.35
Függöny: 14 oz/sq szövet struktúra (Curtain: 14 oz/sq yd fabric molleton)	0.07	0.31	0.49	0.75	0.70	0.60
Függöny: 18 oz/sq szövet struktúra (Curtain: 18 oz/sq yd fabric molleton)	0.14	0.35	0.55	0.72	0.70	0.65
Üveggyapot: légréteg nélkül (Fiberglass: 2" 703 no airspace)	0.22	0.82	0.99	0.99	0.99	0.99
Üveggyapot: 2’’ rétegben (Fiberglass: 2" rolls)	0.17	0.55	0.80	0.90	0.85	0.80
Üveg ablak (Glass: window)	0.35	0.25	0.18	0.12	0.07	0.04
Gipsz: simán burkolólapon/ téglán (Plaster: smooth on tile/brick)	0.013	0.015	0.02	0.03	0.04	0.05
Gipsz: lécvázon (Plaster: rough on lath)	0.02	0.03	0.04	0.05	0.04	0.03
Márvány / Csempe Marble/Tile	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02
Fa: rétegelt lemez (Wood: 3/8" plywood panel)	0.28	0.22	0.17	0.09	0.10	0.11

Mennyezeti anyagok (Ceiling Materials)	**125 Hz**	**250 Hz**	**500 Hz**	**1000 Hz**	**2000 Hz**	**4000 Hz**
Akusztikus burkolat (Acoustic Tiles)	0.05	0.22	0.52	0.56	0.45	0.32
Akusztikus mennyezeti burkolat (Acoustic Ceiling Tiles)	0.70	0.66	0.72	0.92	0.88	0.75
Üveggyapot: légréteg nélkül (Fiberglass: 2" 703 no airspace)	0.22	0.82	0.99	0.99	0.99	0.99
Üveggyapot: 2’’ rétegben (Fiberglass: 2" rolls)	0.17	0.55	0.80	0.90	0.85	0.80
Fa (Wood)	0.15	0.11	0.10	0.07	0.06	0.07
Hab: Sonex 2’’ (Foam: Sonex 2")	0.06	0.25	0.56	0.81	0.90	0.91
Hab: SDG 3’’ (Foam: SDG 3")	0.24	0.58	0.67	0.91	0.96	0.99
Hab: SDG 4’’ (Foam: SDG 4")	0.33	0.90	0.84	0.99	0.98	0.99
Gipsz: simán burkolólapon/ téglán (Plaster: smooth on tile/brick)	0.01	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05
Gipsz: lécvázon (Plaster: rough on lath)	0.02	0.03	0.04	0.05	0.04	0.03
Fa: rétegelt lemez Wood: 3/8" plywood panel	0.28	0.22	0.17	0.09	0.10	0.11

Egyéb anyagok (Miscellaneous Material)	**125 Hz**	**250 Hz**	**500 Hz**	**1000 Hz**	**2000 Hz**	**4000 Hz**
Víz (Water)	0.008	0.008	0.013	0.015	0.020	0.025
Felnőtt emberek (People (adults))	0.25	0.35	0.42	0.46	0.5	0.5

Egyéb mellékletek:

Doborján Liszt Ferenc Hangversenyterem tervek:

Helyszínrajz	M 1:500	A1
-1 szint	M 1:100	A1
0. szint	M 1:100	A1
1. szint	M 1:100	A1
Metszetek	M 1:100	A1
Homlokzatok	M 1:100	A1

Elérhetőségek:

	Sós Attila
Lakcím:	**9221 Levél, Orgona utca 26.**
Telefonszám:	**+36 30/561 5219**
E-mail cím:	**sos.attila@gmx.com**