

## MODERNÉ SPÔSOBY HODNOTENIA PRIESTOROV Z POHĽADU AKUSTIKY

**Anna Danihelová**

Katedra fyziky, elektrotechniky a aplikovanej mechaniky, TU vo Zvolene

**Abstrakt:** *Príspevok nesie v sebe dve roviny informácií. V jednej rovine hovorí ako atraktívniť akustiku a v druhej sa zaoberá možnosťou využitia nových, moderných metód akustiky pri riešení vybraných problémov priestorovej akustiky. Akustické hodnotenie priestorov sa uskutočňuje prostredníctvom simulácií v programe CATT-Acoustic a následne meraním pomocou programu DIRAC. Príspevok poukazuje na výhody, ktoré umožňujú simulácie.*

**Kľúčové slová:** priestorová akustika, CATT-Acoustic, DIRAC, dozvuk, zrozumiteľnosť

### Úvod

Človek je súčasťou prírody, tak ako aj drevo – materiál, ktorý je predmetom nášho skúmania. Drevo má mnohoraké použitie. Vyrábajú sa z neho predmety dennej potreby, ale je používané aj na výrobu hudobných nástrojov, ktoré produkujú krásne tóny. Práve hudobné nástroje sú predmetom výskumu na Pracovisku fyzikálnej a hudobnej akustiky už niekoľko rokov. Od hudobných nástrojov sa postupne dostávame aj do ďalšej oblasti akustiky, do priestorovej akustiky. Jej cieľom je zabezpečenie dobrej počuteľnosti a zrozumiteľnosti zvuku pre poslucháčov a vytvorenie bezchybných „pracovných podmienok“ pre hudobníkov, spevákov, hercov či rečníkov na javisku. Výhodiskom pre návrh priestoru sú kritéria priestorovej akustiky.

Nezáujem, resp. malý záujem o túto časť fyziky – akustiku súvisí pravdepodobne s pomerne obtiažnym matematickým aparátom, ktorý musí študent zvládnuť pri tejto časti fyziky ešte v základnom kurze. Ako prekonať tento problém a vzbudiť záujem študentov o akustiku? Tak ako nám to radí aj J. A. Komenský – „Škola hrou.“ Chce to však dve veci. Na jednej strane sadnúť si spolu so študentmi, ponúknuť im určité možnosti a načúvať ich názorom, resp. všímať si ich návrhy, čo by chceli riešiť. Na druhej strane, ako inak v ére počítačov, im ponúknuť vhodný softvér, ktorý za nich zvládne matematické úskalia. Softvér však vyžaduje od používateľa znalosť teoretických východísk, pretože len tak je možné nájsť optimálne riešenie zadaného problému. Študent postupne, ak ho riešenie problému zaujalo, snaží sa vniknúť do tajov akustiky takmer netušiac, že zvláda to, čo bolo na začiatku pre neho nezvládnuteľné. V rámci prvých krokov v oblasti priestorovej akustiky si naši študenti vytipovali niekoľko priestorov, v ktorých sme sa snažili uskutočniť akustické simulácie. Ako sa to podarilo v prípade dvoch otvorených priestorov – amfiteátra v Epidaure a nádvoría Zvolenského zámku je zrejmé z tohto príspevku.

### Kritériá priestorovej akustiky

Za zakladateľa modernej akustiky sa považuje Wallace Clement Sabine (1868 - 1919), ktorý ako prvý matematicky vyjadril závislosť času dozvuku od objemu a celkovej pohltivosti priestoru. V roku 1898 definoval čas dozvuku  $RT$  (s), dodnes považované za základné objektívne kritérium posudzovania priestorov z akustického hľadiska. Nemožno ho považovať za jediné kritérium, pretože dve sály s rovnakým priemerným časom dozvuku môžeme subjektívne vnímať ako priestory s rozdielnou „akustikou“. Z dozvukovej krivky sa postupne odvodilo niekoľko ďalších

monoaurálnych kritérií, ako sú napr. počiatkový čas dozvuku EDT (s), jasnosť C (dB), zreteľnosť D (%), sila zvuku G (dB). Pri hodnotení zrozumiteľnosti hovoreného slova sa používajú kritériá Speech Transmission Index (STI) a Rapid Speech Transmission Index (RASTI). Všetky spomenuté kritériá sú frekvenčne závislé a vyhodnocujú sa preto v oktávových pásmach.

V súčasnosti existuje niekoľko typov programov, pomocou ktorých možno vytvoriť počítačový model priestoru a získať predbežne akustické údaje o priestore. Moderné meracie i simulačné metódy využívajú viacero typov algoritmov, spomedzi ktorých je najrozšírenejšou lúčová metóda (ray - tracing) a jej varianty (napr. beam tracing). Najväčšou prednosťou využívania počítačového softvéru je možnosť získania informácií nad rámec globálneho času dozvuku. Simulácie umožňujú diagnostiku akustických porúch v uzavretom priestore, vizualizáciu šírenia zvuku v priestore (video so znázornením šírenia zvuku v priestore v reálnom čase – v pôdoryse, perspektíve i v rezoch priestorom). Študovať fyzikálne procesy, ktoré vplyvajú na ich akustickú kvalitu prostredníctvom simulácií je názorné, efektívne a veľmi zaujímavé.

### Akustika amfiteátra – Epidauros

Amfiteáter Epidauros sa nachádza na východe Peloponéz v južnom Grécku. Je to jeden z najznámejších a najzachovalejších starovekých amfiteátrov (Obr. 1). Amfiteáter bol vybudovaný koncom štvrtého a začiatkom tretieho storočia pred naším letopočtom. Polkruhový tvar hľadiska zaručuje, že žiadne z miest nie je príliš ďaleko od javiska. Priamy zvuk, čo je zvuk šíriaci sa priamou čiarou od úst herca k ušiam poslucháča (pre zrozumiteľnosť reči najdôležitejší), tak má na všetkých miestach dostatočnú hladinu. Dojem priestoru je vytváraný odrazmi zvuku od všetkých hraničných plôch (Vassilantonopoulos, Mourjopoulos, 2004). Pre zrozumiteľnosť reči sú najdôležitejšie odrazy zvuku od plôch, ktoré sú v blízkosti zdroja zvuku alebo poslucháča, kedy je dráhový rozdiel medzi priamym a odrazeným zvukom malý a odraz zosilňuje vnem priameho zvuku. Čelná scéna javiska antického divadla bola bohato zdobená a členená,



Obr. 1: Amfiteáter v Epidaure

teda poskytovala silné a difúzne odrazy zvuku. Zvuk sa k poslucháčom odrážal aj od ďalších, hlavne horizontálnych plôch javiska a jeho okolia. Dobré akustické vlastnosti antických amfiteátrov sú prirodzeným dôsledkom správne zvolených dimenzií a geometrie. Je to naozaj tak?

Je dôležité poznamenať, že medzi akustikou uzavretých priestorov so stropom a otvorenými amfiteátromi existuje zásadný rozdiel – v otvorených priestoroch existujú užitočné odrazy zvuku, každý zvukový „lúč“ však po niekoľkých odrazoch zanikne v hornej otvorenej ploche. Čas dozvuku je teda vždy extrémne krátky (Daníhelová, 2006).

Naším cieľom bolo prostredníctvom simulácií sledovať vplyv architektonických prvkov otvoreného priestoru a jeho zaplnenia divákmi na vybrané akustické charakteristiky: silu zvuku  $G$ , počiatkový čas dozvuku a dozvuk (EDT a T-30), zrozumiteľnosť STI. Simulácie v namodelovanom virtuálnom priestore sa uskutočnili v programe CATT-Acoustic (zapožičaný z STU Bratislava z Katedry konštrukcií pozemných stavieb). Aby simulácie čo najviac zodpovedali reálnym podmienkam je potrebné uskutočniť nasledovné kroky. *Prvý krok* – vytvorenie súborov, ktoré dávajú informácie o geometrii priestoru, pohltivosti použitých materiálov a ich rozptyle pri odraze zvukových lúčov. *Druhý krok* – zadanie informácie o rozložení zdrojov a prijímačov zvuku. *Tretí krok* – simulácia (audience area mapping). Dôležité je tiež nastavenie počtu lúčov, frekvencií a roviny, kde sa má výsledná grafická mapa zobrazíť. Nami sledované a porovnávané charakteristiky sila zvuku  $G$  (porovnanie sa uskutočnilo pri frekvencii 1 kHz), počiatkový čas dozvuku a dozvuk boli sledované vo frekvenčnom pásme (0 – 10 000) Hz. Pre modely bol nastavený šum pozadia na 10 % pre všetky frekvencie, teplota vzduchu 20 °C a relatívna vlhkosť vzduchu 50 %. Výsledky simulácií pre počiatkový čas dozvuku a dozvuk, teda porovnanie poklesu akustickej energie o 60 dB a o 30 dB sú uvedené v Tab. 1 a Tab. 2.

Tab 1: Počiatkový čas dozvuku a dozvuk v prázdnom Epidaure

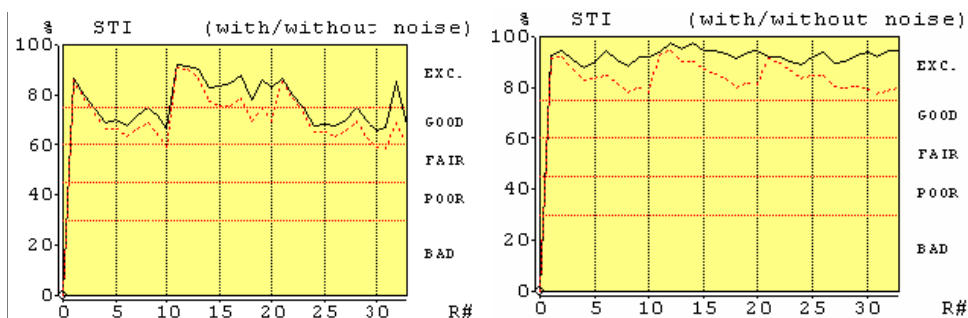
Frekvencia (Hz)	125	250	500	1 000	2 000	4 000	8 000	16 000
EDT (s)	0,88	0,88	0,83	0,87	0,91	0,78	0,6	0,07
T-30 (s)	1,7	1,45	1,65	1,74	1,43	1,24	0,61	0,34

Tab 2: Počiatkový čas dozvuku a dozvuk v Epidaure s divákmi

Frekvencia (Hz)	125	250	500	1 000	2 000	4 000	8 000	16 000
EDT (s)	0,34	0,18	0,2	0,12	0,18	0,16	0,08	0,03
T-30 (s)	0,66	0,66	0,64	0,59	0,52	0,67	0,35	0,23

Porovnaním EDT a T-30 je možné zistiť, akou rýchlosťou sa stráca akustická energia počas dozvuku. Ak je EDT rovnaké ako T-30, akustická energia sa stráca lineárne počas celej doby dozvuku. Ak sa od seba líšia, dozvuk je nelineárny. Doba dozvuku EDT pri zaplnenom hľadisku vychádza do 0,34 s. Táto hodnota je pomerne nízka, čiže sa v priestore amfiteátra nevytvára ozvena, čo je dôležitý predpoklad jasnosti zvukového vnemu predovšetkým pre hovorené slovo (Jedlínek, 2005). Hudba by v takomto priestore vyznela "suchým" dojmom.

Grafické znázornenie zrozumiteľnosti STI je na Obr. 2a, Obr. 2b. V grafe sú na x-ovej osi mikrofóny (R) v rôznych vzdialenostiach od zdroja zvuku a na y-ovej zrozumiteľnosť STI udávaná v percentách. K percentám je priradené slovné hodnotenie zrozumiteľnosti reči v piatich stupňoch: *EXCELLENT* – výborná, *GOOD* – dobrá, *FAIR* – uspokojivá, *POOR* – slabá a *BAD* – zlá zrozumiteľnosť.

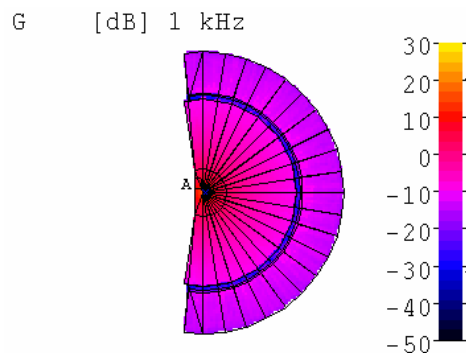


Obr. 2a: STI v prázdnom Epidaure

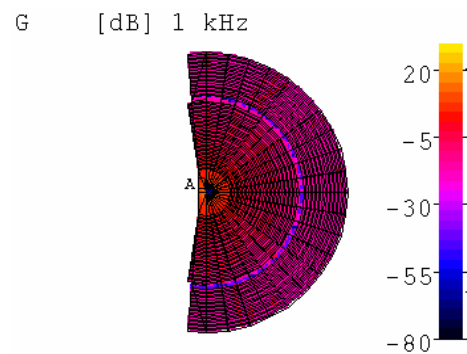
Obr. 2b: STI v Epidaure s divákmi

Difúznosť zvukového poľa v modeli so stupňovitým hľadiskom bez divákov znižuje kvalitu posluchu hovoreného slova (je však nad 60 %) a v modeli s divákmi je zrozumiteľnosť výborná, čo je ovplyvnené zvýšením pohltivosti (diváci).

Grafické znázornenie sily zvuku (hlasitosti) je na Obr. 3a, Obr. 3b. Zaujímavý je aj výsledok modelu, ktorý simuluje plne obsadený amfiteáter divákmi. Výsledky sú len málo odlišné od amfiteátra bez divákov a jeho hodnoty sa približujú hodnotám sily zvuku v otvorenom poli. Akustická energia v amfiteátri s divákmi by mala zanikať rýchlejšie, teda zrejme nebol správne zadáný parameter pre rozptyl a pohltivosť divákov.



Obr. 3a: Sila zvuku v prázdnom Epidaure



Obr. 3b: Sila zvuku v Epidaure s divákmi

Hodnotenie meraní akustických modelov amfiteátrův preukázalo vysokú úroveň akustických parametrov, čo sa prejavuje hlavne pri hovorenej reči. Akustické simulácie nám napomáhajú nájsť exaktné odpovede. Niektoré nejasnosti však zostávajú – často spomínané bronzové nádoby umiestnené na určitých miestach v hľadisku mali byť podľa niektorých výkladov rezonátormi zosilňujúcimi zvuk. Toto však nie je pre pomerne široké frekvenčné pásmo reči možné. Ide teda buď o omyl antických staviteľov alebo o nesprávny výklad ich funkcie.

### Akustika nádvorí Zvolenského zámku

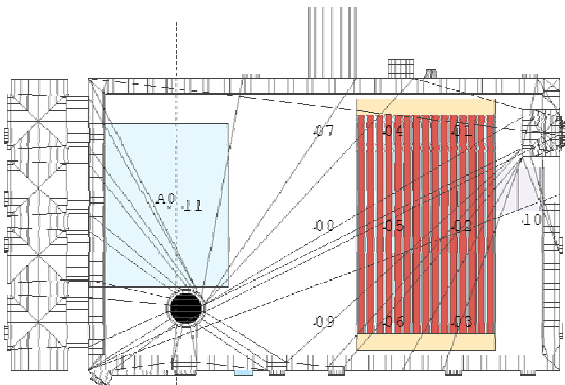
Zvolenský zámok bol postavený v gotickom slohu s renesančným opevnením (Obr. 4). Dal ho postaviť Ľudovít I. Veľký z Anjou koncom 14. storočia ako lovecké sídlo na obraz talianskych mestských kostolov.



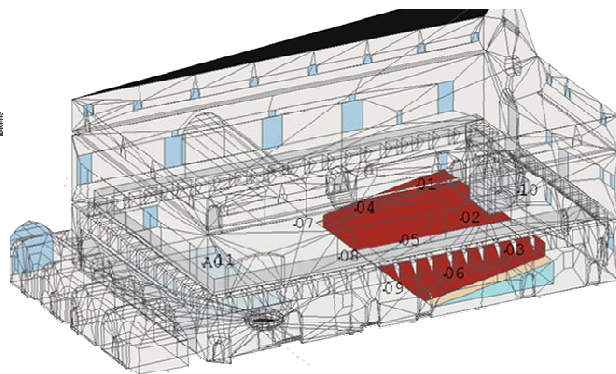
Obr. 4: Nádvorie Zvolenského zámku

Nádvorie Zvolenského zámku je miestom konania Zámockých hier Zvolenských, ktoré sú najstarším plenérovým profesionálnym divadelným festivalom na Slovensku. Cieľom bolo analyzovať akustiku nádvorí Zvolenského zámku za účelom

zdokonalenia akustickej kvality. Boli sledované akustické charakteristiky (sila zvuku G, index zrozumiteľnosti STI, počiatkový čas dozvuku a čas dozvuku) prostredníctvom akustických simulácií v programe CATT-Acoustic. Pre uskutočnenie akustických simulácií boli vytvorené 2 virtuálne modely nádvoria (prázdne hľadisko a úplne zaplnené divákmi) v programe AutoCAD a následne exportované do CATT-Acoustic. Nakoľko CATT-Acoustic pozná len uzatvorený priestor, nádvorie sa uzatvorilo plochou s pohltivosťou 99 % (pohltivosť otvoreného okna). Pre konštrukčné prvky a materiály nachádzajúce sa na nádvorí bola určená pohltivosť a rozptyl, bolo zadané umiestnenie zdroja a prijímačov (Obr. 5 a Obr. 6). Mikrofóny boli umiestnené od seba vo vzdialenosti 8 m a vo výške 2,5 m (Jedovnický, 2008).

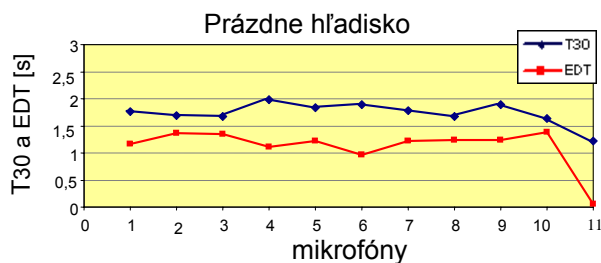


Obr. 5: Pôdorys – prázdne hľadisko

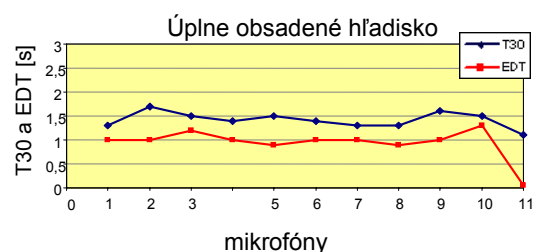


Obr. 6: 3D zobrazenie zaplneného hľadiska

Výsledky simulácií pre počiatkový čas dozvuku EDT a dozvuk sú zrejme z Obr. 7 a Obr. 8.



Obr. 7: EDT a T30 pre prázdne hľadisko



Obr. 8: EDT a T30 pre obsadené hľadisko

Z Obr. 7 a Obr. 8 je zrejme, že počiatkový čas dozvuku aj dozvuk poklesol v prípade úplne obsadeného hľadiska, čo spôsobili ďalšie pohltivé a difúzne plochy v priestore. V strede nádvoria sú rozdiely minimálne. Čím bližšie ku stenám, tým sú rozdiely väčšie. Toto mohli spôsobiť odrazy 2. a 3. rádu, ktoré je možné znížiť spresnením pohltivosti a rozptylu materiálov na nádvorí.

Zrozumiteľnosť reči STI je vyrovnaná v celom hľadisku, klesá so vzdialenosťou od zdroja a pohybuje sa na úrovni 60 %, čo je uspokojivá až dobrá zrozumiteľnosť. Zvýšením počtu pohltivých plôch (diváci) sa pri úplne obsadenom hľadisku zvýšila zrozumiteľnosť priemerne o 4 %.

Z výsledkov simulácií pre silu zvuku G vyplýva, že na silu zvuku v prvej tretine hľadiska nemá významný vplyv zaplnenie zvyšku hľadiska divákmi. V ďalšej časti hľadiska je však pokles v závislosti od vzdialenosti ako aj od zaplnenia divákmi výraznejší. V prázdnom hľadisku o 3 dB a v úplne obsadenom až o 6 dB. Zmeny po šírke hľadiska sú nevýznamné.



Výsledky simulácií aj v tomto prípade naznačujú, že čo sa týka hladiny akustického tlaku a sily zvuku, nie je otvorený priestor ideálny. Vďaka sklonu hľadiska sú diváci bližšie k zdroju zvuku a môžu zachytávať priamy zvuk, no väčšina zvukovej energie sa vyžiarí do priestoru. V tomto prípade by pomohlo čiastočne prekryť priestor nad javiskom vhodnou plochou.

### Záver

Všetky simulácie prebehli v programe CATT-Acoustic. Presnosť výsledkov však v rozhodujúcej miere závisí na presnosti zadaných vstupných parametrov ako sú napríklad geometrické rozmery, pohltivosti materiálov a konštrukčných prvkov, rozptyl povrchov, korektné zadanie vlastností zdrojov zvuku, vhodné rozmiestnenie prijímačov atď. Samozrejme je dôležité aj zvládnutie ovládania samotného programu. Výsledky simulácií naznačujú, že použitie akustickej predikcie umožní maximalizovať akustickú pohodu otvorených priestorov pomocou vhodne vybraných architektonických riešení. Pre overenie správnosti výsledkov simulácií a doladenie možností programu CATT-Acoustic budú výsledky simulácií porovnávané s výsledkami meraní v reálnom priestore pomocou meracej techniky a programu DIRAC (*Dual Input Room Acoustics Calculator*) používaného na meranie parametrov priestorovej akustiky.

### Podakovanie

Príspevok je publikovaný s podporou Grantovej agentúry MŠ SR, VEGA č. 1/0841/08 – „Charakteristiky dreva určujúce jeho kvalitu pri využití na výrobu špeciálnych výrobkov“.

### Literatúra

- [1] DANIHELOVÁ, Anna. 2006. *Moderné spôsoby hodnotenia akustických charakteristík uzatvorených a otvorených priestorov*. In: 72. AKUSTICKÝ SEMINÁŘ, Sezimovo Ústí. ČVUT v Praze, ČsAS 2006, s. 47 – 52. ISBN 80-01-03489-5
- [2] JEDOVNICKÝ, Martin. 2008. *Akustické charakteristiky otvorených priestorů – nádvoří Zvolenského zámku*. Diplomová práca. Zvolen: TU vo Zvolene, 2008. 73 s.
- [3] JELÍNEK, Michal. 2005. *Akustická charakteristika amfiteátrov*. Diplomová práca. Zvolen: TU vo Zvolene, 2005. 60 s.
- [4] JELÍNEK, Michal – RYCHTÁRIKOVÁ Monika. 2006. *Analýza akustických parametrov polootevoreného priestoru*. In: Proceedings International Symposium Material – Acoustics – Place, Zvolen: TU vo Zvolene, 2006, s 75 – 78. ISBN 80-228-1653-1
- [5] VASSILANTONOPOULOS, S. L. – MOURJOPOULOS, J. N. 2004. *Acoustic Simulation and Analysis of Ancient Open Theatres*. In: Proceedings of Acoustics 2004 (in Greek), The Hellenic Institute Thessalonica, 2004. Dostupné na: [HTTP://www.wcl.ee.upatras.gr/AudioGroup/AncientAcoustics/index.html](http://www.wcl.ee.upatras.gr/AudioGroup/AncientAcoustics/index.html)

### Adresa autora

doc. RNDr. Anna Danihelová, PhD.  
Katedra fyziky, elektrotechniky a aplikovanej mechaniky  
Technická univerzita vo Zvolene  
T.G. Masaryka 24, 960 53 Zvolen  
Email: adanihel@vsld.tuzvo.sk