

Az Opera auditóriumának teremakusztikai korszerűsítése

Körülbelül egy évvel ezelőtt adták át a felújított és korszerűsített, számos elemében Vbl Miklós terveihez hűen rekonstruált Magyar Állami Operaház épületét. Előző lapszámainkban a rekonstrukció számos jelentős pilléréről, témaköréről számolhattunk be, egy nagyobb jelentőségű, több szakág kooperációján alapuló munkarész bemutatásával azonban adósok maradtunk.

A modern teremakusztika egy alig több, mint 100 éves tudományág. Az Operaház esetében valószínűleg az 1984-es felújítás az első alkalom, amikor a korszerűsítésben akusztikai szakemberek nevesítetten is részt vettek, előtte ezt a feladatot akusztikusok híján az építészek látták el. 1950-ben talán Dr. Tarnóczy Tamás ráláthatott az Operaház felújítására, de erre nem találunk egyértelmű hivatkozást. A ház 1984-es felújítása során Dr. Karsai Elekné Márta volt a közreműködő akusztikus tervező, akinek eszköztára akkor még jelentősen szűkebb volt. Talán ennek a ténynek is köszönhető, hogy ezt a felújítást a későbbiekben az utókor – teremakusztikai szempontból különösen – nem tartotta időtállóknak.

Az Operaház 2022-ben befejezett és figyelemre méltó összetettségű teremakusztikai rekonstrukciójának koncepcióját kidolgozta és a szakági tervezést a ZDA építésziroda csapata (Zoboki Gábor, Kakas László, Silvester Csaba, Molnár Máté) koordinálta. A ZDA által bevont szakági tanácsadó, tervező Federico Cruz-Barney (Studio DAP), valamint Dr. Huszty Csaba (Entel Kft.) voltak.

Lakatos Gergely



Címleap a Vasárnapi ujság megnyitót követő számából

Az Opera központi tere az auditórium, melynek teremakusztikai jellemzőit mindig nagy érdeklődés kísérte. Az akusztika az 1884-es átadáskor és a felújításokat követően is minden alkalommal kiváló volt, ám valamennyi felújítás alkalmával mégis meg kellett javítani. A terem hangzása 2022-ben már legalább az ötödik generációját éli és minden korban a lehető legnagyobb odafigyelést kapta. Mi is igyekeztünk ennek a kötelemnek megfelelni és az elérhető legújabb módszereket és tapasztalatokat ötvözve, a mai kor igényei szerint formálni a terem hangzásán.

A Magyar Királyi Operaház három év előkészítés és kilenc év kivitelezést követően I. Ferenc József király „magánpénztárából” épült és 1884 őszén nyitott meg. Liszt Ferenc ekkor 73 éves volt, Richard Wagner ezt megelőzően másfél évvel hunyt el, a négy évvel későbbi intendáns, Gustav Mahler pedig alig múlt el 24 éves. A római pápa XIII. Leó volt, ekkor mutatták be a Steinway zongoragyár azóta világhírű D-modelljét, és Budapesten a végéhez közeledett az Országház építésének előkészítése és a Mátyás-templom újjáépítése. A nyitóelőadáson – a főhomlokzaton életnagyságú szobrot kapott, akkor 74 éves – Erkel Ferenc saját műveiből vezényelt, fia, Sándor pedig Wagner *Lohengrinjének* első felvonását dirigálta.

A díszelőadást hatalmas érdeklődés kísérte, és bár az udvar a műsor végét már nem várta meg – kevéssel a hattýulovag megérkezése után angolosan távozott –, a király is elismerően szólt az operaházról, mely a bécsi és párizsi operákat meghaladó színvonalú műszaki berendezésekkel létesült. A korabeli sajtóban azonban aggodalommal tekintettek az akusztikára:

„Nincs a modern építészetnek kényesebb és megoldhatatlanabb kérdése, mint a nyilvános helyiségek helyes akusztikája; az a sajátság, melynél fogva egy kiboacsátott hang a terem bármely részében tisztán és tömören, szabatosan és érthetően kivehető legyen. A dolog bármilyen egyszerűnek látszik, tudományos tekintetben a legbonyolultabbak egyike,

s csak a hangterjedés fizikai törvényeinek ismerete mellett érthető meg teljesen.⁷

Aggodalmaikat a korábbi rossz tapasztalatokra alapozták: „Mert valóban nem túlzás az, ha azt állítjuk, hogy nemcsak fővárosunkban, de a legelső világvárosokban is színházak, gyűléstermek, felolvasó- és hangverseny-helyiségek, sőt parlamentek is túlnyomólag hibás optikával és akusztikával építvék.”⁸

Az olvasókat pedig aligha nyugtatta meg a korabeli akusztikai tervezési módszerek sommás értékelése: „Ismételjük azonban, az akusztika nagy részben mindig a véletlenségek és meglepetések tudománya marad. Semmivel sem foglalkoztak már hetek óta, még az operaház megnyitja előtt oly behatóan, mint az akusztika kérdésével. És azért a kérdés egész a megnyitó napjáig eldöntetlen maradt. A megelőzőleg tett próbák rámutattak egynehány jelentékenyebb hiányra, minek következtében utolsó perczben még a zenekar vonós játékosainak ülőhelyét mintegy féllábnyival magasabbra emelték. Hogy azonban az akusztika előnyei és fogyatkozásai végleges elbirálás tárgyát képezhessék, arra nézve nemcsak a terem teljes díszítése szükséges, de szükséges az is, hogy teljes számú közönség jelenlétében történjék a próba.”⁹

A nyitóelőadás kissé bágyadtra sikerült első részéről azonban az alábbiak szerint emlékeznek: „Nem róhatjuk föl az akusztikának, mert az ének- és zenekar kitűnően hangzott. Most már a rézfuvó hangszerek nem dominálnak annyira, mint azelőtt. Szép, tömör harmóniába olvadnak az egyes hangszer-csoportok. A hegedűk erélyesen előtérbe lépnek, a hol szükséges, mint például ma a »Bánk-bán«-ballet zenéjében; csak a mélyhegedűk és a gordonkák nem érvényesülnek még kellő nyomattal. Ezek úgy látszik még némi erősítésre várnak.”¹⁰

A nyitóelőadás előtt több akusztikai próbát is tartottak, melyről a korabeli sajtó is beszámolt: „A mult napokban tettek kísérletet az akusztikát illetőleg, s hír szerint a színházban igen tisztán hangzik minden szó és a leghalkabb piano is.”¹¹

És még egy helyen: „Podmaniczky Frigyes báró intendáns ma délelőtt 11½ órára az új opera-házba rendelte az opera egész férfi- és női énekkarát, hogy velők a színház s a kar próbaterme akusztikáját kipróbálja. Káldy Gyula, az opera főrendezője az összes karral Erkel Ferencz Hunyady Lászlójából a Himnuszt énekelte el. A próba fényesen sikerült. Az akusztika mind a két helyen jó s különösen a nézőtérén kitűnő. Ugy a forte részek, mint a leglágabb pianók is teljesen érvényre jutottak. A próba alatt az opera tagjai, kik teljes számban jelen voltak s Podmaniczky Frigyes báró intendáns a színház különböző pontjain helyezkedtek el, a földszintől a harmadik emeletig s így konstátálták a már említett kedvező eredményt.”¹²

Miután a megnyitó előtt a korabeli újságok több helyen megírták, hogy az új színházgépészet hasznavehetetlen lesz, tartottak egy szakmai próbát, melyen bizonyosságot nyert ennek ellenkezője. A bemutató végén egy rövid énekes produkció is felhangzott. „Ezután még az akusztikával tettek próbát Malecky, Ódry és Pauli, a színpad különböző pontjairól énekelve egy-egy áriát „Tell Vilmos”-ból és „Norma”-ból. Ez a kísérlet is kitűnően sikerült, az ének úgy a színpadon, mint a nézőtér minden részében pompásan hangzott.”¹³

Az akusztika tehát az átadáskor – és a felújításokat követően is – minden aggodalom és korábbi tapasztalat ellenére kiválóként minősítettet, később azonban valamennyi felújítás alkalmával meg kellett javítani. Ennek okait részben a kezdeti lelkesedést követő hosszabb idejű tapasztalásban, részben a korrall változó – növekvő zengésre vonatkozó – igényekben lehet keresni; mert kis számú szubjektív ítélet alapján nem is tudni pontosan, mi a „jó akusztika”. Meg kell jegyezni, hogy az Operaház építése a modern akusztikai tudományokkal egyidős, sőt, annál kissé korosabb is, így nem csoda, hogy a megnyitás körüli sajtóhírekben más termék vonatkozásában is az „akusztika” kifejezés többségében mint elrontott jellemző és megoldandó probléma jelenik meg.

A központi auditorium egyik első dokumentált teremakusztikai vizsgálata és az akusztikáról kialakított árnyaltabb műszaki vélemény 1912-ből származik Medgyaszay Istvántól, az akkori korszerűsítés vezetőjétől: „Ámbár jó a nézőtér akusztikája, de a zenekar a földszinten nagyon is erősen érvényesül és a színpadról jövő énekhanggal nem keveredik harmonikusan, másfelől a zenekar a színpad harmadik kulissza-utcáján túl már alig hallik, ami a pontos összejátszást szinte lehetetlenné teszi.”¹⁴

Mivel „gondolni sem lehetett” a nézőtér formai változtatására, a színpadi térbe történő jelentős beavatkozás pedig anyagi korlátokba ütközött, „adódott a zenekar és nézőtér új tartó szerkezete, illetőleg ezeknek megfelelő alakítása az intenzívebb rezonálás céljára”. Medgyaszay az anyagok felől közelítette a teremakusztikát, és megfogalmazásában még nem különültek el egyértelműen a rezgésakusztikai és a teremakusztikai jellemzők. Annak ellenére azonban, hogy talán nem is ismerhette a mindössze hat évvel korábban Wallace Clement Sabine amerikai fizikus publikálta vizsgálatokat az utózenegési idő és a hangelnyelés statisztikus összefüggéseiről, Medgyaszay mégis sikerrel azonosította a fő teremakusztikai és geometriai problémákat: a rövid nézőtéri utózenegési időt és a zenekari árok helyzetét, melyet maga is módosított. Medgyaszay korszerűsítési munkájának akusztikai következményeiről később így számolnak be: „A nézőtérén mi változás sem ötlök fel. Frissebbek, üdébbek a színek, tágasb a tér. Az első azért, mert Lotz mester mennyetfestményeit megtisztították az idővel rá rakódott portól, füsttől; másik, mert a nagy csillárt magasabbra húzták fel. A karzatról így szabadabban lehet látni, mert nincs útban a csillár. További változás a zenekar új elhelyezése. Ezt ugyanis jobban a színpad alá tolták be és ezáltal a padokat szaporítani lehetett. De az akusztika azért lényegesen javult. Az egész nézőtér és zenekar alatt ugyanis igen vékony faréteg van, ami a legfinomabb rezgéseket felveszi. A vékony és vele párhuzamos erősebb faréteg közötti rugalmas levegőréteg a finom rezgéseket még erősíti. Medgyaszay ugyanezt az elrendezést a veszprémi és soproni színházakban már előnyösen kipróbálta.”¹⁵

Az átalakítások során a nézőtér alá a fa tartószerkezet helyébe – tűzbiztonsági okokból – vasszerkezet került, a zenekari árkot lejjebb süllyesztették és kissé a színpad alá tolták. Az auditoriumban később kisebb nézőszám bővítés történt 1949–50-ben a külföldi emigrációból hazatérő Kaufmann Oszkár színházépítész vezetésével végzett korszerűsítés során, majd egy jelentősebb rekonstrukciót követően alakult ki a jelenkori kiinduló állapot 1980–84 között, Siklós Mária irányításával.¹⁶ Erről az akkori hírek a következőképpen számoltak be: „Az átépítés során kibővítettük a zenekari árkot, amely most már emelhető, süllyeszthető is, más hangerőt kíván ugyanis egy Mozart-, egy Verdi- vagy egy Wagner-mű. Új hátsó színpadot is építettünk, a Lázár utcai hajdani felhajtórampát felhasználva, s így nagyobb lett a színpad területe. Emiatt viszont 42 centiméterrel meg kellett emelnünk a földszinti nézőtér utolsó sorait, hogy minden székből tökéletesen látható legyen az egész színpad. Mindez módosítja a hangvisszaverést, ám számításaink szerint kedvezőbb lesz az Operaház akusztikája a korábnál is. Tegnap persze nemcsak a műszerek vizsgáltatták az épületet. Az 1250 néző – meghívott zenekritikusok, zenészek, karmesterek, régi opera-látogatók – kérdőíveken válaszolt arra, hogyan ítélik meg a zenekar hangzását, az akusztikát. Üres nézőtér előtt már vizsgáztatták a felújított épület, s kedvezőek az eredmények, ám a hangzás telt háznál más, mint az üres sorok előtt. A hétfői és a tegnapi tapasztalatokat az építők és az Operaház művészei, vezetői közösen értékelik majd, s aztán döntenek el, van-e még tennivaló, szükség van-e finomításra, esetleg utólagos építészeti beavatkozásra.”¹⁷

Leo Beranek amerikai akusztikus a *Concert Halls and Opera Houses: Music, Acoustics, and Architecture* című könyvében is szerepelteti a Magyar Állami Operaházat, melynek akusztikájáról a következőket írja: „Kis mérete, 314 000 ft³ (8900 m³) a világ egyik legintimebb nagy operaházává teszi. Az alacsony utó-



Hangforrás-pozíciók a teremakusztikai állapotfelméréskor (2014. 12. 15.)

▶ *zengési idő megakadályozza a túlzott hangosságot. Mondani sem kell, hogy az akusztikája kitűnő operákhhoz, de kevésbé kedvező szimfonikus zenére.*⁷²

Bő száz évvel a mostani korszerűsítés előtt Medgyaszay a beavatkozások mértékével kapcsolatban a jelenkori munkák egyik fő dilemmáját is pontosan megfogalmazta és meg is válaszolta: „*Véleményem szerint sokkal több kegyelet nyilvánul abban, ha ilyen remekművet megmentünk mindannyiunknak és az eleven életnek, mint ha maholnap elhagyott üres múzeumi tárgynak hagyjuk meg.*”⁷³

A jelenkori korszerűsítés akusztikai szempontjai is ezt a megközelítést követték: bátran, de alázattal változtatni úgy, ahogy az a mai kornak szükséges. Ezekben a változtatásokban a megbízó, az építető és a műemlékvédelmi szakemberek is partnereknek bizonyultak.

Az előkészítő munka a kormány 1829/2014. (XII. 23.) határozatával indult meg, melyben „*a Kormány felhívja a nemzetgazdasági minisztert, hogy (...) a Magyar Állami Operaház akusztikája javításának tervezéséhez szükséges*” forrás biztosításáról gondoskodjon. A helyszíni akusztikai felméréseket a biztosított forrás töredékéből el tudtuk készíteni. Ezt követően a 1452/2016. (VIII. 22.) kormányhatározat biztosított pénzforrást a korszerűsítésre, melyet a bővülő tervezési program miatt többször is ki kellett egészíteni.¹⁴

A teremakusztikai tervezés egyik pillére az Entel Kft. által 2015-ben elkészített mérések és az abból levont szakmai következtetések, valamint a Studio DAP külföldi tapasztalatai voltak. A ZDA irányításával megvalósuló akusztikai programalkotást követően kezdődött a teremakusztikai tervezés időszaka, amely további akusztikai koncepciók, hatásvizsgálatok, elemzések, modellezési számítások és mérések elvégzésében testesültek meg. A tervezési folyamat eredményeként az Entel Kft. elkészítette az auditórium egysége, mérésekkel kalibrált számítógépes modelljét is, amely lehetőséget biz-

tosított a tervezés méretezési, számítási feladatai és a különféle változtatási alternatívák hatásvizsgálatai elvégzésére.

Az auditórium teremakusztikai korszerűsítésének előkészítését komplex megalapozó munka előzte meg objektív és szubjektív vizsgálatokkal, melyek főbb tételei a következők voltak:

- ▶ átfogó nemzetközi szakirodalmi vizsgálat más operaházak akusztikai korszerűsítéseiről
- ▶ az auditóriumban korábban végzett műszeres mérések elemzése
- ▶ egy minden korábbinál részletesebb új műszeres felmérés készítése
 - különböző teremállapotokhoz tartozó mérés (nézőtér, színpad, zenekari árok)
 - színpadi akusztikai vizsgálatok
 - közönség jelenlétében végzett műszeres mérés (közönség tényleges hangnyelése)
 - csatolt terek önálló mérései (nyomótér, páholyok)
 - épületakusztikai vizsgálatok az auditórium egyes szerkezeteire (nézőtéri padló)
- ▶ karmesteri és szólamvezetői interjúk készítése
- ▶ szimfonikus zenekari és énekes próba, kérdőíves vizsgálat és elemzés (szubjektív teszt)
- ▶ kiegészítő tanulmányok
 - rezgésakusztikai vizsgálat
 - orgona építéstörténeti dokumentáció

Objektív mérések

Kiindulásnak két objektív teremakusztikai vizsgálat állt rendelkezésünkre, melyeket 1971-ben (Kotschy András) és 1993-ban (Hidaka Takayuki) készítet-

tek. A 2014-ben, majd 2016-ban végzett vizsgálataink átlagértékei ezek eredményeivel összhangban voltak. Méréseink nem szigorúan az ISO 3382 akusztikai mérési szabvány szerint készültek, mert az energetikai teremakusztikai paraméterek (pl. hangtisztaság) vonatkozásában a szabványban előírt közel gömbi iránykarakteristikájú hangforrásnál kevesebb hullámfrontot kibocsátó, „tisztább képet” adó, jobb minőségű impulzusválaszokra volt szükségünk, ezért koaxiális hangsugárzót és a szabványban előírnál lényegesen több forrás- és vevőpontot használtunk. A mérőjelet az auditórium és a mérőrendszer tulajdonságaihoz egyedileg igazítottuk, hogy a lehető legrövidebb idő alatt a legtöbb hasznos adatot tudjuk megkapni, ehhez az eljáráshoz korábbi kutatási eredményeink adtak alapot. A mérések vevőpozícióit pedig Ambisonics technikával rögzítettük annak érdekében, hogy minden pontban tájékoztató adatokat kaphassunk a visszaverődések irányairól is, és a térbeli akusztikai paramétereket is tudjunk vizsgálni, értékelni.

A 2014–16 előtti vizsgálatok jellemzően üres teremállapotban, eltérő díszletezettség és zenekari árok beállítás mellett történtek. Beranek könyvében is csak becslés tartozik a közönséggel telt állapotra. A mérési módszereken és a technológiai különbségeken kívül ez is megmagyarázza az eredményekben látható kisebb eltéréseket. A mérések tanúsága szerint azonban az 1984-es felújítást követően a nézőtéri teremakusztikai viszonyok – az anyagok és tartószerkezetek öregedésén kívül – lényegesen nem változtak. A megtapasztalt szubjektív élményeket a mérések is alátámasztották: közönség jelenlétében az utözengési idő a mai kor elvárásaihoz képest túlzottan alacsonnyá válik. Teltház esetén kb. 20%-kal csökkent az átlagos közepes utözengési idő, legnagyobb mértékben éppen a földszinten (a közepes utözengési idő ekkor 1,2 s volt). Eközben a terem üres állapotában a közepes utözengési idő mértéke a szakirodalomban ideálisnak tartott tartomány felső határán volt, kissé 1,6 másodperc felett (vasfüggönnyel lezárva pedig még magasabb érték adódott: 1,7 s). A mai elvárások szerint azonban a terem összességében mégis kissé „száraznak” volt mondható. Különbé, dominánsan hangelnyelő, illetve visszaverést nem a nézőtér felé adó díszletek jelenléte esetén az átlagos utözengési idő 1,4–1,5 másodperc körüli tartományra is lecsökkenhet – ez is elmaradt a ma szokásos 1,5 másodperc körüli elvárt teltházás értéktől. Az utözengési idő értékek térbeli eloszlása egyébként egyenletes volt, a változás még a füllel éppen érzékelhető határ mértéke alatt maradt. A hangtisztaság (C80) értéke a színpadi hangforrások esetén azonban magasabb volt az ajánlott értéknél. A zenekari ároknál lévő hangforrások pozíciójában az ajánlott értéktartomány körüli értékeket mértünk. Az intimitás érzetével összefüggő objektív paraméter értéke a legjobb akusztikájú operaházakra jellemző tartomány felső határánál volt, ezt potenciálisan csökkenthetők tartottuk abban az esetben, ha ezzel más előnyre tudunk szert tenni. Az akusztikai hangosság objektív paramétere (G) tekintetében a terem kissé halknak bizonyult, a színpad hátánál elhelyezett énekesek hangja túlzottan csillapodva jutott be a nézőtérbe a zenekar hangjához képest. A nézőtéren jelentős oldalenergia jelent meg, de a közönség jelenléte esetén ez lecsökkent. A nézőtéren a Lotz-freskó boltozata miatt jelentős esőrgővisszhang jelent meg, melyet a nagyméretű csillár mint diffúzor sem tudott semlegesíteni, azonban ezt a káros hatást csak a nézőtérről lehetett gerjeszteni, így mégsem okozott érzeti akusztikai problémát, inkább amolyan érdekesség, mely a Zeneakadémia Nagytermében is megtapasztalható.

Az Operaház nézőtérének teremakusztikai minőségét a nézőtér építészeti és belsőépítészeti kialakításán kívül a színpadi akusztikai körülmények – különösen a díszletek – és a terem közönséggel telítettsége is alapvetően befolyásolja. A különféle díszletezésű produkciókban és változó teremtelítettség-nél akusztikai szempontból hallható, akár lényegesen eltérő körülmények is felléphetnek; a színpadi térrész saját zengése pedig jelentős hatással van a nézőtéren kialakuló átlagos utözengési időre.

Az eredeti nézőtéri székek elnyelése alacsony volt, így a közönség jelenléte érezhető hatással volt az aktuális akusztikai viszonyokra, ez azonban a zenekari árokban nem minden esetben volt érzékelhető a lokálisan magas hangnyomás okozta elfedés miatt. A földszinti nézőtér faburkolatú falai mentén kisfrekvenciás elnyelés volt megfigyelhető, valószínűleg a burkolat alacsonyabb merevsége és rétegtrendi kialakítása miatt.



Előhészület és mérés közönség jelenlétében (2016. 03. 03.)

Az Operaház auditórium akusztikai szempontból két nagyobb (kb. 8715 m³ nézőtér, kb. 14 950 m³ első színpad és kb. 2240 m³ hátsó színpad, összesen kb. 17 190 m³ színpadi tér) és több kisebb csatolt tér együttesének tekinthető. Kisebb mértékű csatolásként a zenekar alatti szellőző légtér is mérhető hatású, de a korszerűsítést megelőzően nem volt akusztikai jelentősége, mert a zenekari ároktól egy vasbetonfal választotta el. Az egybenyitott térben kialakult teremakusztikai viszonyokat a nézőtér saját akusztikája, a díszletes színpadtér akusztikája a zenekari árokkal, illetve a nézőtér és a színpad csatolása határozza meg legjelentősebben. A színpadtér falai (a korábbi díszletemelő ellensúlyok rácsos szerkezetei, a függönyök stb.) és mennyezete alapvetően hangelnyelő jelleget mutattak. Általában jelentékeny felületű függöny volt a térben elhelyezve vagy tárolva, a színpadtér közepes utözengési ideje így tipikusan kb. 30%-ban elmaradt a közönségtér utözengési idejétől, és a hangelnyelő felületek összességének is kb. 65%-a a színpadi területre esett. A színpadtér tehát – egybenyitva a nézőtérrel – csökkentette a teremben érezhető utözengési időt, de annak közel exponenciális lecsengő jellegét érezhető módon nem befolyásolta, így nem okozott természetellenes hanghatást. A szubjektív tapasztalat szerint azonban a hang gyorsan csillapodott, elveszett a színpadi térben. Hozzájárult ehhez az is, hogy a díszletek és a színpadtér kialakítása viszonylag kevés hangot irányított a nézőtér felé. A színpadnyílás magassága akusztikai szempontból az énekeseket nehéz helyzetbe



A földszinti székelf rendezés megváltoztatásának teremakusztikai hatásvizsgálata (2018. 11. 27.)



Zenekari próba pillanatképe. A majdani előretolt zenekari árok várható hangzásának közelítő vizsgálata (2017. 02. 10.)

- ▶ hozta, mert a zenekari árok feletti visszaverő hangterelő nem tudott maradéktalanul érvényesülni a lehúzott nyílásmagasság árnyékoló hatása miatt, így az énekhang kevésbé jutott el a nézőtér felé.

Zenekari próba és interjúk

A műszeres felmérések az objektív felmérést szolgálták, de emellett szükségét láttuk a zenekar körében végzett kérdőíves (szubjektív) vizsgálatnak is, melyet a zenekar tagjai segítségével végzett akusztikai próbával is kiegészítettünk. Ezen kívül készültek karmesteri és zenekari szólamvezetői személyes interjúk is.

A zenekar tagjaival a kérdőíveket rögtön a zenemű felhangzása után töltöttük ki, hogy ne emlékezzettel elhalványított, hanem a pillanatnyi, friss benyomásról kapjunk visszajelzést. Minden igyekezet ellenére el kell ismerni a szubjektív felmérés tudományos korlátait is a korlátozott számú mintavétel vagy a módszertani kötöttségek miatt – egy gyógyszer engedélyezéséhez szükséges vizsgálatok színvonalával nyilvánvalóan nem érnek fel ezek a kérdőívek. A vizsgálat mégis hasznosnak bizonyult, mert tájékoztató adatokat adott az egyes teremmodosítások és ezek hatásainak preferencia-sorrendjéről. Az akusztikai próba a még jóváhagyás előtt álló új, oldaljárásos földszinti székelf rendezésben valósult meg. A rögzítés nélkül kissé még bizonytalanul álló széksorokban az építészirodától, szakági tervezőktől és az Operaház vezetői közül érkező nézők is többen helyet tudtak foglalni.

A kérdőívek értékelésével és a teremállapotokhoz tartozó objektív akusztikai paraméterekkel történő összevetésből kiderült, hogy a zengőbb tér, a kevésbé elnyelő színpad, a kevésbé süllyesztett és a nézőtér felé eltolt zenekar egyaránt előnyösebb megítélésben részesültek a meglévő állapothoz képest. Érdekes, hogy az összes kipróbált variáció közül az akkoriban leggyakrabban használt beállítás bizonyult a legkevésbé preferáltnak. Ez a vizsgálat is megerősítette, hogy az utózenézési idő növelése szükséges, és hogy az állítható



magasságú és eszerint is használt, differenciált süllyesztésű zenekari árok elengedhetetlen kelléke lesz a korszerűsítésnek.

A nézőtérre vonatkozó szubjektív vizsgálatok az akusztikai élmény kisebb inhomogenitására, a harmadik emelet első soraiban tapasztalható jobb zenekari hangzásra és általánosan kisebb mélyhang-szegénységre utaltak. A helyszínen jól megfigyelhetők voltak a modális jelenségek is. A vizsgálatok alapján kezdett pontosabban is körvonalazódni a tervezési program, de a megoldásokat még ki kellett dolgozni.

Kiegészítő tanulmányok

A BME akusztikai laboratóriumának munkatársai felkérésünkre a közeli kisértőlatti rezgésterjedésével kapcsolatos vizsgálatot végeztek. Ennek eredménye alapján megállapítást nyert, hogy van kockázata annak, hogy a kisértőlatti rezgése esetleg bejuthat és zajt kelthet az auditoriumban, így kiderült, hogy a nézőtéri padlót, illetve a földszint (zsólye) talapzatát majd rezgésszigeteléssel kell ellátni.

Talán kevesen tudják, hogy egyes javítási dokumentációk tanúsága és a megnyitó műsora alapján az auditoriumban a színpadnál egy nem látható magaslaton állt egy sípos orgona is az Operaházban. A hangszert a Dangel gyár készítette, melyet 1903-ban egy második, a Rieger orgonagyár által készített 2 manuálos, 25 regiszteres hangszere váltott fel. A Hajós utcai színpadoldalon, a III. emelet magasságában álló hangszert 1981-ben, a felújítás kezdetekor bontották el véglegesen. Ma már kevesen emlékeznek a részletekre, ezért kulcsfontosságú volt a hangszerek építéstörténetét feltárni a még elérhető személyek emlékei és a megmaradt levéltári források felhasználásával. És persze azért is, mert egy új orgona esetleges megépítése jelentős mértékben hatással lehet a teremakusztikai körülményekre. Az új orgona a korszerűsítés programjából végül kikerült, elektronikus hangszert használnak helyette.

Teremállapot T1C		Zenekari árok süllyesztés	1,8 m (nézőtér) 1,8 m (színpad)	
		Színpadnyílás magasság	9 m	
		Színpadi díszlet	kemény díszlet	
Zenekari preferencia	Nézőtéri preferencia	Egyéb	a díszletek borítása részben puha felületű volt	
4	9	Próbák	B3: Mozart tercett	
Objektív paraméterek				
$\Delta T_{30,avg}$	+1%			
ΔEDT_{avg}	+1%			
ΔBR	0%			
ΔTR	-4%			
$\Delta C_{80,E3}$	+4 dB			
ΔSPL_{mid}	0 dB			

Zenekari próba kérdőívének értékelése az egyik teremállapotban az objektív paraméterek és a visszajelzések összehasonlításával és összesítő pontszámokkal

Zenekar	Teremválasz	Tisztaság	Zenekari kommunikáció
	 3,91	 4,01	 4,06
	 3,44	 3,61	 3,53
Nézőtér	Énekes-zenekar arány	Zenekar arány	Hangszín
	 3,86	 3,97	 3

Zenekari próba szabadszavas visszajelzéseinek értékelése az egyik teremállapotban. A nagyobb betűvel írt szavak gyakoribb előfordulásúak voltak.

A számítógépes modell

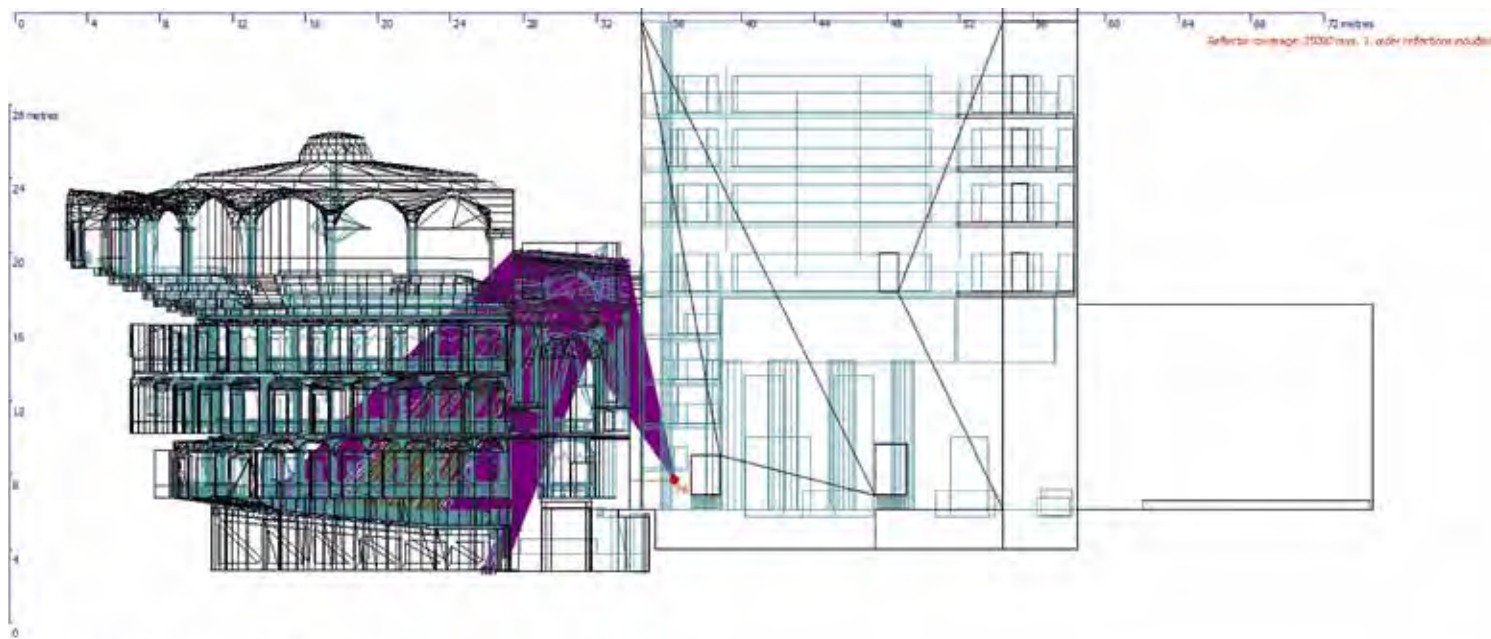
A teremakusztikai vizsgálatokat és terveket számítógépes modelleken tudjuk előre kipróbálni. Ehhez egy olyan modellt kellett kidolgoznunk, amely kellően pontos a meglévő állapotra vonatkozólag. A teremakusztikai modell geometriai része lézeres felmérés alapján készült, és tartalmazza a teljes nézőtéri, nézőtér alatti, zenekari árok és színpadi területeket, a zsinórpadlást és a hátsó színpadot is beleértve. Pontossága néhány cm-en belüli. A modell a nézőtérben a közönségforgalmi bejárati ajtóig tart, a zenekari árok padlója alatti gépészeti aknát azonban nem tartalmazza egészében, de ez az elhanyagolás különösen a zenekar modellezett jelenléte esetén marginális. A geometria modellezését követően valamennyi anyag hangelnyelési értékének ismeretére is szükség volt a pontos számításokhoz. Mivel ennek meghatározására nem volt remény mérések alapján, az anyagokat nem közvetlen, hanem közvetett úton, teremakusztikai mérésekkel kalibráltuk. Első lépésben a részletes teremakusztikai felmérésből véletlenszerűen kiválasztottunk kb. egy tucat hangforrás-hallgató pontpárt, és az itt mért visszaverődés-regisztrátumokból (impulzusválaszokból) többféle szabványos teremakusztikai paramétert is kiszámítottunk (T30, EDT, C80 stb.). A mo-

dellben elhelyeztük ugyanezeket a pontpárokat és kiértékeljük ugyanezen mutatókat. Ezek természetesen kezdetben jelentősen eltértek egymástól, hiszen ismeretlenek voltak a teremben található különféle anyagok oktáv-sávos hangelnyelési értékei, és csak irodalmi adatok alapján, hozzávetőleges kiinduló értékeket tudtunk felvenni. Anyagonként 8 ismeretlen értéket jelentett ez a számításunkban (63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 és 8000 Hz-es sávközépi frekvenciákon), így ahány anyagot meg tudtunk különböztetni, annyszor 8 dimenziós paraméterterben kellett a kimenet szempontjából többparaméteres keresést végezni. Ezt a keresést genetikussal végeztük. A módszer ilyen alkalmazása éppen a vizsgálatunk évében jelent meg a nemzetközi tudományos életben. Laboratóriumi anyagmérésre gondolni sem lehetett, nehéz ugyanis elképzelni, hogy a Lotz-freskóból átmenetileg kihalítsunk egy 12 m²-es anyagmintát egy szabványos méréshez. Lokális impedancia vagy hangelnyelési tényező mérésére sem kínálkozott kellő idő, de a fizikai hozzáférés lehetősége sem. A mérésekhez ugyanis hosszú hónapokra be kellett volna állványozni a teljes auditoriumot, ez pedig csak a kivitelezéshez volt lehetséges. A kalibrált modell ideális értékei több generációnyi paraméterhalmaz után alakultak ki, napokig tartó gépi számításokkal. Ezek az amúgy lokálisan optimális értékek a gyakorlatban jól hasznosíthatóknak bizonyultak.

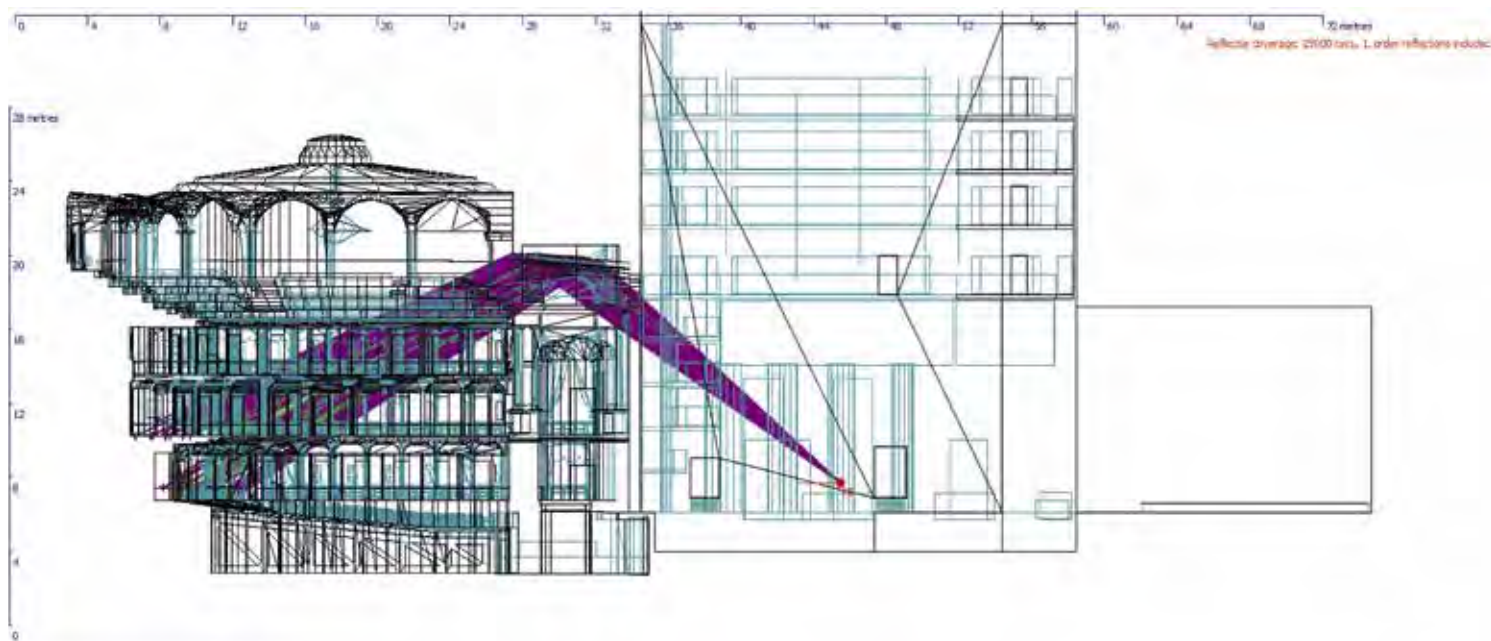
Az új követelmények és műszaki megoldások

Az auditorium utózungési idejére vonatkozóan azt a célt szerettük volna elérni, hogy teltházban a közepes frekvenciás (500 és 1000 Hz-es oktáv-sávok átlaga) T30 utózungési idő megközelítőleg 1,5 s legyen. A többi oktáv-sávban az ehhez az értékhez tartozó DIN 18041:2016 szerinti frekvenciafüggő toleranciasémát tekintettük irányadónak. Az utózungési idő növelésével együtt a hangtisztaság mintegy 2 dB-lel való csökkentését irányoztuk elő, az LFC oldalenergia arány értékét pedig legfeljebb elhanyagolható mértékben kívántuk megváltoztatni a beavatkozásokkal.

Az akusztikai beavatkozási javaslatainkat egy „Auditorium Teremakusztikai Koncepció” című dokumentum táblázatában, 38 tételben foglaltuk össze a ZDA munkatársaival közösen.¹⁵ Ezekből 4 üzemeltetési természetű, a fennmaradó tételek pedig a beruházás különféle fázisaiban voltak esedékesek, az anyagi lehetőségek és egyéb körülmények együtt állása esetén. A változtatások csoportosítása a következők szerint alakult:



©2019-2020 EITEL Engineering Research



©2019-2020 EITEL Engineering Research

A zenekari árok feletti hangvető hangvisszaverő hatásának és lefedésének szemléltetése a megnövelt magasságú színpadnyílás esetén a teremakusztikai modellben

- ▶ színpadi zóna
- ▶ proszcénium
- ▶ zenekari árok
- ▶ zsöllye
- ▶ függönyök és drapériák
- ▶ páholyok és mellvédek

A színpadi zónában a hangelnyelés csökkentését, hangvetők elhelyezését, kemény díszlet alkalmazását és szükség szerint zenekari kagyló használatát javasoltuk. A proszcéniumban a színpadnyílás felszabadítását – a színpadi függönyök kihúzását –, hangvisszaverő bádoggüggöny kialakítását, az előszínpad méretének és a színpadnyílás magasságának növelését, utóbbi állíthatóságát, valamint zajmentes scenikai világítási berendezések alkalmazását tűztük ki célul. A zenekari árokban új ültetési módok támogatását és liftek (emelő) kialakítását, az árok hosszának növelését és elhelyezkedésének a nézőtér felé

eltolását, az árokban állítható hangvető lapok megépítését, a hátfalon szabályozható hangelnyelést (mobil akusztikai fal), a sűgőlyuk karcsúsítását, áttört nézőtéri mellvéd alkalmazását, a vasbeton fal nagyméretű, a nyomótér felé nyíló és az árok felé diffúzor felületű ajtókkal ellátott megnyitását és hangosított légtécnika alkalmazását irányoztuk elő. A zsöllyében az oldalfal felkeményítését, a nézőszám csökkentését és a székek oldaljárásos kialakítását, a zsöllye padló dőlésszögének módosítását, az acél tartószerkezet fa szerkezettűre alakítását, új, szélesebb és hangvisszaverő nézőtéri székek alkalmazását, az első sorban szélesebb járás kialakítását (az 1912-es „casino-sor” ülései mintájára), a szőnyegezés minimalizálását és a zsöllye-nyomótér megfelelő akusztikai összekapcsolását tartottuk a legfontosabbnak. A függönyök vonatkozásában a bejárati függönyözés elhagyását, az ajtók hanggátlásának fokozását és a páholyfüggönyözés cseréjét, magasabbra szerelését javasoltuk. A páholyoknál a mellvédek felkeményítését, a karzati állóhelyeken hangvisszaverő mellvédek

kialakítását, a páholyfalak felkeményített kasírozását, a páholy álmennyezetek merevítését – ez a restaurátori feltárások javaslatai alapján végül nem valósult meg –, a zsöllye (félemeleti) páholyok akusztikai összekapcsolását és a szőnyegezés minimalizálását emeltük ki.

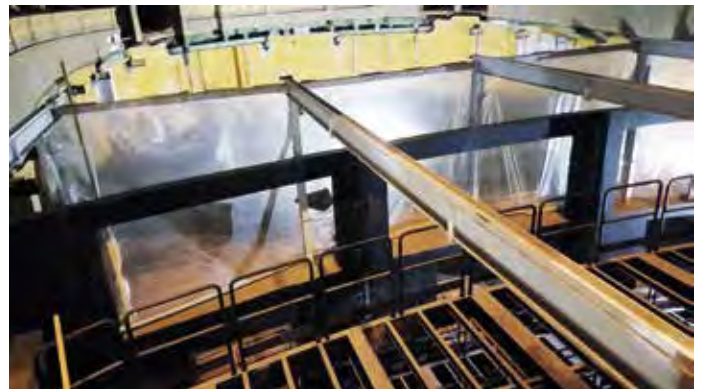
A zengés növelése

Az utózengési idő növelésének feladatát a mérési adatok alapján kissé át kellett fogalmaznunk. Az elektroakusztikai beavatkozással módosított utózengési idő kérdését már a felújítást megelőzően megvizsgáltuk és az intézmény vezetésével egyetértésben elvetettük – ez a megoldás műszakilag ugyan lehetséges, de az intézményhez nem lenne illő, ehelyett építészeti megoldásokkal kell eredményre jutni. Kihívást jelentett, hogy míg más operaházaknál rendszerint a nézőtér csillapítottabb a színpadi térhez képest, itt éppen fordított volt a helyzet: a színpad csillapított, a nézőtéren pedig nincs a burkolatok változtatá-



A nyomótér és a zsöllyepadló közötti szellőzőrács alulnézetből. A középső rész a szellőzésért felelős, a külső gyűrű az akusztikai csatolást segíti

sával elérhető számottevő közvetlen lehetőség az utózengési idő növelésére. A kárpitok összessége alig néhány százalékot képvisel az egyenértékű elnyelési felületből. Ezek teljes eltüntetése sem eredményezné a kívánt hatást. A műemléki környezetre tekintettel az akusztikai beavatkozás mozgásteret látszólag szűkös, azonban sok apróbb látható változtatás és néhány nagyobb, szem előtt rejtett beavatkozással hallható javulást lehet elérni. A terem „hatásos” térfogatát úgy tudtuk növelni, hogy a nézőtér alatti nyomótér jobban összekapcsoltuk a nézőtérrel a megnövelt méretű padlórácsok, a hanggátlásra méretezett padló és a zenekari árok vasbeton falának utólag is nyitható, illetve zárható áttörésével. A csökkentett nézőszám miatt kevesebb padlórács került a zsöllyébe, azonban ezek átmérője jelentősen megnőtt, külső gyűrűje légtechnikai funkciót nem is lát el, kizárólag a nyomótér akusztikai csatolását segíti.



A zenekari árok áttört betonfalának ajtónyílásai (fekete) az épülő színpad felől nézve. A kivett zsöllyepadló még nincs beépítve. (2019. 04. 12.)

Funkcionális és anyagi megfontolások miatt a színpadi térbe is csak korlátozottan lehet beavatkozni. Az ide tervezett állítható oldalfali hangvetők sajnos nem is tudtak megvalósulni, az elmaradó hatás valószínűleg okozhat majd panaszokat.

Az utózengési idő növelését, amennyire lehetett, megpróbáltuk a változtatások együttesével érvényesíteni, de fontosabb volt a „zengés” érzetének növelése, ami inkább a korai lecsengési idővel (EDT) függ össze. Ez a földszinti nézőtéren és a páholyokban kritikus, így ezekre a térrészekre külön beavatkozásokat terveztünk: lecsökkentettük a nézőszámot és a zenekari árkot a nézőtérbe alulról is bekapcsoltuk – nyitható ajtókkal – a nyomótéren keresztül. A nézőtéri székek oldaljárásos átrendezése és a férőhelyszám csökkentése megoldotta a túlszűfoltosság problémáját, és a kedvezőbb zengés és térérzet mellett növelte a komfortot is. A gazdasági körülményekre is tekintettel a nézőszámot 1031-re lehetett lecsökkenteni.¹⁶

A nézőtérre is hatást gyakorló, de a zsöllyepáholyok hangzása szempontjából jelentős beavatkozás volt azok összenyitása az oldalfalak mentén egy nádfonatos, optikailag részben áttetsző ablakkal. Ez a zsöllyepáholyok – korábban kizárólag a mellvédnél tapasztalható és a nézőtérhez hasonló – hangélményét sokkal nagyobb területen tette elérhetővé. Így most még azokon az üléseken, sőt, azok mögött állva is nagy körbevettség élményt lehet tapasztalni, ahol a rálátás már csak részleges.

A zenekari árok

Az Opera repertoárja megnyitása óta a teljes operairodalmat felöleli, így jelentős mértékben változó zenekarméret elhelyezésére van szükség. Fontos, a korábbi korszerűsítésekhez hasonló követelmény volt a zenekari árok bővítése, azonban ezúttal nem a színpad, hanem a nézőtér irányába. A zenekar tömegközéppontja a színpadtól most kissé távolabb esik. A 2000-es évekre a zenekari árkot állíthatósága ellenére rögzített magasságban használták, ráadásul egy viszonylag kedvezőtlen, kompromisszumos magasságon, mi-



Fotó: Kivács László, ZDA

A zsölyge felülnézetből a középre rendezett székekkel



Fotó: Kivács László, ZDA

Harmadik emeleti karzati ülő- és állóhelyek, hangvisszaverő mellvédék

színű hangáteresztő szövet is helyet kapott, mely a kottavilágítás kiszűrődését akadályozza a nézőtéri első sorok felé. A nagyobb zenekari árokban a hangosság csökken, a zenekar többféle ültetése is kényelmesebben megvalósítható, és a mai kor követelményeihez igazodva az egy zenészre jutó alapterület is megemelkedik. Az árokban a méretezett falburkolatok a hangelnyelés, továbbá a mellvéd falában található ajtó felületébe rejtett diffúzor is segíti a zenei együttjátékot és a túlzott hangnyomás korlátozását, ami a zenészek hallásának védelme szempontjából kritikus.

Az előszínpad alatti rész mennyezetében lenyitható hangvisszaverő panelek kaptak helyet, melyeket az előadások kívánalmai szerint lehet beállítani, hogy a zenekar hangját az emeletek irányába közvetítse. A zenekari árok hát-fala egy olyan mozgatható fal, mely nyitható hangelnyelő kamrákkal is fel van szerelve. Abban az esetben, ha egy nagyobb zenekar hangosabb hangszereit az előszínpad alá kell ültetni, a hangelnyelés megnyitásával a hangnyomás korlátozható a zenészek számára, és arányosabb zenekari hangkép alakítható ki. A zenekari árok óhatatlanul egy kompromisszumokkal terhelt technikai térrész, melyben a színpadi zenéléshez képest kedvezőtlenebb körülményekre kell számítani. A testhangterjedés színpadi élménye érdekében a zenekari árok padlójára nagynyomású technológiával öregített faborítást javasoltunk, helyette azonban hagyományos padló valósult meg. Összességében azonban a korszerűsített zenekari árok rugalmas változtathatósága oly mértékű, hogy arra kevés hasonló példát találni más épületekben. Lényeges szempont a jövőre nézve, hogy a nyomóterben és a zenekari árokban létrehozott, változtatható akusztikai elemeket a megfelelő módon használják és üzemeltessék, és az akusztikai beállításoknál ne ragadjon be egy kedvezőtlen megoldás.

▶ közben az árok még szükségaktári funkcióit is ellátott. Azzal, hogy a zenekari árok közelebb került a nézőtérhez, egy zengőbb térbe került, a mennyezeti hangvetőhöz ideálisabb elrendezésben. A potenciális hangossága a közelség miatt ugyan megnőtt, de ezt jól lehet ellensúlyozni a nyomóter felé történő ajtók megnyitásával, ami a hangnyomás jelentékeny részét a nézők alá, majd onnan némi hangszínváltozás és szintesökkenés után felfelé közvetíti. A hegedűk hangját virtuálisan kiemeli az áttört mellvéd. A mellvédben egy fekete



Fotó: Kakas László, ZDA

A magasföldszinti páholyok közötti nádfonatos áttérés



A zenekari árok felé diffúzorfelület-kialakítású ajtó a nyomótér felől (2022. 02. 09.)

Összefoglalás

Az Opera auditóriumának teremakusztikai célú korszerűsítését hosszú és részletes felmérési és tervezési munka előzte meg. A beavatkozások szinte maradéktalanul megvalósultak. A zsöllye alatti nyomótér ugyan a tervezettnél némileg rövidebb utözengési idejű lett a tűzállósági követelmény miatt szükséges, nagyobb keresztmetszetű fa tartószerkezet építése következtében elvesztett térfogat miatt, de ennek kedvezőtlen hatása marginális, a többi beavatkozás ellensúlyozza. Jelentősen javult a nézőtér földszintjén a hangélmény a nézőszám csökkenése, a túlszűfoaltság megszűnése és a zenekari árokkal történő összekapcsolás miatt. A zenekari árok tömegközéppontjának nézőtér felé mozdítása is meghozta a tervezett eredményt. A korábban különálló és némileg csökkent akusztikai minőségű zsöllyepáholyok nagy területein pedig sikerült a nézőtérivel azonosan kiemelkedő térhangzást biztosítani. A harmadik emeleti állóhelyek hangvisszaverő felületei, a csökkentett drapériák, a fából készült „bádogfüggöny”, valamint a megnövelt előszínpad és színpadnyílás mind kedvező hatást fejtenek ki, javult a zenekar-énekes együjtjének lehetősége, és valamelyest állíthatóvá vált az akusztika, igazodni lehet a széles repertoárhoz.

A zenekar tagjai és az alkotó művészek rendkívüli meglepedéssel számoltak be a kedvezőbb akusztikai körülményekről. Nemzetközi kritikusok és a hazai sajtó is elragadtatva méltatja a hangzást. Plácido Domingo szerint „az akusztika is remek”,¹⁷ Anna Netrebko koncertkritikájában „tökéletes az akusztika”.¹⁸ Az eddigi eredmények alapján ezért bízom abban, hogy a mai kor legkorszerűbb mérési és tervezési módszerein és az Operában alkotó művészek érzeti tapasztalatain alapuló akusztikai beavatkozások kiállják majd az idők próbáját – és ha majd az Opera hagyományaihoz hűen, évtizedek múlva, az akkori elvárások szerint ismét finomítani kell a hangzást, gazdag mérési és tervanyag segíti majd az utókor akusztikusait.

Dr. Huszty Csaba

¹ Optika és akusztika, tekintettel az operaházra. Vasárnapi Újság, 31. évf. 39. szám, 1884. 09. 28. p. 626–627

² uo.

³ uo.

⁴ Pesti Hírlap, 6. évfolyam 268. szám, 1884. 09. 28. p. 3

⁵ Vasárnapi újság, 31. évf., 32. szám, 1884. 08. 10. p. 512

⁶ Pesti Hírlap, 1884. 08. 19. p. 4

⁷ Pesti Hírlap, 1884. 08. 20. p. 3

⁸ Medgyaszay István: A magyar királyi Operaház átalakítása. A Magyar Mérnök- és Építész-Egylet Közlönye, 46. évfolyam (1912), 45. szám, pp. 721–725

⁹ Az Operaház átalakítása. Építő Ipar, 43. sz. 1912. 10. 27. p. 425

¹⁰ A nézőtér befogadóképessége minden korszerűsítés során változott. 1884-ben valószínűleg 1273 – más források szerint 1203 – lehetett. 1912-ben ez megnőtt 1289-re, majd 1950-ben 1314-re, 1984-ben pedig lecsökkent 1285-re vagy 1289-re, majd 2022-ben 1031-re. Forrás: Örökségvédelmi bejelentési tervdokumentáció OP03-EP-OV-002-01-00. Zoboki Építésziroda, Branczik Márta közreműködésével, 2018.12.01. és DP03-EP-MV 450-00-00 Jegyterkép (Megvalósulási terv), 2022. 03. 10.

¹¹ Szépen „szól” az új Opera. Népszabadság, 1984. 08. 01. p. 4

¹² L. L. Beranek: Concert Halls and Opera Houses: Music, Acoustics, and Architecture (Second Edition), 2003. p. 335

¹³ Az Operaház átalakítása. Építő Ipar, 43. sz. 1912. 10. 27. p. 425

¹⁴ Lásd a 1779/2017. (XI. 7.), a 1264/2018. (VI. 11.), a 1320/2020. (VI. 12.) vagy a 1139/2022. (III. 10.) kormányhatározatokat.

¹⁵ Társszerzői Zoboki Gábor (ZDA), Kakas László (ZDA), Federico Cruz-Barney (Studio DAP), Silvester Csaba (ZDA), Molnár Máté (ZDA).

¹⁶ 328 db a földszinten, 234 db a páholyban, 321 db a karzaton és 33 db a zártszéken mint állandó ülőhely, valamint 64 állóhely; összesen 980, illetve opcionálisan további 17 db földszinti és 34 db páholy ülőhely, így összesen 1031 férőhely.

¹⁷ Zováthi Domokos: Plácido Domingo: „A magyar Operaház egy ékszer”. Képmás, 2022. 06. 04.

¹⁸ Sümegi Noémi: A világhírű szopránnak jól állt a felújított Operaház. Index, 2022. 09. 28.