



**SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
STAVEBNÁ FAKULTA**

Ing, Magdaléna Kaššáková

Autoreferát dizertačnej práce

**AKUSTICKÝ KOMFORT V ÁTRIÁCH ZASTREŠENÝCH
TRADIČNÝMI MATERIÁLMI A MODERNÝMI MEMBRÁNOVÝMI
KONŠTRUKCIAMI**

**na získanie akademického titulu
„philosophiae doctor“, v skratke „PhD.“**

v doktorandskom študijnom programe

Teória a konštrukcie pozemných stavieb

v študijnom odbore

35. Stavebníctvo

Forma štúdia

denná

Miesto a dátum

Bratislava 04.08.2025



Dizertačná práca bola vypracovaná na Katedre architektúry Stavebnej fakulty v Bratislave

Predkladateľ: **Ing. Magdaléna Kaššáková**
Katedra architektúry
Stavbená fakulta STU v Bratislave
Radlinského 11, 810 05 Bratislava

Školiteľ: **doc. Ing. Vojtech Chmelík, PhD.**
Katedra materiálového inžinierstva a fyziky
Stavbená fakulta STU v Bratislave
Radlinského 11, 810 05 Bratislava

Konzultant: **prof. Ing. Monika Rychtáriková, PhD.**
Fakulta architektúry, KU Leuven,
Hoogstraat 51, 9000 Gent / Paleizenstraat 65, 1030 Brusel

Ing. Andrea Vargová, PhD.
Katedra konštrukcií pozemných stavieb
Stavbená fakulta STU v Bratislave
Radlinského 11, 810 05 Bratislava111117

Autoreferát bol rozoslaný

.....
dátum rozoslania

Obhajoba dizertačnej práce sa bude konať dňa **o** **h**

V Bratislave

.....
presná adresa miesta konania obhajoby dizertačnej práce

.....
Prof. Ing. Stanislav Unčík, PhD.
Dekan Stavebnej fakulty, STU v Bratislave

ABSTRAKT

Rozvoj technológií a transparentných materiálov umožňuje vznik nových typologický druhov priestorov s veľkými objemami a širokými rozponmi, aké v minulosti neexistovali. Tieto verejné átriové priestory, často vyhotovené z tvrdých nepohlcujúcich materiálov, v kombinácii s vysokou obsadenosťou, generujú vysokú hladinu hluku a nadmerne dlhý dozvuk. Keďže akustické požiadavky sa v procese návrhu objemu átria zohľadňujú len výnimočne, vzniká potreba skúmať vzťahy medzi tvarom, materiálom a akustickým správaním. Pozornosť je venovaná aj ETFE membránam, ktoré – na rozdiel od skla – umožňujú únik zvuku do exteriéru a tým ovplyvňujú dozvukové podmienky. Kľúčovým aspektom je nielen výber materiálu, ale aj jeho strategické rozmiestnenie, keďže nadmerné pohlcovanie môže negatívne ovplyvniť zrozumiteľnosť reči.

Dizertačná práca sa zaoberá akustickým komfortom v átriách zastrešených transparentnými konštrukciami, ako sú sklenené strechy a membránové systémy z ETFE fólií. Cieľom práce je analyzovať a kvantifikovať vplyv tvaru, objemu, materiálového riešenia a rozloženia pohltivých plôch na vybrané akustické parametre (T_{30} , STI, G , C_{80}) v týchto netypických priestoroch. Na základe meraní a simulácií v softvéroch Odeon® a CATT-Acoustic sú vyhodnotené modely rôznych geometrických konfigurácií. Práca upozorňuje na dôležitosť akustickej kvality už vo fáze architektonického návrhu. Výsledky prispievajú k rozšíreniu poznatkov o akustike veľkých transparentne zastrešených priestorov a podporujú integráciu akustického komfortu do procesu navrhovania.

ABSTRACT

The development of technology and transparent materials enables new typologies of spaces with large volumes and wide spans that did not previously exist. These public atrium spaces, often made of acoustically hard, non-absorbing materials, combined with high occupancy, generate high noise levels and excessively long reverberation times. As acoustic requirements are rarely taken into account in the design process of the atrium volume, there is a need to investigate the relationships between form, material and acoustic behaviour. Attention is also paid to ETFE membranes, which, unlike glass, allow sound to escape to the exterior and thus influence reverberation conditions. The key aspect is not only the choice of material, but also its strategic distribution, as excessive absorption can negatively affect speech intelligibility.

The dissertation focuses on acoustic comfort in atria covered with transparent structures, such as glass roofs and membrane systems made of ETFE foil. The aim of the research is to analyse and quantify the influence of shape, volume, material configuration, and the distribution of sound-absorbing surfaces on selected acoustic parameters (T_{30} , STI, G , C_{80}) in these non-standard interior spaces. Based on measurements and simulations conducted using Odeon® and CATT-Acoustic software, various geometric configurations are evaluated. The study emphasises the importance of acoustic quality from the outset, during the architectural design phase. The results contribute to expanding knowledge on the acoustics of large, transparently covered spaces and support the integration of acoustic comfort into the architectural design process.

Obsah

ABSTRAKT	1
ÚVOD	3
1. CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE.....	5
2. METÓDY A METODIKA DIZERTAČNEJ PRÁCE.....	5
3. EXPERIMENTY	6
3.1. EXPERIMENT 1 - VPLYV OBJEMU A TVARU NA AKUSTICKÝ KOMFORT	6
3.1.1. Úvod.....	6
3.1.2. Konfigurácia	7
3.1.3. Metodológia	8
3.1.4. Výsledky	8
3.1.5. Diskusia	14
3.1.6. Záver	18
3.2. EXPERIMENT 2 - AKUSTICKÝ KOMFORT V REŠTAURÁCII I. PREDIKCIA HLUKU POZADIA V REŠTAURÁCII INTEGROVANEJ DO VEĽKÉHO NÁKUPNÉHO CENTRA.....	20
3.2.1. Úvod.....	20
3.2.2. Popis prípadovej situácie	20

3.2.3.	Výsledky a diskusia	21
3.2.4.	Záver	24
3.3.	EXPERIMENT 3 - VPLYV KOEFICIENTU ROZPTYLU NA ČAS DOZVUKU PRI SIMULÁCII ÁTRIÍ	24
3.3.1.	Popis prípadovej štúdie	24
3.3.2.	Merania	24
3.3.3.	Simulácie	25
3.3.4.	Záver	27
3.4.	EXPERIMENT 4 - VPLYV KOEFICIENTU ROZPTYLU ZVUKU NA SIMULOVANÉ PARAMETRE VO VEĽKÝCH MIESTNOSTIACH.....	28
3.4.1.	Úvod.....	28
3.4.2.	Prípadová štúdia.....	28
3.4.3.	Výsledky a diskusia	29
3.4.4.	Záver	33
4.	ZÁVER	33
4.1.	Hodnotenie cieľov	33
4.2.	Závery pre prax	34
4.3.	Závery pre vedu	35
5.	POUŽITÁ LITERATÚRA	36

ÚVOD

V minulosti neexistovali tak veľké zastrešené zhromažďovacie priestory ako ich poznáme dnes. Široké rozpony a zdokonaľujúca sa technológia transparentného zastrešenia dovoľujú zväčšovať rozmery a objemy átriových dvorán a tak v rámci priestorovej akustiky vzniká nová nepreskúmaná oblasť. Tieto zväčša verejné priestory môžu pojať veľké množstvo ľudí, ktorí svojou činnosťou (pohybom, rozhovormi, hrou na hudobné nástroje) v kombinácii s použitými odolnými nepohlcujúcimi materiálmi vytvárajú množstvo hluku a následného dlhého dozvuku spôsobujúceho kontinuálnu hladinu hluku pozadia.

V procese navrhovania budovy s átriovým riešením je bežnou praxou, že architekt v úvodných fázach zohľadňuje predovšetkým základné vstupné podmienky, ako sú špecifiká územia, regulatívy územného plánu, prevádzkové väzby, funkčná náplň či požiadavky investora. Až po ich splnení sa otvára priestor na formovanie architektonickej koncepcie a jemné doladenie proporcií, medzi ktoré patrí aj tvar a pomer strán átria. Z uvedeného dôvodu je v reálnej praxi nepravdepodobné, že by sa práve akustické parametre stali hlavným kritériom návrhu objemu átria. Napriek tomu má zmysel venovať sa výskumu týchto vzťahov. Znalosť základných akustických princípov totiž umožňuje architektovi lepšie predvídať správanie priestoru a robiť rozhodnutia, ktoré už v ranných štádiách návrhu podpora vytvorenie akusticky komfortného prostredia. Najbežnejšie používanou plochou na umiestnenie pohltivých materiálov je práve stropná konštrukcia, avšak v átriách je transparentná a na tento účel sa nemôže použiť. Alternatívou k zastrešeniu sklenou konštrukciou sú ETFE vankúše. Tieto ľahké, transparentné membránové konštrukcie sa vďaka svojej nízkej hmotnosti a vzduchovému pretlaku (cca 200-300 Pa) stali obľúbeným riešením pri zastrešovaní veľkorozponových priestorov. Z akustického hľadiska ide o zvukovo priepustné membrány, ktoré v nízkych a stredných frekvenciách znižujú odrazy tým, že umožňujú únik zvuku do exteriéru. Táto vlastnosť ich odlišuje od skla, ktoré zvuk odráža naprieč celým spektrom. Merania v realizovaných objektoch potvrdzujú, že ETFE vankúše môžu výrazne ovplyvniť akustické podmienky v interiéri, pričom účinok závisí od geometrie, počtu vrstiev aj spôsobu kotvenia systému (Sluyts, a iní, 2023).

Okrem zvukovo pohltivých vlastností použitého materiálu zohráva kľúčovú úlohu aj jeho množstvo a rozmiestnenie v rámci priestoru. Veľké množstvo pohltivých plôch síce skracaje dozvuk, avšak nadmerné pohlcovanie zvuku môže viesť k zníženiu zrozumiteľnosti reči. Používatelia takéto prostredie hodnotia rovnako negatívne ako priestory s príliš dlhým časom dozvuku (Rubino, a iní, 2023). Dôležité je teda nájsť rovnováhu medzi množstvom pohltivého materiálu a jeho strategickým rozmiestnením.

Predkladaná práca sa zameriava na najjednoduchšiu formu átriového priestoru - tzv. centrálné átrium. Jej cieľom je identifikovať vplyv (i) vybraných geometrických parametrov, (ii) zmeny materiálu zastrešenia, (iii) rozmiestnenia pohltivosti a (iv) použitia materiálov s rôznym koeficientom rozptylu na akustickú kvalitu týchto priestorov. Práca zároveň ponúka poznatky, ktoré môžu obohatiť proces architektonického navrhovania o kvalitatívny akustický rozmer.

1. CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE

Hlavným cieľom dizertačnej práce je analyzovať a vyhodnotiť vplyv stavebných a materiálových charakteristík átrií s transparentným zastrešením na akustické podmienky interiéru. Práca sa zameriava na koreláciu medzi geometrickými parametrami priestoru a štandardnými akustickými ukazovateľmi (T_{30} , STI , C_{80} , G).

1. Analyzovať vplyv **objemu** átria na štandardné akustické veličiny (T_{30} , STI , G , C_{80}).
2. Analyzovať vplyv **výšky** transparentného zastrešenia na štandardné akustické veličiny (T_{30} , STI , G , C_{80}).
3. Analyzovať vplyv typu transparentného **materiálu** zastrešenia (sklo vs. ETFE vankúše) na štandardné akustické veličiny (T_{30} , STI , G , C_{80}).
4. Skúmať vplyv **rozmiestnenia** pohltivých povrchov na výsledný akustický komfort v átriovom priestore.
5. Vyhodnotiť účinok **rozptylu zvuku** na akustický komfort v átriu.
6. Sumarizovať a interpretovať získané vedecké poznatky do architektonickej praxe s cieľom podporiť návrh akusticky kvalitných átriových priestorov.

2. METÓDY A METODIKA DIZERTAČNEJ PRÁCE

- Štúdium odbornej literatúry z oblasti akustického komfortu, fyziky transparentných materiálov a akustických štandardov pre interiérové priestory.
- Nadviazanie na výskum odbornej skupiny, ktorá sa zaoberá aplikovanou akustikou v architektúre, konzultácie a využitie prístupov overených v rámci skupiny.
- Parametrická analýza modelových konfigurácií so zmenami geometrických a materiálových vlastností.
- Vyhodnotenie výsledkov pomocou grafov s cieľom identifikovať vzťahy medzi parametrami

3. EXPERIMENTY

3.1. EXPERIMENT 1 - VPLYV OBJEMU A TVARU NA AKUSTICKÝ KOMFORT

3.1.1. Úvod

Tak, ako je architektúra rozmanitá, existuje aj široká škála foriem a priestorových usporiadaní átrií. V publikácii sklené átriá od autorky Vojtekovej (Vojteková E., 2016) sú átriá typologicky rozdelené na uzavreté átriá, átriá otvorené do bočných stien z jednej strany, átriá otvorené do bočnej strany (na celú výšku alebo len na časť výšky budovy), átriá otvorené z dvoch strán, átriá otvorené z troch strán, líniové átriá či tzv. klimatické haly. Komplexné pokrytie všetkých možných alternatív by si vyžadovalo rozsiahle množstvo simulačných modelov, ktoré by reflektovali rôzne pôdorysné, objemové, konštrukčné a materiálové riešenia. Okrem toho by bolo potrebné zohľadniť aj variabilitu interiérového vybavenia, ktoré významne ovplyvňuje celkovú zvukovú pohltivosť priestoru.

V tejto štúdií zameriavame na jeho najjednoduchšiu formu, centrálné átrium. Zaujíma nás, či vieme architektonickými rozhodnutiami ovplyvniť akustické prostredie a nežiadúci ustálený hluk pozadia vznikajúci v priestoroch s veľkými objemami. **Pýtame sa ako vplýva objem átria na čas dozvuku, zrozumiteľnosť reči, jasnosť a hladinu akustického tlaku.** Zásadný vplyv na čas dozvuku má objem, preto napríklad vzniká otázka, či pri rovnakom objeme, ale inej rozmerovej konfigurácii môžeme prispieť k zlepšeniu komfortu, alebo bude zlepšenie zapríčinené len zmenou pohltivosti, ktorá nastane pri zmene geometrie. **Pýtame sa ako vplýva tvar átria na čas dozvuku, zrozumiteľnosť reči, jasnosť a hladinu akustického tlaku.**

Množstvo pohltivých materiálov je možné v konečnom dôsledku upraviť – preto konkrétne riešenie je skôr inžinierskou ako vedeckou otázkou. V kontexte klimatickej krízy je dôležité namiesto nadmerného využívania komerčne vyrábaných zvukovo-pohltivých materiálov (ktoré sú často založené na báze plastu) hľadať pasívne architektonické riešenia na zlepšenie akustickej kvality priestoru. Preplnenie priestoru pohltivými materiálmi môže viesť k skráteniu dozvuku, no zároveň k zhoršeniu zrozumiteľnosti reči. Používatelia takéto prostredie hodnotia rovnako negatívne ako priestory s príliš dlhým časom dozvuku (Rubino, a iní, 2023).

Membránové ETFE konštrukcie majú vyššiu zvukovú pohltivosť ako sklo, ktoré odráža o 35 % viac energie späť do priestoru. Ich zvuková izolácia je však nižšia, čo môže zvýšiť hluk pozadia v prípade, že je átrium umiestnené v hlučnom prostredí (Urbán, a iní, 2017). Rozdiely vo veľkosti, tlaku vzduchu, viacvrstvovej štruktúre, tvare a podmienkach upnutia ETFE vankúšov spôsobujú, že stále nie je presne určená pohltivosť všetkých typov ETFE vankúšov (Sluyts, a iní, 2023) preto sú v štúdiu používané všeobecne známe hodnoty pohltivosti. Vzniká otázka, **či materiál z ktorého je transparentná strecha skonštruovaná má vždy signifikantný vplyv na akustické podmienky v priestore.**

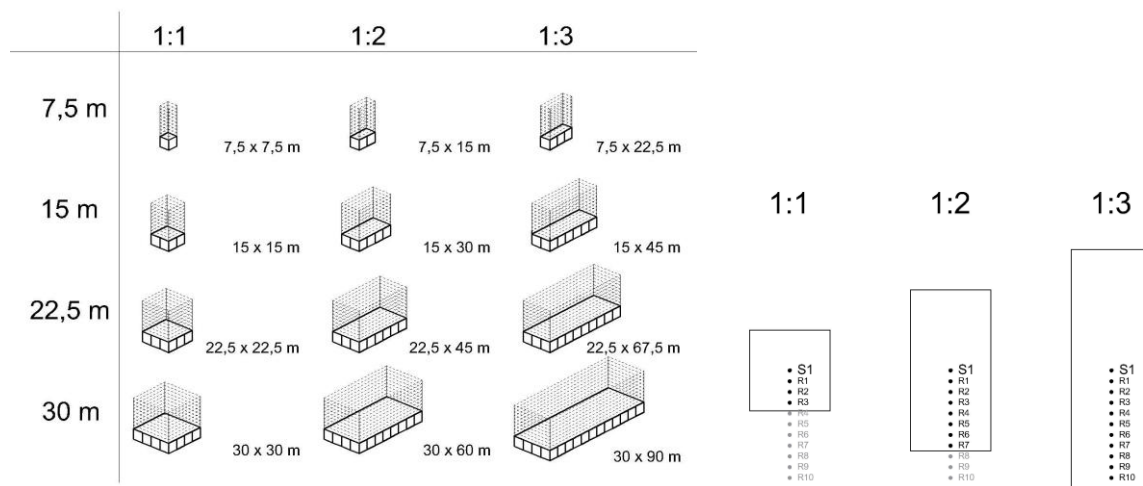
Slovenská norma (STN 73 0527) pre posudzovanie priestorovej akustiky zohľadňuje čas dozvuku T (s) pre priestory definované ako haly len do objemu priestoru 20 000 m³. Taktiež odporúča hodnoty STI pre priestory určené na hovorené slovo vyššie ako 0,75 a maximálne prípustné hodnoty hluku pozadia $L_{A,eq}$ (60 dB pre telocvične, športové haly a plavárne). **Je čas dozvuku jediný dostačujúci parameter na posúdenie (akustickej kvality) zrozumiteľnosti reči?** Ak navrhujeme veľký priestor, stačí nám poznať čas dozvuku tohto priestoru na to aby sme vedeli posúdiť či vyhovuje ?

Zmena výšky strechy má na výsledky vplyv nielen preto, že sa mení absolútna vzdialenosť zdroja zvuku-prijímača od strechy, ale aj preto, že s narastajúcou výškou rastie množstvo plôch, ktoré môžu pohlcovať resp. odrážať zvuk. Kde pri pomere strán átria 1:1 a najnižšej streche 7,5 m je to pomer strechy k plochám átria 16,7%, pri výške strechy 30 metrov je pomer 5,6 %. Pri pôdorysnom pomere strán átria 1:3 a najnižšej výške strechy 7,5 m je strecha 7,9% z celého povrchu kvádra, pri výške 30 m to je 21,4 %. Môžem usúdiť že, najväčšiu plochu vzhľadom k pomeru strecha-steny má priestor s pomerom strán 1:1, zatiaľ čo priestor s pomerom 1:3 najviac stien. Preto pri dlhých átriách máme v strešnej rovine menej plochy využiteľnej na umiestnenie pohltivého materiálu. Pri dlhých úzkych priestoroch s malým množstvom pohltivých plôch môže dôjsť k trepotavým odrazom, preto je vhodné umiestniť pohltivosť aspoň na jednu zo strán (Rychtáriková, a iní, 2019).

3.1.2. Konfigurácia

Vzhľadom na tvarovú, objemovú a materiálovú rôznorodosť átrií zjednodušené simulačné modely umožňujú porovnávanie pri kontrolovaných podmienkach. Z tohto dôvodu pristupujeme k zovšeobecneniu, pričom ako reprezentanta volíme štvorboký hranol (kocku, resp. kváder). Modulový rozsah (Obrázok 3.1: Matrica vybraných rozmerov átrií a pôdorysné zobrazenie konfigurácie zdrojov (S) a mikrofónov) vychádza zo základného rozmeru 7,5 m, ktorý zodpovedá minimálnej využiteľnosti priestoru a bežnému statickému

modulu. Varianty sú násobkami tohto rozmeru, čím umožňujú porovnanie narastajúceho objemu a pôdorysných pomerov (1:1, 1:2, 1:3). Výška objektu zodpovedá dvojnásobku základného rozmeru a narastá v krokoch po 2,5 m, aby bolo možné sledovať zmeny akustických parametrov T_{30} , STI, G a C_{80} v závislosti od výšky a typu zastrešenia.



Obrázok 3.1: Matrica vybraných rozmerov átrií a pôdorysné zobrazenie konfigurácie zdrojov (S) a mikrofónov

3.1.3. Metodológia

Výskum využíva numerické simulácie na posúdenie vplyvu geometrických a materiálových rozdielov v centrálne orientovanom átriu so štvorcovým a obdĺžnikovým pôdorysom. Tabuľka 3.1: Koeficienty pohltivosti materiálov použitých v simuláciách uvádza koeficienty pohltivosti materiálov. Modely zohľadňujú intenzívnu cirkuláciu používateľov – povrchy sú navrhnuté ako odolné a málo pohltivé, steny sú opatrené omietkou.

Tabuľka 3.1: Koeficienty pohltivosti materiálov použitých v simuláciách

		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1k Hz	2k Hz	4k Hz	8k Hz
strecha	ETFE	0,42	0,35	0,26	0,17	0,08	0,02	0,02
	SKLO	0,15	0,05	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02
steny	Omietka	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
podlaha	Mramor	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08

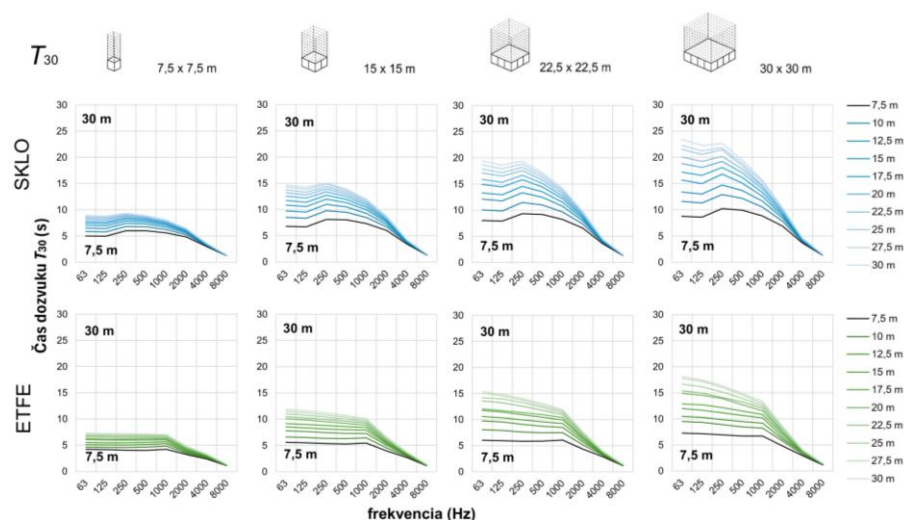
3.1.4. Výsledky

3.1.4.1. Čas dozvuku T_{30} (s)

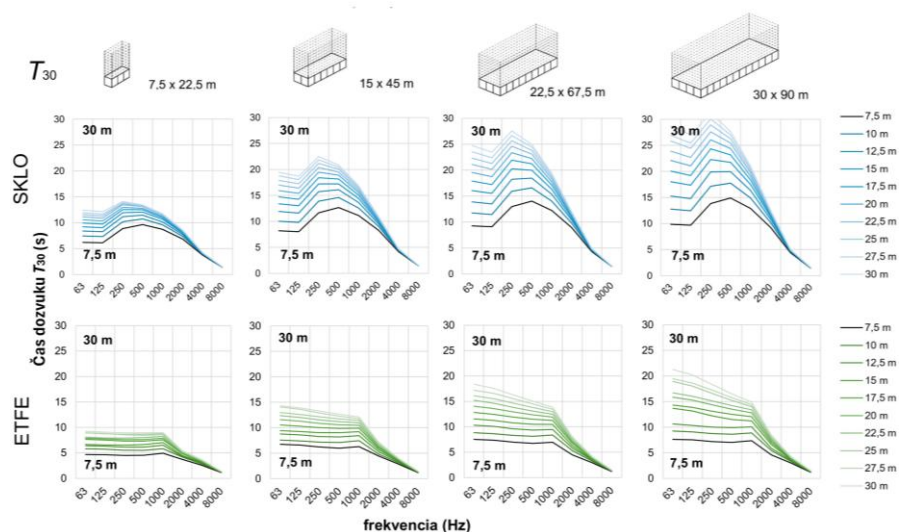
Výsledky z jednotlivých variantov átrií zobrazujúcich hodnoty času dozvuku sú zobrazené na obrázok 3.2 (pomer pôdorysných rozmerov 1:1) a obrázku 3.3 (pomer pôdorysných

rozmerov 1:3). Z výsledkov môžeme vidieť, že s rastúcim objemom átria dochádza k predĺženiu času dozvuku, čo platí pre oba skúmané materiály. Tento efekt je najvýraznejší pri nízkych a stredných frekvenciách, keďže oba materiály vykazujú vyššiu zvukovú pohltivosť pri vyšších frekvenciách. Navyiac, vyššie frekvencie sú vo väčšej miere pohlcované vzduchom. Pri zoradení átrií podľa stúpajúceho objemu, je jasný lineárny trend nárastu času dozvuku.

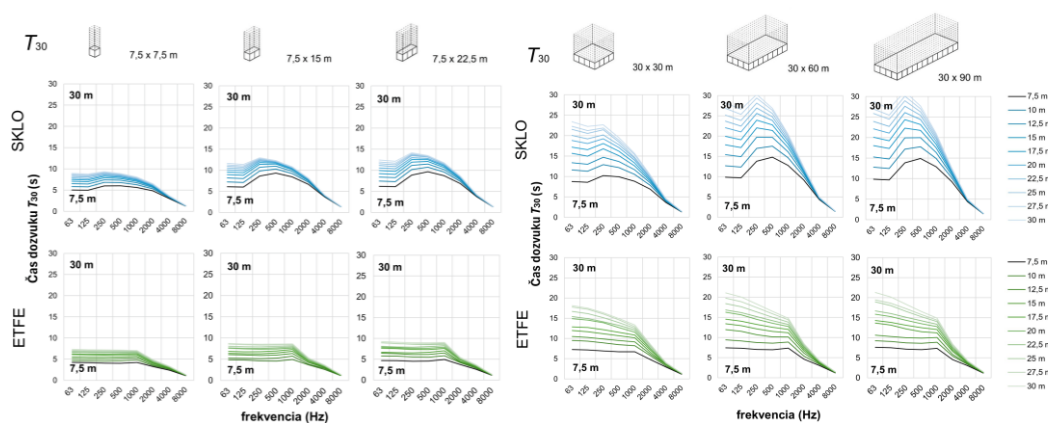
Z grafu (Obrázok 3.2) je viditeľné, že nárast času dozvuku medzi jednotlivými variantami je so zvyšujúcou sa výškou priestoru, a tak aj narastajúcim objemom v prípade ETFE, rovnomerný. Na druhej strane v prípade skla sa pri vyšších výškach nárast času dozvuku medzi jednotlivými variantami spomaľuje - rozdiely postupne klesajú. Nárastom objemu sa krivky pre sklo deformujú a rastú najmä v stredných frekvenciách, čo je možné výraznejšie pozorovať pri pomeroch strán priestoru 1:3 v porovnaní s pomerom 1:1. Pri pomere strán 1:1 je pri narastajúcej výške átria nárast hodnôt výraznejší pri nízkych frekvenciách, čo platí aj pre ETFE aj sklo.



Obrázok 3.2: Čas dozvuku T_{30} ako funkcia vzdialenosti zdroju a prijímača pre pôdorysný pomer strán 1:1



Obrázok 3.3: Čas dozvuku T_{30} ako funkcia vzdialenosti zdroja a prijímača pre pôdorysný pomer strán 1:3



Obrázok 3.4: Čas dozvuku T_{30} ako funkcia vzdialenosti zdroja a prijímača pre rôzne pomery najmenších simulovaných átrií s jednou stranou dĺžou 7,5 m a 30 metrov

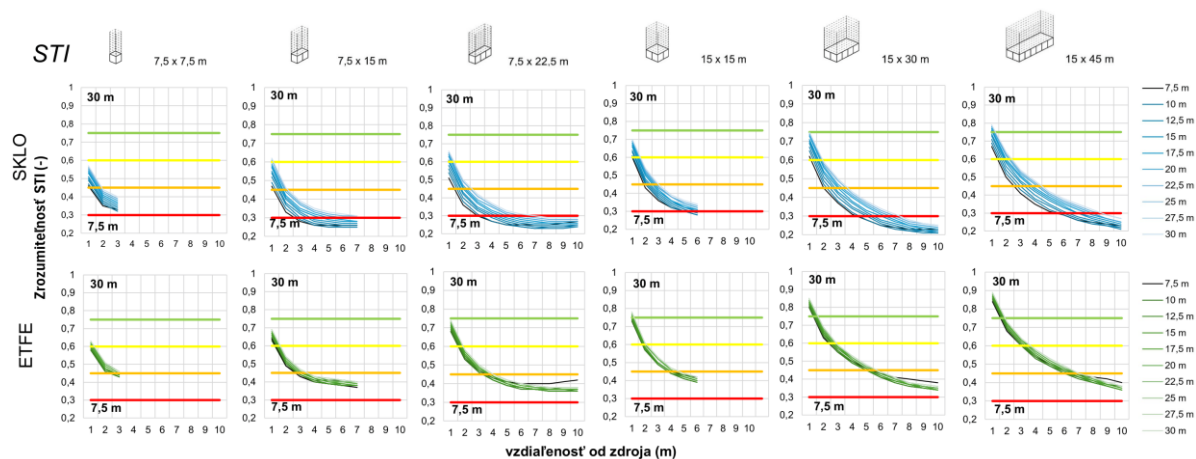
Na Obrázok 3.4 pri átriách s najmenšími rozmermi môžeme vidieť, že narastajúci pomer strán sa prejavuje na hodnotách času dozvuku pri presklenej streche najmä v stredných frekvenciách. Pri ETFE je priebeh času dozvuku pri nízkych a stredných frekvenciách konštantný a klesá až pri vysokých frekvenciách. Nie je tu však viditeľný vplyv zmeny pomeru strán. Pri zmene pomeru narastá okrem objemu aj plocha strechy, a tak aj plocha dvoch porovnávaných materiálov, ktoré majú v stredných frekvenciách rozdielnu zvukovú pohltivosť, čo sa prejavuje ako nárast hodnôt v stredných frekvenciách pre všetky výšky átria s preskleným zastrešením.

Pri najväčších átriách je opäť viditeľné, že pri pomere strán nastáva nárast času dozvuku na frekvenciách 250 - 2000 Hz výraznejšie pri pomere strán 1:3. Je zjavné, že rozdiely medzi výsledkami dvoch najväčších átrií (Obrázok 3.4) pri pomere strán 1:2 (30 x 60 m, $V = 13\,500$

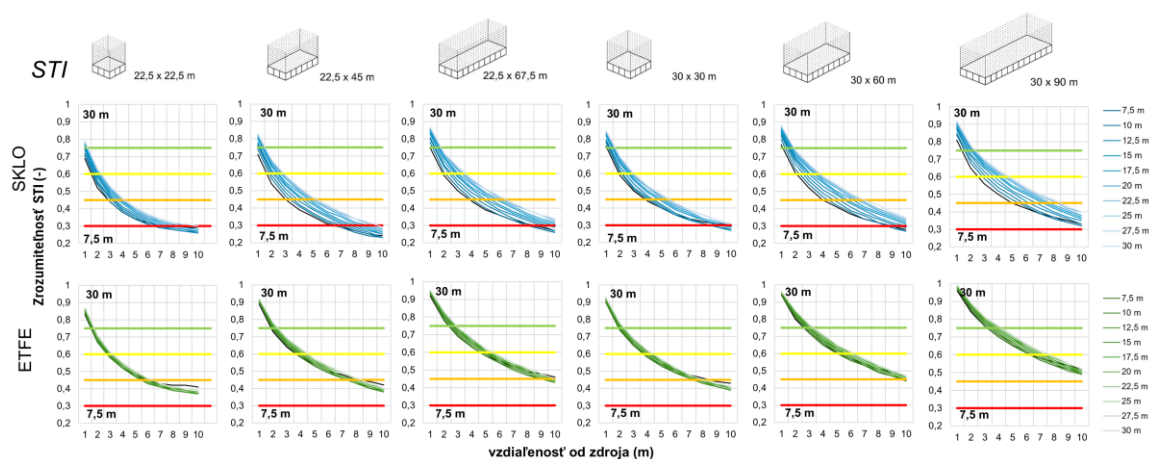
m^3 pre 7,5 m strechu) a 1:3 (30 x 90 m, $V=20\,250\,\text{m}^3$ pre 7,5 m strechu) sú minimálne a výsledky sú takmer identické, či pre sklo alebo ETFE.

3.1.4.2. STI

Obrázky 3.5 a 3.6 znázorňujú závislosť indexu zrozumiteľnosti reči (STI) od vzdialenosti medzi zdrojom a prijímačom. Pokles STI so vzdialenosťou sa prejavuje pri všetkých objemoch. Najmenšie átria (napr. 7,5 x 7,5 m) nedosahujú výbornú zrozumiteľnosť ani pri vyššej streche či použití ETFE. ETFE dosahuje $\text{STI} > 0,75$ už pri rozmere 15 x 30 m, sklo až pri väčších ako 22,5 m. Najväčšie átrium (30 x 90 m) so sklenenou strechou má výbornú zrozumiteľnosť do 1,5 m (pri výške 30 m) a do 2,5 m (pri výške 7,5 m). ETFE strecha pri tom istom átriu dosahuje výborné hodnoty do 3–4,5 m. Átriá nad 30 m s ETFE strechou dosahujú $\text{STI} > 0,9$, podobne ako vo voľnom poli. Modré krivky (sklo) vykazujú väčší rozptyl než zelené (ETFE). Výška strechy ovplyvňuje STI výraznejšie pri materiáloch s nízkou pohltivosťou. Rozptyl STI hodnôt medzi najnižším a najvyšším átriom je pri ETFE max. 3 %, pri skle 10 %. Menší rozptyl vykazujú štvorcové pôdorysy oproti podlhovastým (1:2, 1:3). Väčšie átriá majú strmšie priebehy kriviek, čo znamená väčší pokles STI so vzdialenosťou. Vyššie átriá všeobecne dosahujú lepšiu zrozumiteľnosť. Pri najmenších átriách STI klesá pod 0,45 už do 2 m, zatiaľ čo pri najväčšom átriu so sklenenou strechou až medzi 5–8,5 m; pri ETFE neklesá pod 0,45 ani pri 10 m.



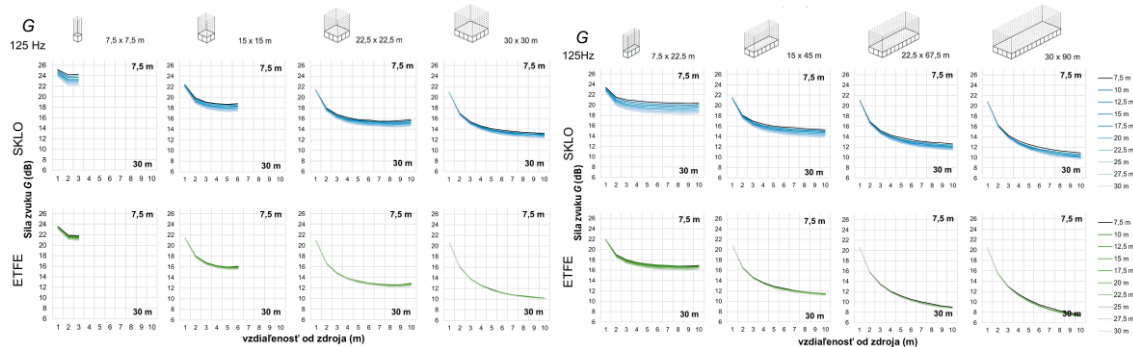
Obrázok 3.5: STI ako funkcia vzdialenosti zdroja a prijímača pre najmenšie átria



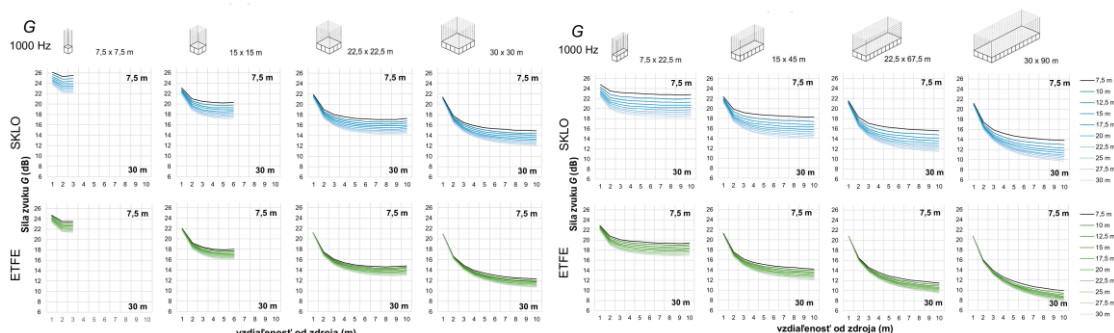
Obrázok 3.6: STI ako funkcia vzdialenosti zdroja a prijímača pre najväčšie átria

3.1.4.3. Sila zvuku G (dB)

Veličina G (dB) vyjadruje, ako odrazy zvuku ovplyvňujú celkovú hladinu zvuku v porovnaní s voľným poľom. Jej hodnoty závisia od tvaru, veľkosti, geometrie a materiálov miestnosti. Ako referenčné spektrá boli zvolené pásma 125 Hz (najväčší rozdiel v pohltivosti skla a ETFE) a 1000 Hz (v strede pásma dôležitého pre zrozumiteľnosť reči). Grafy znázorňujú pokles hladiny akustického tlaku so vzdialenosťou od zdroja. Pri porovnaní hodnôt G pri 125 Hz a 1000 Hz je zjavný väčší rozptyl kriviek pri vyššej frekvencii. Pri 125 Hz výška átria neovplyvňuje hodnoty G výrazne – napr. v najmenšom presklenom átrii ($7,5 \times 7,5$ m) je rozdiel medzi najnižšou a najvyššou strechou 1,1 dB (1 m od zdroja), pri najväčšom (30×90 m) je rozdiel 1 dB až vo vzdialenosti 5 m, a 1,5 dB pri 10 m. Pri ETFE sa krivky prekrývajú a rozdiely medzi výškami pri všetkých rozmeroch nepresahujú 1 dB. Pre 1000 Hz je vplyv výšky výraznejší. V najmenších presklených átriách (pomer strán 1:1 a 1:3) je rozdiel medzi najnižšou a najvyššou strechou cca 2 dB už vo vzdialenosti 1 m, pri ETFE je to 1 dB. Vo vzdialenosti 10 m pri zasklených átriách s pomerom 1:3 dosahuje rozdiel až 4 dB, pri ETFE 2 dB. Pre frekvenciu 1000 Hz má teda výška átria významný vplyv na hodnoty G. Pri zoradení grafov G (125 Hz) podľa rastúceho objemu je vo všetkých variantoch viditeľný pokles hladiny akustického tlaku so vzdialenosťou. V átriách s menšími rozmermi (a menšími vzdialenosťami medzi stenami) sú hladiny vyššie. Napr. rozdiel medzi najmenším a najväčším átriom s pomerom 1:3 je vo vzdialenosti 3 m približne 6 dB pre oba typy zastrešenia. Najväčšie átrium s ETFE strechou má najstrmší spád – prvé 4 metre od zdroja pokles až o 9 dB, čo súvisí s väčšou vzdialenosťou stien a slabšími odrazmi. Pri 1000 Hz je tento vplyv menej výrazný, no stále pozorovateľný (Obrázok 3.8).



Obrázok 3.7: G (dB) Sila zvuku pre 125 Hz v závislosti od vzdialenosti zdroja a prijímača pre pôdorys s pomerom strán 1:1 a 1:3



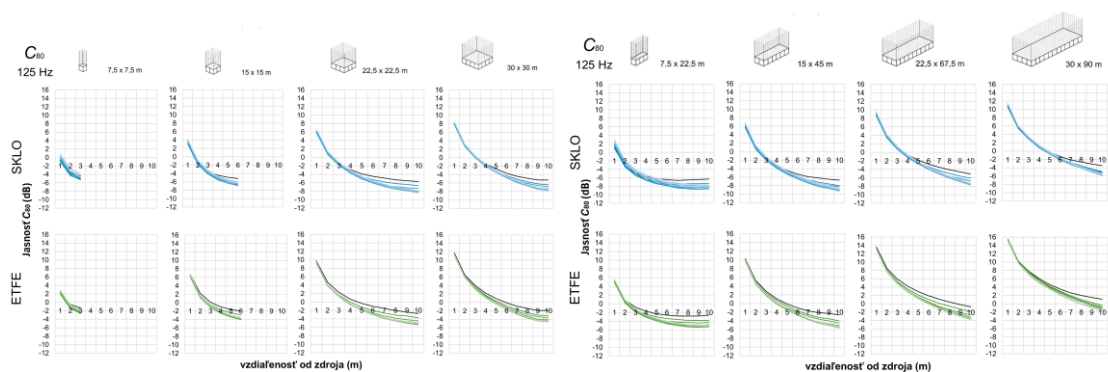
Obrázok 3.8: G (dB) Sila zvuku pre 1000 Hz v závislosti od vzdialenosti zdroja a prijímača pre pôdorys s pomerom strán 1:1 a 1:3

3.1.4.4. Jasnosť C_{80} (dB)

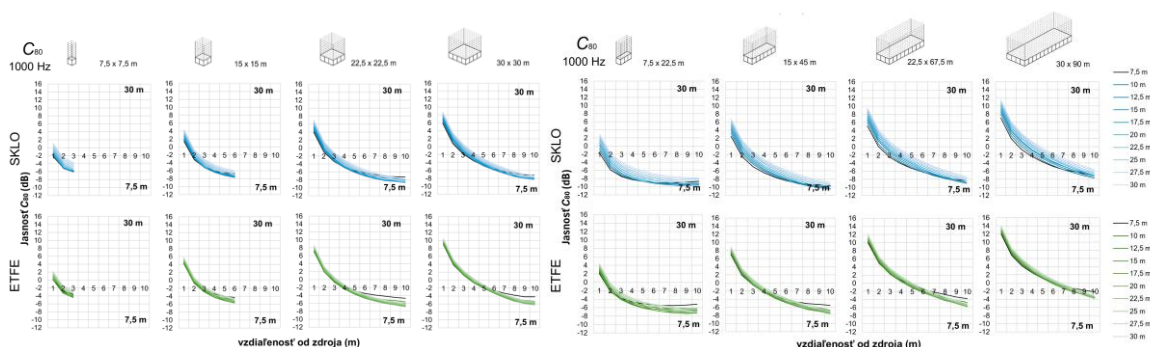
Vo všeobecnosti platí, že čím je átrium menšie, tým je krivka poklesu menej strmá, čo je spôsobené spomínanými odrazmi od blízkych stien. Ale v absolútnych hodnotách dosahujú malé átria horšie výsledky jasnosti a pomer medzi skorými a neskorými odrazmi klesá pod hodnotu 0 dB bližšie od zdroja hluku.

Pri pohľade na grafy poklesu Jasnosti zvuku so vzdialenosťou od zdroja pre frekvenciu 1000 Hz (Obrázok 3.9a Obrázok 3.10) je zrejmé, že pri presklených zastrešeniach má výška átriá malý vplyv na výsledné hodnoty. Krivky sa nerozptyľujú so stúpajúcou vzdialenosťou, ale sú užšie na začiatku a na konci. Tento trend je viditeľný najmä pri pomere pôdorysných strán 1:3. Rovnako ako v prípade nízkych frekvencií platí vo všeobecnosti, že átria s nižšími výškami strechy dosahujú lepšiu jasnosť zvuku. Taktiež väčšie átriá dosahujú lepšiu jasnosť ako menšie. Napríklad pri štvorcovom presklenenom átriu 15x15 m a strechou vysokou 30 m je pokles medzi vzdialenosťami 1 m a 6 m z 4,4 dB na -6 dB (rozdiel 10,4 dB). Pri ETFE streche je pokles z 5,8 dB na -4,5 dB (rozdiel 10,3 dB). Pri dvojnásobne väčšom átriu 30 x 30 m so strechou vysokou 30 m je pri skle pokles z 8,8 dB na -4,3 dB (rozdiel 13,1 dB) pri

ETFE zastrešenie je pokles z 10,5 dB na -2,5 dB (rozdiel 13 dB). Uvedený príklad ilustruje, že pri porovnávaní materiálov vidíme medzi ETFE a sklom rozdiel do 2 dB. Pri porovnaní objemov je rozdiel medzi väčším a menším átriom 3 dB. V menšom átriu klesá hodnota C_{80} pod 0 dB (tzn. väčší podiel neskorších odrazov) cca 1,5 m od zdroja, v átriu 30 x 30 m to je 3,5 m od zdroja.



Obrázok 3.9: C_{80} (dB) Jasnosť pre 125 Hz v závislosti od vzdialenosti zdroja a prijímača pre pôdorysy s pomerom strán 1:1 a 1:3



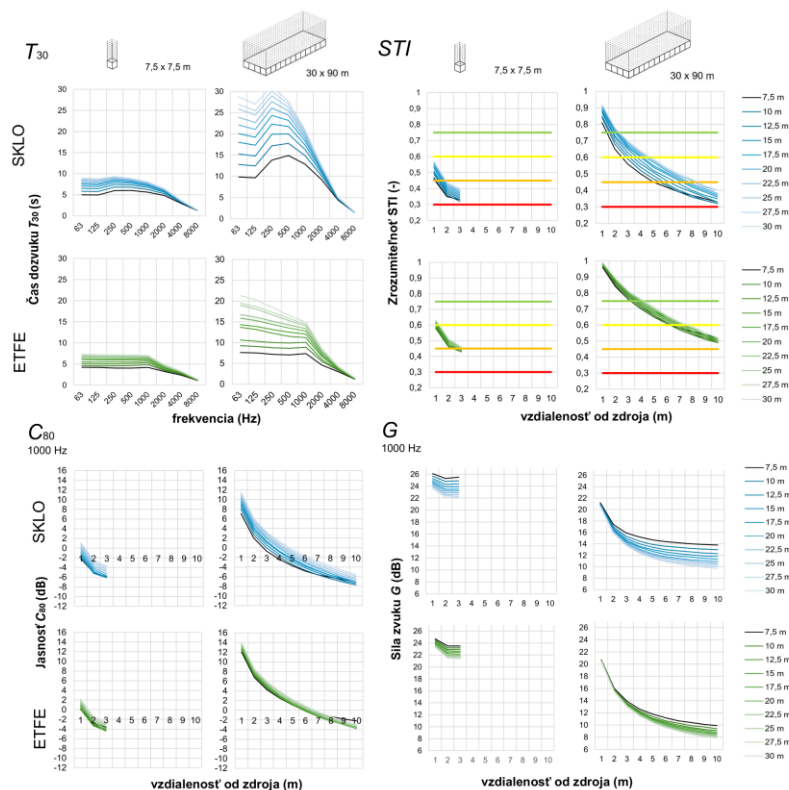
Obrázok 3.10: C_{80} (dB) Jasnosť pre 1000 Hz v závislosti od vzdialenosti zdroja a prijímača pre pôdorysy s pomerom strán 1:1 a 1:3

3.1.5. Diskusia

3.1.5.1. T_{30} verzus STI

Ako sme naznačili v úvode, y akustického hľadiska nepovažujeme za postačujúce hodnotenie priestorov výlučne na základe času dozvuku. Na obrázku 3.11 môžeme pozorovať, že najväčšie simulované átrium (30 x 90 m) dosahuje veľmi vysoké hodnoty času dozvuku, teda by sme mohli očakávať zlý akustický komfort v zmysle zrozumiteľnosti reči, ale nedeje sa tak a **menšie átrium má výrazne horšiu zrozumiteľnosť reči, napriek kratším časom dozvuku**. Dôvodom je nutnosť neskorých odrazov prekonať veľkú vzdialenosť v prípade veľkého átria, čo má za následok, že odrazy prichádzajú do posudzovaného bodu s výrazne nižšou hladinou v porovnaní s menším átriom. V prípade

najvyššej sklenej strechy (30 m) má malé átrium zrozumiteľnosť pod 0,6 vo vzdialenosti 1 m od zdroja, zatiaľ čo veľké átrium dosahuje rovnaké hodnoty ešte vo vzdialenosti 5,5 m od zdroja. Pre ETFE vankúše klesnú hodnoty STI pod 0,6 vo veľkom átriu pri vzdialenosti 7,5 m od zdroja.



Obrázok 3.11: Porovnanie T_{30} a STI pre najmenšie a najväčšie simulované átriá

3.1.5.2. Rovnaký objem, iný tvar

V nasledujúcej analýze sa zameriame na porovnanie akustických veličín pre dve skupiny po štyri átriá s rovnakým objemom: skupina 1 – 5062,5 m³ (obrázok 3.11) a skupina 2 – 10 125 m³ (Obrázok 3.13), ale s rôznymi rozmermi, ktoré sa prirodzene odrážajú v rozdielnej celkovej priemernej pohltivosti priestoru. Keďže definícia času dozvuku priamo súvisí s celkovou zvukovou pohltivosťou priestoru, zaujíma nás, či aj ostatné akustické veličiny vykazujú koreláciu – teda či nižšie hodnoty času dozvuku znamenajú vyššie hodnoty jasnosti zvuku, nižšie hodnoty hladiny akustického tlaku a lepšiu zrozumiteľnosť – alebo sa ukazuje, že geometria priestoru má výraznejší dopad, než sa pôvodne predpokladalo.

5.1.1. Objem 5062,5 m³

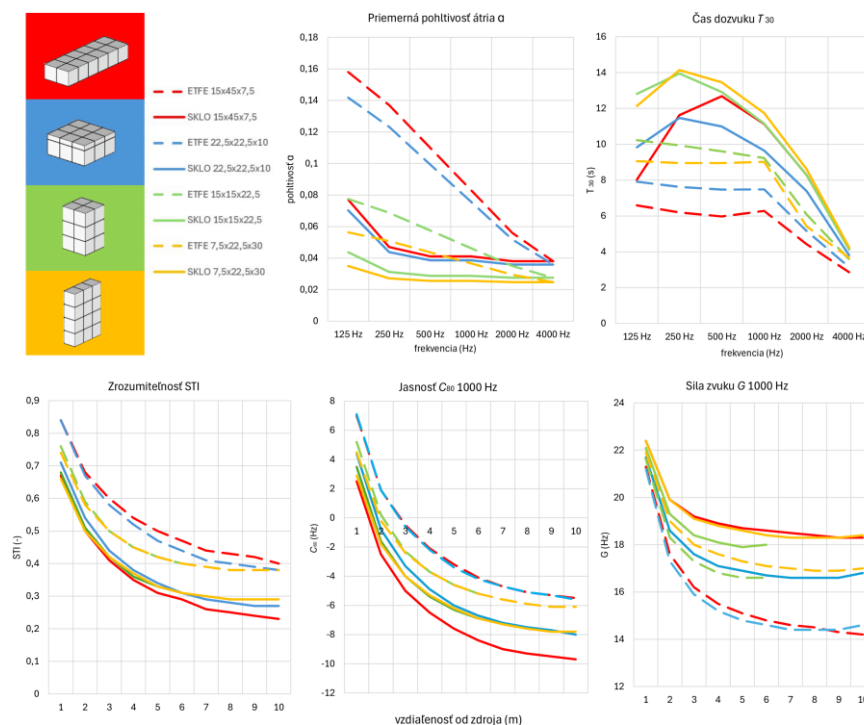
Aj keď dve nižšie átriá s ETFE (červená a modrá čiarkovaná) vykazujú dvojnásobnú pohltivosť v nízkych frekvenciách (vďaka väčšej ploche strechy) oproti vyšším átriám

(zelená a žltá čiarkovaná), v T_{30} sa to neodráža – rozdiely sú rovnomerne rozložené a nižšie átriá dosahujú len mierne vyšší čas dozvuku. Potvrďuje to aj najvyššie átrium (žltá), ktoré má napriek najnižšej pohltivosti z ETFE átrií nižší čas dozvuku než nižšie átrium s pomerom 1:1 (zelená). Z grafov vyplýva, že pri nízkej streche a vzdialenejších stenách je hladina akustického tlaku najnižšia s ETFE. Pri STI je viditeľná korelácia s časom dozvuku, resp. pohltivosťou.

V grafe poklesu C_{80} (1000 Hz) sa krivky prekrývajú. Hoci by sme od nízkeho átria 1:1 (modrá) očakávali vyššiu jasnosť než od 1:3 (červená), opak je pravdou – dlhšie átrium má negatívny vplyv. Pre vysoké átriá (zelené a žlté) sú časy dozvuku pri 1000 Hz podobné, no hladina tlaku je vyššia v prípade 1:3.

Presklené átriá sa v čase dozvuku líšia v nízkych frekvenciách, no pokles STI so vzdialenosťou je takmer identický. Pri 1000 Hz sú T_{30} hodnoty takmer rovnaké, okrem nízkeho átria 1:1. Tento rozdiel sa však neodráža v C_{80} – krivky sa prekrývajú, len červené átrium (1:3) vykazuje horšiu jasnosť, najmä od 3 m. Očakávaná vyššia jasnosť u modrého átria (1:1) sa nepotvrdila – hodnoty sú podobné ako pri vyšších T_{30} (žlté, zelené). Pokles tlaku (1000 Hz) koreluje s T_{30} – najtichšie je modré (nízka strecha, 1:1), podobné hodnoty majú žlté (najvyššie) a červené (najdlhšie nízke).

Pri porovnaní ETFE a skla (plná vs. čiarkovaná) je vplyv strechy najvýraznejší pri nižších átriách – väčšia strešná plocha vedie k väčšiemu rozdielu v priemernej pohltivosti.



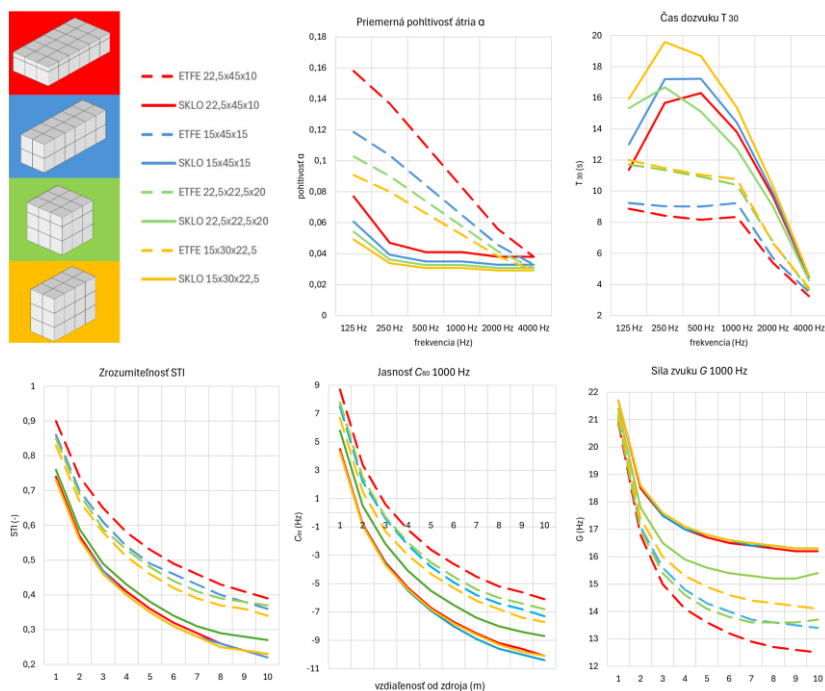
Obrázok 3.12: Porovnanie átrií s rovnakým objemom $5062,5 \text{ m}^3$ ale inými geometrickými rozmermi

5.1.2. 10 125 m^3

V podobnej analýze môžeme vidieť porovnanie átrií s dvojnásobným objemom oproti predchádzajúcim, teda $10\,125 \text{ m}^3$.

Aj keď nízke a dlhé átrium (červená čiarkovaná) s ETFE strechou má najvyššiu pohltivosť v nízkych frekvenciách, jeho hodnoty sa len mierne líšia od hodnôt o niečo vyššieho átria (modrá čiarkovaná). Všetky ďalšie hodnoty korelujú s časom dozvuku ako by sme očakávali. Môžeme teda konštatovať, že so zväčšujúcim sa objemom klesá vplyv geometrie na hodnotené parametre.

Hodnoty pohltivosti sú pre všetky átria s presklenou strechou veľmi podobné a zodpovedajú aj časom dozvuku, s výnimkou átria s pomerom strán 1:1, ktoré dosahuje nižšie hodnoty času dozvuku ako by sa dalo očakávať. Toto pozorovanie koreluje s hodnotami STI, C_{80} a G , kde je viditeľný odstup zelenej plnej krivky od ostatných kriviek. Átrium s pomerom 1:1 má vyššie hodnoty jasnosti zvuku a zrozumiteľnosti reči.



Obrázok 3.13: Porovnanie átrií s rovnakým objemom 10 125 m³ ale inými geometrickými rozmermi

3.1.6. Záver

Vplyv objemu átria na akustické veličiny (T_{30} , STI , G , C_{80})

Výsledky parametrickej štúdie potvrdili, že **objem átria výrazne ovplyvňuje základné akustické vlastnosti**. S rastúcim objemom narastá **čas dozvuku (T_{30})**, najmä pri nízkych a stredných frekvenciách. Tento jav je spôsobený tým, že plocha pohltivých materiálov nerastie priamo úmerne objemu priestoru – **čím väčší objem, tým nižšia efektívna pohltivosť na jednotku objemu**, čo umožňuje zvuku zotrvať dlhšie v priestore. Je známe, že pohltivosť zvuku vo vzduchu pri nízkych frekvenciách je v prípade akustiky budov zanedbateľná. V prípade frekvencií nad 2000 Hz však pohltivosť zvuku vzduchom rastie a podstatne vplyva na šírenie zvuku a teda aj na čas dozvuku.

V prípadoch, v ktorých bolo zastrešenie priestorov riešené sklom bol nárast T_{30} najvýraznejší v stredných frekvenciách a **viac sa prejavoval v pretiahnutých pôdorysoch** (s pomerom strán **1:3 – väčšia plocha strechy**) než v kompaktných štvorcových priestoroch (1:1 – menšia plocha strechy), kde bol rast T_{30} dominantný pri nízkych frekvenciách. To je spôsobené tým, že i keď oba porovnávané materiály použité na zastrešenie átria majú najvyššiu pohltivosť v nízkych frekvenciách, v prípade skla je jej hodnota pri 125 Hz trojnásobne (o 200 %) vyššia ako pre 250 Hz a dokonca päťnásobne (o 400%) vyššia ako pre 500 Hz. V prípade ETFE je to rozdiel iba 20 %, resp. 62 %. Od frekvencie 1000 Hz sa začína prejavovať pohltivosť zvuku vo vzduchu, a tak sa tento efekt stráca.

Zrozumiteľnosť reči (STI) vplyvom objemu stúpara. U átrií s pomerom strán 1:1 vidíme však prudší pokles hodnôt v závislosti od vzdialenosti v porovnaní s átriami s pomerom strán 1:3. Najmä v átriách s väčším objemom, absentujú pri pomere strán 1:1 bočné odrazy od stien, ktoré majú z dôvodu prekonania väčšej vzdialenosti príliš málo zvukovej energie na to, aby zvyšovali pomer skorých a neskorých odrazov zvuku.

Sila zvuku (G) klesá logaritmicky vo všetkých priestoroch. Vyššie hodnoty G môžeme pozorovať pri menších priestoroch, kde prichádzajú skoré odrazy nesúce stále dostatočné množstvo energie na to, aby prispelo k celkovej hladine akustického tlaku. V malých átriách preto hodnoty klesajú miernejšie. V priestoroch s väčšími objemami je pokles hladiny akustického tlaku so vzdialenosťou výraznejší než pri menších miestnostiach, keďže neskoré odrazy od vzdialenejších stien nesú nižšiu akustickú energiu.

Na základe výsledkov tiež môžeme konštatovať, že **Jasnosť zvuku (C_{80})** vo vzdialenosti 3m od zdroja zvuku s narastajúcim objemom stúpa. Pri sledovaní pozície vo vzdialenosti 10 m od zdroja zvuku nie je tento nárast tak výrazný, čo majú za príčinu silné neskoré odrazy na pozíciách vzdialenejších od zdroja zvuku. Ak porovnáваме vplyv typu materiálu zastrešenia, tak môžeme vidieť, že pre nízke frekvencie sú hodnoty C_{80} , lepšie rádovo o 4 dB pre ETFE v porovnaní so sklom. Je to spôsobené najmä silou neskorých odrazov od strešnej konštrukcie vplyvom jej rozdielnej pohltivosti.

Vplyv výšky transparentného zastrešenia na akustické veličiny (T_{30} , STI , G , C_{80})

Výška strechy mala vplyv na akustické vlastnosti priestoru v závislosti od použitého materiálu. Pri sklenom zastrešení mala vyššia strecha **pozitívny vplyv na zrozumiteľnosť reči (STI)**. Naopak, pri streche z ETFE vankúšov **zmena výšky nemala významný vplyv na hodnoty STI**, čo poukazuje na odlišné akustické správanie tohto materiálu (väčšia zvuková pohltivosť a väčší rozptyl).

Výška priestoru mala najväčší vplyv na hodnoty času dozvuku T_{30} najmä v oktávovom pásme 1000 Hz, a to výraznejšie v prípade skleného zastrešenia. **Sila zvuku (G)** bola citlivá na výšku strechy len pri strechách na báze skla. Pri zastrešení ETFE vankúšmi boli rozdiely medzi krivkami zobrazujúcimi jednotlivé výšky strechy najviac 1 dB, teda výška strechy mala pri jednotlivých objemoch minimálny vplyv na hladinu akustického tlaku. Hodnoty jasnosti C_{80} neboli výrazne ovplyvnené samotnou výškou, no pri vyšších sklených strechách došlo k miernemu zníženiu jasnosti zvuku, a to najmä vo väčších priestoroch. Pri strechách zastrešených ETFE vankúšmi nebol zistený vplyv výšky strechy na C_{80} .

Vplyv materiálu transparentného zastrešenia na akustické veličiny (T_{30} , STI , G , C_{80})

Materiál strechy sa vo všeobecnosti ukázal ako **faktor ovplyvňujúci celkové akustické podmienky v átriu**. Sklenené zastrešenia viedli k dlhším časom dozvuku (T_{30}) a zvýšeniu hustoty neskorých

odrazov zvuku, ktoré zapríčinili zhoršenie zrozumiteľnosti reči. **ETFE vankúše** naopak **prispeli k skráteniu Času dozvuku T_{30} , zvýšeniu STI a mierne lepšej jasnosti zvuku (C_{80})** – rozdiel v prospech ETFE predstavoval v niektorých prípadoch až **3,5 dB pri C_{80} do 0,2 pri parametri STI a do 3 dB pre Silu zvuku G** .

Zároveň sa ukázalo, že výber materiálu má najväčší význam v **menších objemoch alebo pri nízkej výške strechy**. Pri porovnateľnej pohltivosti ETFE pôsobí v priestore difúznejšie, čo má pozitívny dopad na akustickú rovnováhu aj bez výrazného nárastu pohltivých plôch.

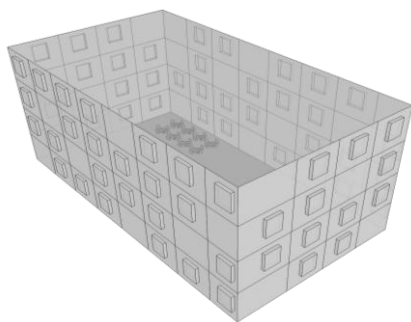
3.2. EXPERIMENT 2 - AKUSTICKÝ KOMFORT V REŠTAURÁCIÍ I. PREDIKCIA HLUKU POZADIA V REŠTAURÁCIÍ INTEGROVANEJ DO VEĽKÉHO NÁKUPNÉHO CENTRA

3.2.1. Úvod

V tejto prípadovej štúdii sa zaoberáme vplyvom umiestnenia zvukovo pohltivých materiálov v átriu, kde sa v jednom z rohov nachádza reštaurácia. Vplyv polohy zvukovo pohltivých prvkov v priemerne veľkých miestnostiach je vo všeobecnosti dobre známy. Avšak v rozľahlých priestoroch môžu neskoré odrazy prenášať len minimálne množstvo zvukovej energie a preto bude ich vplyv na celkovú hladinu zvuku výrazný iba v prípadoch, keď je zdroj zvuku mimoriadne silný. Táto štúdia nadväzuje na predchádzajúci výskum (Rychtáriková M., Urbán D., Kaššáková M., Maywald C., Glorieux Ch., 2017).

3.2.2. Popis prípadovej situácie

Prípadová štúdia sa zaoberá átriom školy v Oldenburgu v tvare obdĺžnikového kvádra, ktoré je prekryté ETFE vankúšmi a má objem 8921 m³ (18 m × 33 m × 15 m). Reštaurácia je umiestnená v jednom z rohov átria (Obrázok 3.14).



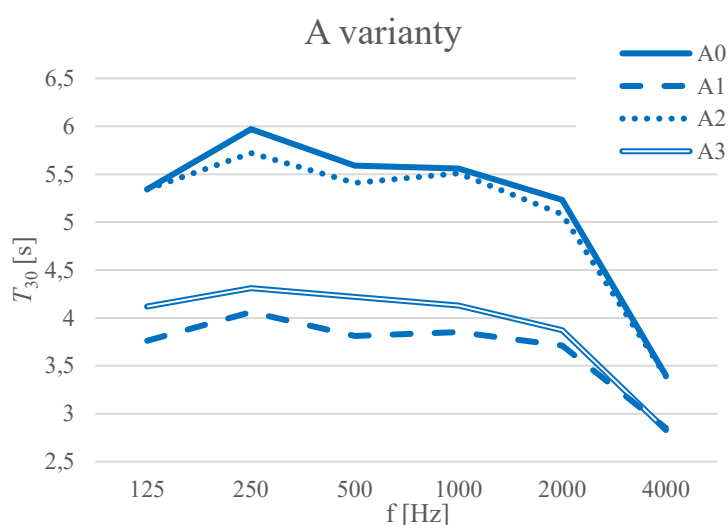
Obrázok 3.14: Átrium s kaviarňou

3.2.3. Výsledky a diskusia

3.2.3.1. Experiment A (porovnanie variantov A0–A3)

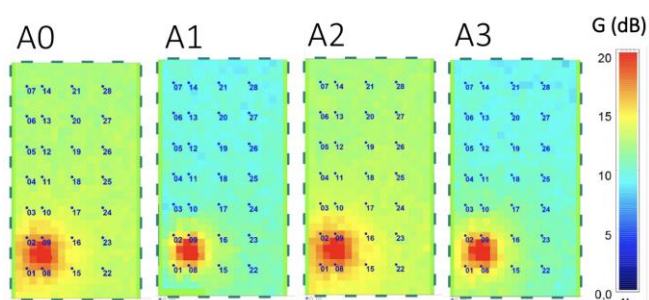
Najskôr boli varianty A0–A3 porovnané z hľadiska celkového času dozvuku (

Obrázok 3.15), ktorý bola vypočítaný ako priemerná hodnota z 28 pozícií prijímačov. Na základe výsledkov môžeme konštatovať, že aj relatívne malé množstvo zvukovo pohltivého materiálu v rozľahlej miestnosti môže ovplyvniť hodnotu T_{30} , pokiaľ je jeho umiestnenie veľmi blízko pri zdroji zvuku.



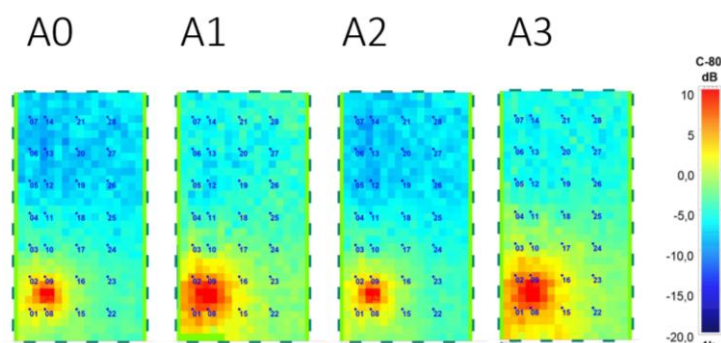
Obrázok 3.15: Simulovaný čas dozvuku T_{30} (s) pre varianty A0-A3

Analýza distribúcie hladiny akustického tlaku v átriu bola vykonaná pomocou parametra Sila zvuku - G (Obrázok 3.16). Významný rozdiel sa prejavil medzi prípadmi, kde bola zvuková pohltivosť umiestnená v blízkosti reštaurácie (varianty A1 a A3) a variantmi A0 a A2. Medzi variantom A0 (bez zvukovej pohltivosti) a variantom A2, v ktorom bola zvuková pohltivosť umiestnená v opačnom rohu átria (relatívne voči zdroju zvuku), nebol zaznamenaný významný rozdiel v hodnotách G . Rovnako medzi variantmi A1 a A3 neboli zistené významné rozdiely v hodnotách T_{30} a G , ale umiestnenie zvukovej pohltivosti na stene dosahuje o niečo lepšie výsledky ako variant s pohltivosťou nad reštauráciou.



Obrázok 3.16: Simulovaná zvuku G (dB) pre varianty A0-A3

Analýza miestnosti podľa parametra C_{80} (obrázok 3.18), pre frekvenciu 1000 Hz ktorý predstavuje pomer medzi skorými a neskorými odrazmi zvuku, ukazuje určitú podobnosť s rozložením hodnôt G . Zvuková pohltivosť umiestnená v blízkosti zdroja zvuku má výrazný vplyv na Jasnosť zvuku C_{80} , zatiaľ čo zvuková pohltivosť umiestnená ďalej od zdroja zvuku má len minimálny vplyv na výsledky. Tento výsledok potvrdzuje, že veľmi neskoré odrazy zvuku v átriu s objemom približne 8921 m³ sú príliš slabé na to, aby významne ovplyvnili hladiny akustického tlaku alebo jasnosť zvuku.

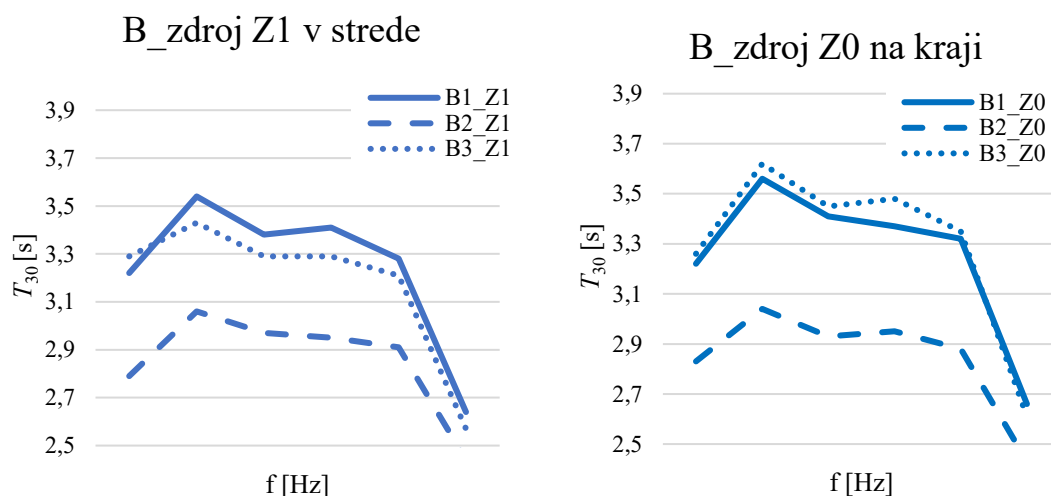


Obrázok 3.17: Simulovaná jasnosť zvuku C_{80} (dB) 1000 Hz pre varianty A0-A3

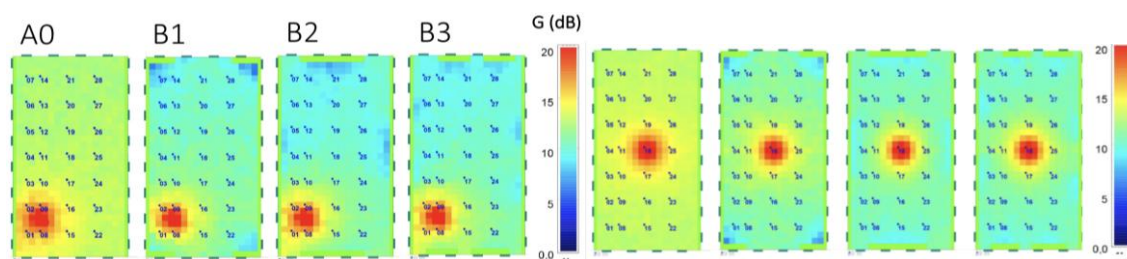
3.2.3.2. Experiment B (porovnanie variantov B1–B3)

Vo variantoch B1–B3 boli simulácie vykonané pre dve polohy zvukového zdroja: Z0 (rovnaká ako v predchádzajúcich experimentoch) a Z1 (zdroj umiestnený v strede miestnosti). Výsledky priemernej hodnoty času dozvuku pre oba zvukové zdroje sú znázornené na obrázku 3.19. Z výsledkov je zrejmé, že v prípadoch so zvukovou pohltivosťou v rohu (variant B1) a v prípade rovnomerne rozloženej zvukovej pohltivosti je čas dozvuku mierne dlhší ako v prípade B2, kde bola zvuková pohltivosť umiestnená v strednej časti stien. Tieto rozdiely sú však veľmi malé a nebudú spôsobovať postrehnuteľné rozdiely v dozvuku.

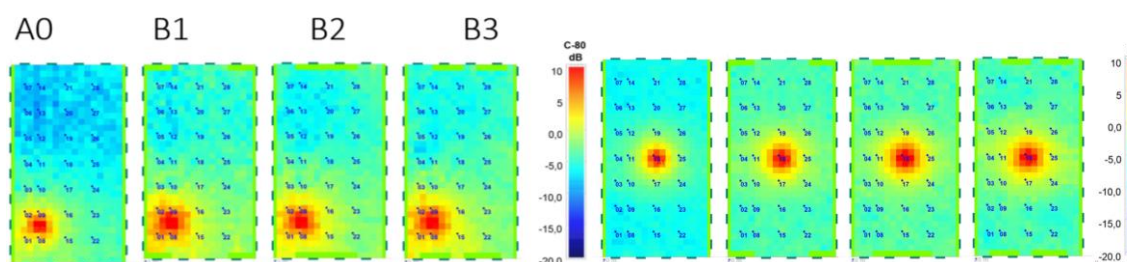
Z hľadiska distribúcie hladiny akustického tlaku vyjadrenej pomocou parametra G pre zdroje Z0 a Z1 neboli zaznamenané rozdiely medzi tromi variantmi B1–B3. Jediný pozorovateľný efekt je lokálny pokles hladiny akustického tlaku v blízkosti zvukovo-pohltivých plôch.



Obrázok 3.18: Simulovaný čas dozvuku T_{30} (dB) pre varianty B1-B3



Obrázok 3.19: Simulovaná sila zvuku (dB) pre varianty bez pohltivosti (A0) s porovnaním s variantami B1-B3



Obrázok 3.20: Simulovaná čistota zvuku (dB) pre frekvenciu 1000 Hz pre variant bez pohltivosti (A0) s porovnaním s variantami B1-B3

Výsledky jasnosti zvuku C_{80} pre 1000 Hz sú zobrazené na obrázku 3.21. Z globálneho hľadiska dochádza k poklesu celkovej jasnosti zvuku iba v situácii bez zvukovej pohltivosti, čo je očakávaný výsledok. Lokálne sa medzi variantmi B1–B3 v oblasti reštaurácie vyskytujú len minimálne rozdiely.

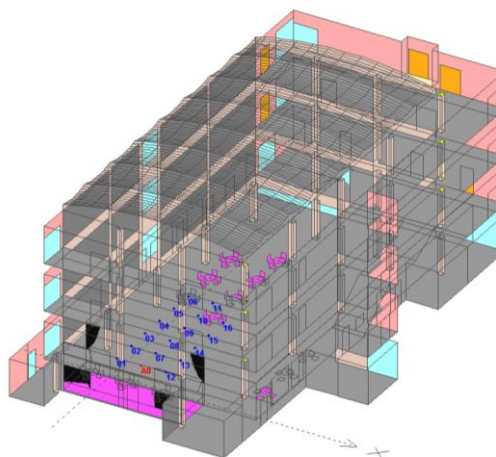
3.2.4. Záver

Z výsledkov možno konštatovať, že umiestnenie vysoko pohltivého materiálu v blízkosti zdroja zvuku môže výrazne ovplyvniť celkový čas dozvuku, rozloženie hladiny akustického tlaku a jasnosť zvuku aj vo veľkej miestnosti. Zvuková pohltivosť umiestnená na stenách vzdialených od zdroja zvuku ovplyvní hladinu akustického tlaku iba lokálne, a to len v oblastiach veľmi blízko zvukovo-pohltivých povrchov.

3.3. EXPERIMENT 3 - VPLYV KOEFICIENTU ROZPTYLU NA ČAS DOZVUKU PRI SIMULÁCII ÁTRIÍ

3.3.1. Popis prípadovej štúdie

Prípadová štúdia sa zameriava na veľké átrium školského objektu v Oldenburgu (Nemecko) s objemom približne 8900 m³. Priestor slúži najmä ako zhromaždisko počas prestávok, nachádza sa v ňom kaviareň a malé pódium pre prednášky a podujatia. Átrium má tvar „shoebox“ (cca 16,5 × 14,6 m, výška 27,1 m), je obklopené chodbami po štvrté podlažie a vetrané centrálnou klimatizáciou. Transparentné zastrešenie tvorí fóliový systém TEXLON® ETFE s potlačenou textúrou pre tienenie. (Urbán D., 2016)



Obrázok 3.21: Átrium v Oldenburgu (vľavo), simulačný model átria

3.3.2. Merania

Merania impulzovej odozvy podľa noriem ISO 3382 a ISO 18233 s použitím sweep signálu a merania hladiny hluku pozadia boli vykonané v prázdnom átriu pred začiatkom vyučovania. Tieto experimenty boli realizované ako súčasť pilotnej štúdie v rámci projektu COST akcia 1303 (Urbán D., 2016).

3.3.3. Simulácie

Na analýzu vplyvu rozptylu zvuku v prostrediach s rôznou zvukovou pohltivosťou bolo definovaných deväť alternatív líšiacich sa vlastnosťami použitých materiálov (Tabuľka 3.2: Popis deviatich (9) alternatív, vytvorených na základe variácií zvukovo-pohltivých vlastností stien/podlahy a stropu.). Pre každú alternatívu boli simulované štyri úrovne povrchového rozptylu (1 %, 10 %, 20 %, 30 %). Simulácie s 10 000 lúčmi boli zamerané na výpočet impulzových odoziev, pričom analyzovaný bol výlučne čas dozvuku (T_{30}), a to ako priemer z 16 prijímačov v oktávových pásmach. Model bol vytvorený v CAD softvéri (Obrázok 3.21) a kalibrácia východiskovej alternatívy prebehla na základe reálnych meraní T_{30} . Pre jednoduché porovnanie medzi alternatívami bola vo všetkých predikovaných scenároch zdroj zvuku a šesťnásť (16) prijímačov umiestnených na rovnakých pozíciách vo výške 1,5 m nad podlahou (**Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**).

Obrázok 3.22: Pôdorys s umiestnením mikrofónov

Tabuľka 3.2: Popis deviatich (9) alternatív, vytvorených na základe variácií zvukovo-pohltivých vlastností stien/podlahy a stropu.

Materiál stien a podlahy	Súčasná situácia			Odrazivá situácia			Pohltivá situácia		
Materiál stropu	Fólia	Sklo	Betón	Fólia	Sklo	Betón	Fólia	Sklo	Betón
	Alt. 1.	Alt. 2.	Alt. 3.	Alt. 4.	Alt. 5.	Alt. 6.	Alt. 7.	Alt. 8.	Alt. 9.

Tabuľka 3.3: Koeficient zvukovej pohltivosti stien a podláh použitý v simuláciách

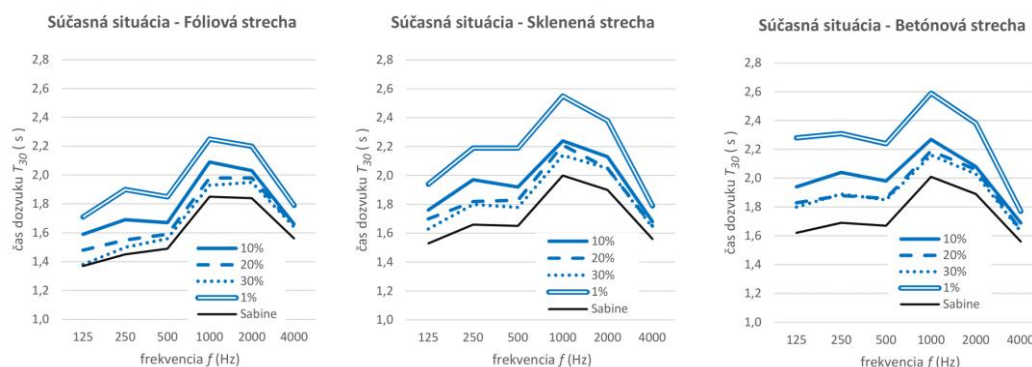
Materiál stien a podlahy	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Súčasná situácia	0,21	0,20	0,20	0,16	0,16	0,16
Odrazivá situácia	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Pohltivá situácia	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50

Tabuľka 3.4: Koeficient pohltivosti strechy použitý v simuláciách

Materiál stropu	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Fólia ETFE	0,42	0,35	0,26	0,17	0,08	0,02
Sklo	0,15	0,05	0,03	0,03	0,02	0,02
Betón	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02

3.3.3.1. Aktuálny stav

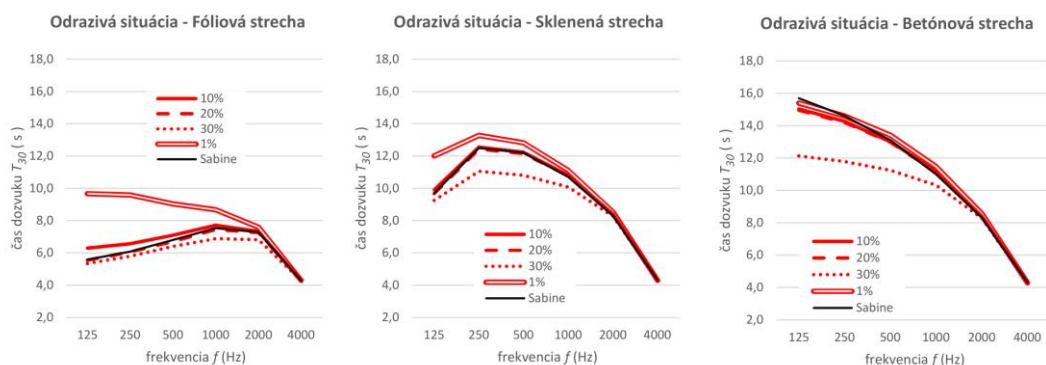
Grafy (Obrázok 3.4) sumarizuje simulované hodnoty T_{30} pre alternatívy s pohltivosťou stien a podlahy zodpovedajúcou reálnemu átriu ($\alpha \approx 0,20$). Zobrazené sú tri varianty zastrešenia: ETFE vankúš, sklo, betónový strop. Rozdiely pri rozptyle 20–30 % sú zanedbateľné. Pri jednotnom rozptyle 10 % je rozdiel v T_{30} na úrovni „práve rozpoznateľného rozdielu“ (JND), zatiaľ čo pri 1 % rozptyle je predikovaný čas dozvuku výrazne vyšší.



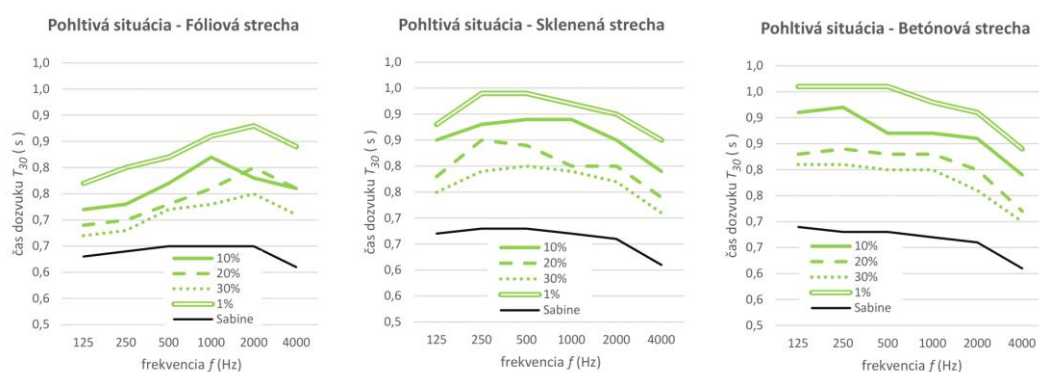
Obrázok 3.23: Výsledky T_{30} (Hz) pre alternatívy 1–3 v átriu so stenami/podlahami s povrchom v súčasnej situácii

Graf na obrázku 3.25 ukazuje, že pri vysoko odrazivých materiáloch (2 % pohltivosť) sa najväčšie rozdiely medzi simuláciami prejavujú v nízkych a stredných frekvenciách. Rozdiel medzi rozptylom 20 % a 30 % je zanedbateľný. Pri tvrdých strechách (sklo, betón) je vplyv rozptylu nad 2000 Hz minimálny. Sabinova teória najviac zodpovedá variantom s vysokým rozptylom, okrem prípadov so strechou z ETFE. V nízkych frekvenciách sú časy dozvuku výrazne dlhšie napriek rovnakej alebo vyššej pohltivosti – pravdepodobne v dôsledku dlhých dráh zvuku a nižšej absorpcie vzduchom v nízkych frekvenciách.

V zvukovo pohltivej situácii (Obrázok 3.26), t. j. Alt.7-9, sa čas dozvuku pohybuje v rozmedzí od 0,6 do 0,9 s. Hodnoty predpovedané Sabinovou teóriou sú výrazne nižšie ako hodnoty získané zo simulácií. Tiež sa potvrdilo, že čím menší je rozptyl, tým dlhší je čas dozvuku.



Obrázok 3.24: Výsledky T_{30} (Hz) pre alternatívy 1–3 v átriu so stenami/podlahami s povrchom v odrazivej situácii



Obrázok 3.25: Výsledky T_{30} (Hz) pre alternatívy 1–3 v átriu so stenami/podlahami s povrchom v pohltivej situácii

3.3.4. Záver

Z výsledkov vyplýva, že v prípadoch s nízkou pohltivosťou v miestnosti je vo všeobecnosti možné pozorovať vyšší vplyv koeficientu rozptylu. Zistilo sa, že vyššie hodnoty povrchového rozptylu zvuku vedú k nižším hodnotám T_{30} , najmä pri nízkych frekvenciách.

Výpočty podľa Sabinovej teórie vo väčšine prípadov predpovedajú najdlhšie časy dozvuku. To možno vysvetliť skutočnosťou, že model nie je difúzny kvôli nerovnomernému rozloženiu zvukovej pohltivosti (odlišná zvuková pohltivosť na strope v porovnaní s ostatnými povrchmi miestnosti). Výsledkom je, že odrazy zvuku nie sú pravidelne rozložené v reflektograme, ktorý je základom pre výpočet času dozvuku v softvéri kombinujúcom metódu zrkadlových zdrojov a metódu sledovania lúča.

3.4. EXPERIMENT 4 - VPLYV KOEFICIENTU ROZPTYLU ZVUKU NA SIMULOVANÉ PARAMETRE VO VEĽKÝCH MIESTNOSTIACH

3.4.1. Úvod

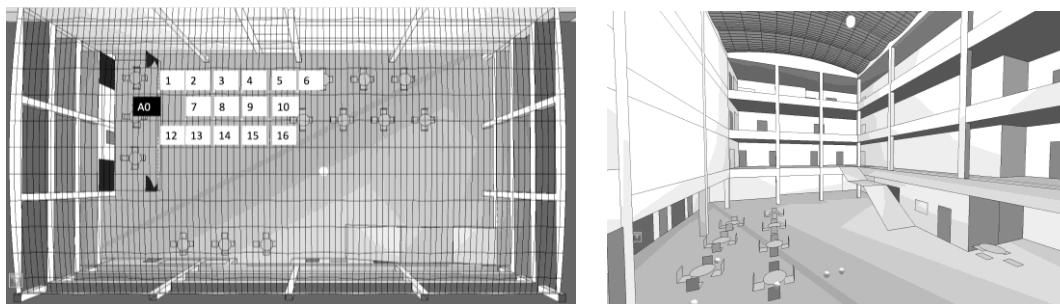
V tomto článku sa skúma vplyv koeficientu rozptylu v algoritme simulácie založenom na metóde sledovania lúča, pričom sa analyzujú rôzne podmienky pohltivosti zvuku vo veľkých výpočtových modeloch. Táto štúdia nadväzuje na predchádzajúci výskum prezentovaný v kapitole 3.3 a v článku (Kaššáková M., Urbán D., Vargová A., Rychtáriková M., 2017), v ktorom bol analyzovaný vplyv rozptylu na predikciu času dozvuku.

3.4.2. Prípadová štúdia

Podrobný opis prípadovej štúdie, meraní in situ a kalibrácie simulačného modelu je uvedený v prvej časti tejto kapitoly, ktorá bola publikovaná ako konferenčný príspevok v (Kaššáková M., Urbán D., Vargová A., Rychtáriková M., 2017) a v kapitole 5.3 tejto práce. Najzaujímavejšie sú porovnania medzi dvoma transparentnými strešnými konštrukciami (sklo – ETFE vankúše). V tomto článku je vplyv strešného materiálu posudzovaný výlučne z hľadiska jeho zvukovej pohltivosti. V štúdií bolo zvolených deväť (9) alternatív s rôznymi pohltivými vlastnosťami vnútorných povrchov (Tabuľka 3.5). Simulácie boli v každej alternatíve vykonané pre štyri rôzne hodnoty povrchového koeficientu rozptylu, konkrétne 1 %, 10 %, 20 % a 30 %. V každej alternatíve boli predikované a následne porovnávané tieto parametre: index prenosu reči (*STI*), Jasnosť zvuku (C_{80}) a Sila zvuku (*G*).

Tabuľka 3.5: Popis deviatich variantov vytvorených na základe kombinácie rôznych úrovní zvukovej pohltivosti stien, podlahy a stropu.

Materiál stien a podlahy	Súčasná situácia			Odrazivá situácia			Pohltivá situácia		
Materiál stropu	Fólia	Sklo	Betón	Fólia	Sklo	Betón	Fólia	Sklo	Betón
	Alt. 1.	Alt. 2.	Alt. 3.	Alt. 4.	Alt. 5.	Alt. 6.	Alt. 7.	Alt. 8.	Alt. 9.



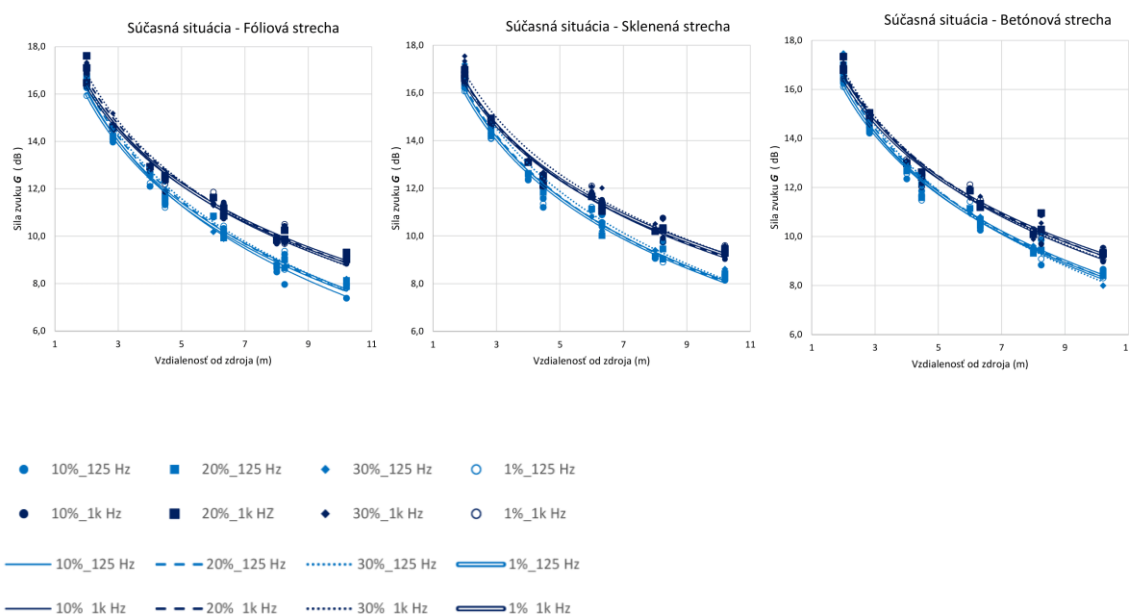
Obrázok 3.26: 3D model átria (vľavo) a pôdorys s vyznačením 16 mikrofónových pozícií (vpravo)

3.4.3. Výsledky a diskusia

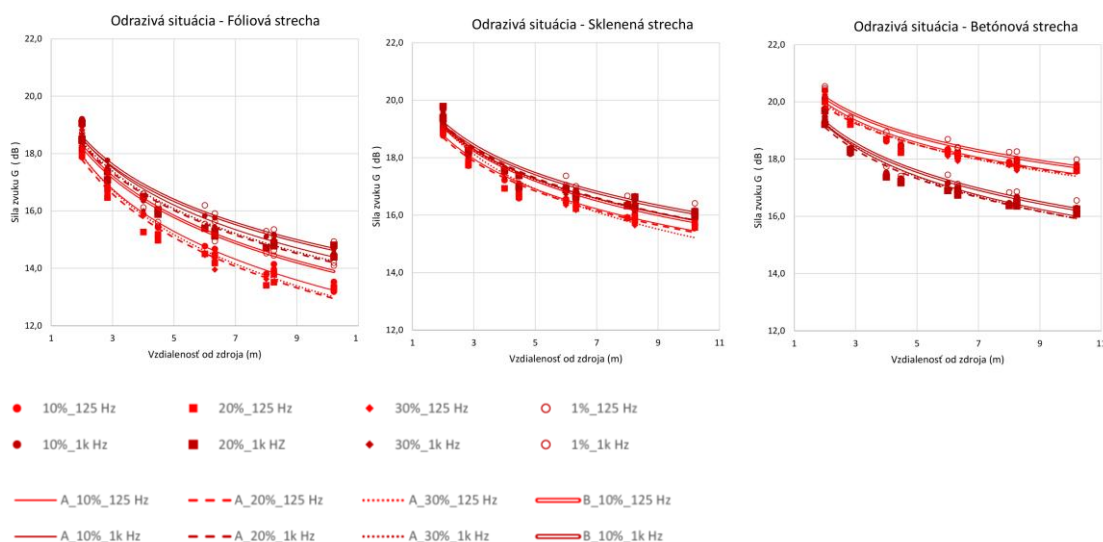
3.4.3.1. Hladina akustického tlaku a sila zvuku

Obrázok 3.35 znázorňuje pokles hladiny akustického tlaku (parametra G) so vzdialenosťou od zdroja pre alternatívy 1–3 v pásmach 125 Hz a 1 kHz. Rozdiely medzi variantmi aj medzi rôznymi podmienkami rozptylu sú minimálne – často na úrovni JND (<1 dB). Parameter G je primárne ovplyvnený priamym zvukom a skorými odrazmi, ktoré prichádzajú z najbližších povrchov, a keďže steny a podlaha sú rovnaké vo všetkých variantoch, majú dominantný vplyv. Zreteľné rozdiely sú medzi frekvenciami. Pri ETFE streche sú hodnoty G v 10 m vzdialenosti o 2–3 dB nižšie pri 125 Hz ako pri 1 kHz. Pri skle je rozdiel 1–2 dB, pri betóne 1 dB, pričom betón má nižšiu hladinu pri 1 kHz, na rozdiel od ETFE a skla.

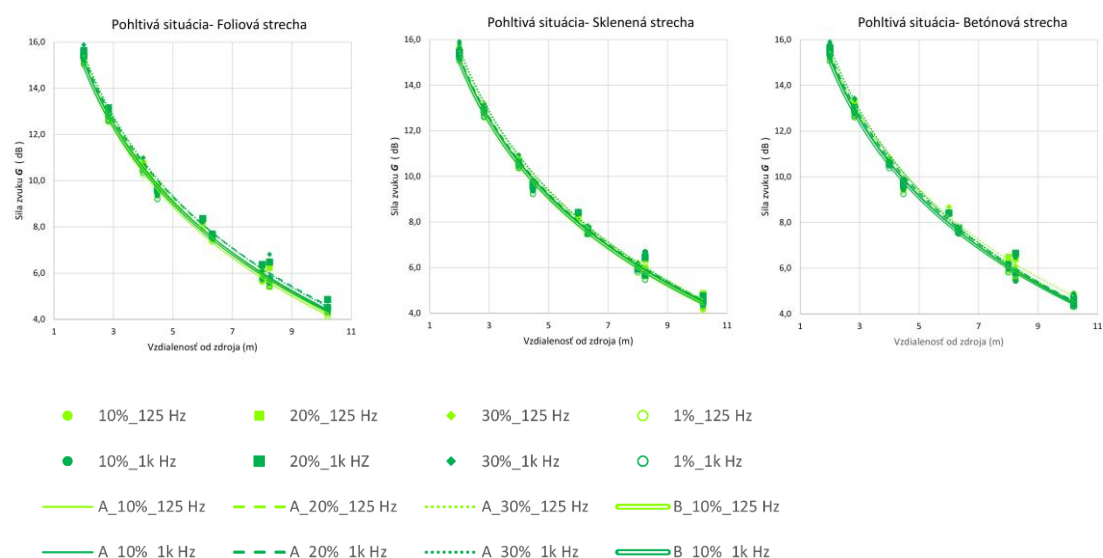
Obrázok 3.29 zobrazuje alternatívy 4–6 (odrazivé podmienky), kde sú najväčšie rozdiely opäť medzi pásmami. Vplyv stropu je v tomto prípade výrazný – pri ETFE sú hodnoty G pri 125 Hz o 2 dB nižšie než pri 1 kHz, pri skle o 1 dB a pri betóne rozdiel narastá kvôli silnejšej pohltivosti vzduchu vo vyšších frekvenciách. V pohltivých podmienkach (Alt. 7–9) koeficient rozptylu neovplyvňuje G , keďže väčšina zvukovej energie je absorbovaná. Hodnoty G sú len o cca 4 dB vyššie ako vo voľnom poli, čo zodpovedá slabému účinku odrazov.



Obrázok 3.27 : Pokles hladiny akustického tlaku v závislosti od vzdialenosti od zdroja zvuku pre varianty 1–3, vyjadrený prostredníctvom parametra Sila zvuku (G).



Obrázok 3.28 : Pokles hladiny akustického tlaku v závislosti od vzdialenosti od zdroja zvuku pre varianty 4-6, vyjadrený prostredníctvom parametra Sila zvuku (G).

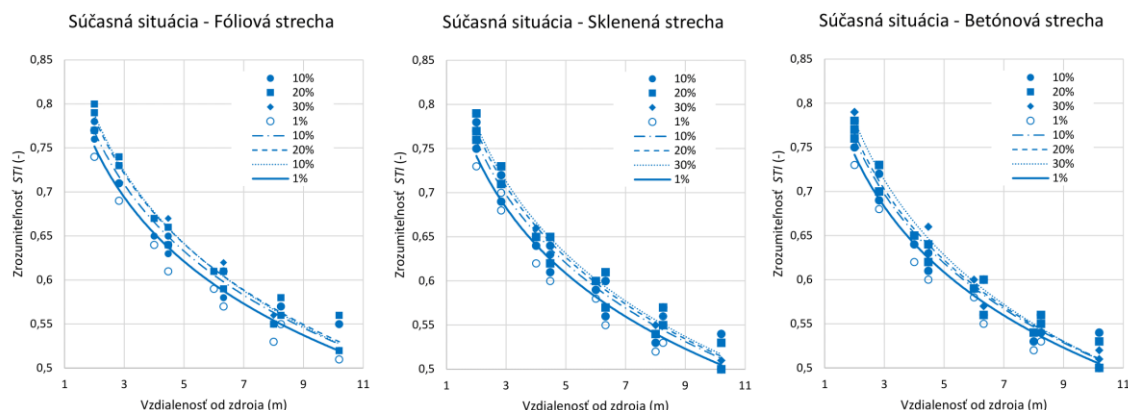


Obrázok 3.29: Pokles hladiny akustického tlaku v závislosti od vzdialenosti od zvukového zdroja pre varianty 7-9, vyjadrený prostredníctvom parametra zvukovej sily (G).

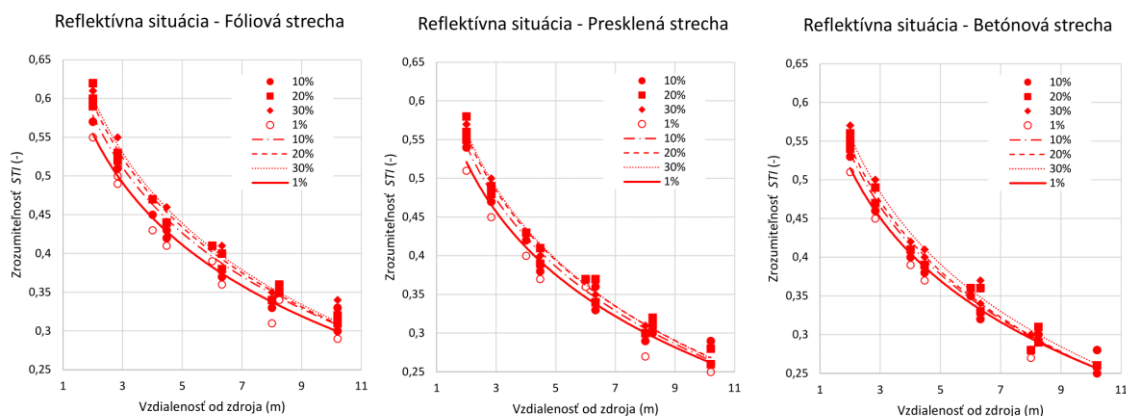
3.4.3.2. Index prenosu reči (STI)

Z dôvodu zjednodušenia a lepšieho pochopenia vplyvu dozvuku a rozptylu sú v tejto kapitole prezentované iba hodnoty STI vypočítané bez hluku pozadia. Grafy (Obrázok 3.30, Obrázok 3.31, Obrázok 3.32) zobrazujú simulované hodnoty STI na 16 prijímačoch, v závislosti od vzdialenosti od zdroja zvuku. Súčasťou grafov sú aj logaritmické trendové krivky, ktoré znázorňujú pokles STI so vzdialenosťou. Na základe výsledkov možno konštatovať, že povrchový rozptyl nemá žiadny vplyv na hodnoty STI – rozdiely boli vo všetkých prípadoch

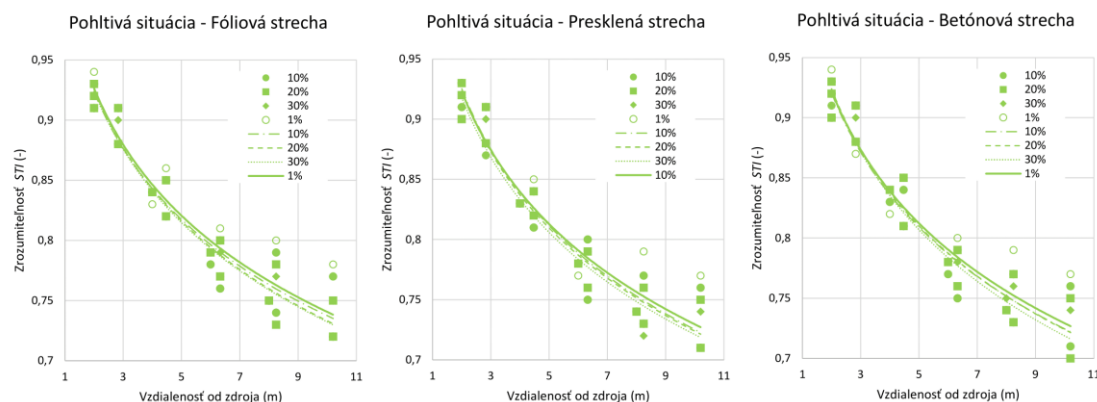
menšie než JND (napr. <10 %).



Obrázok 3.30: Simulovaný Index prenosu reči (–) v závislosti od vzdialenosti medzi zdrojom a prijímačom pri súčasnom stave stien a podlahy (alternatívy 1–3).



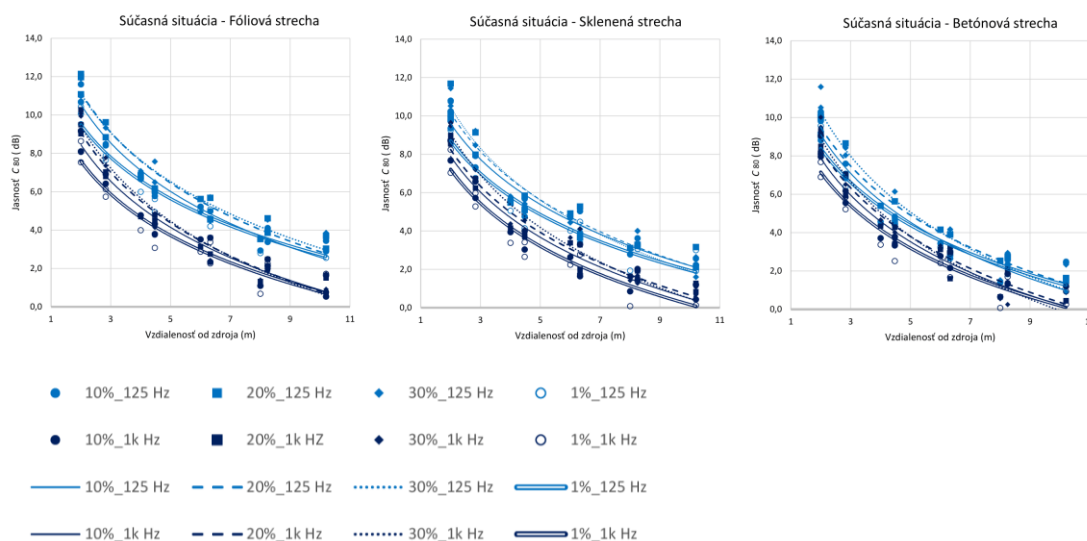
Obrázok 3.31: Simulovaný Index prenosu reči (–) v závislosti od vzdialenosti medzi zdrojom a prijímačom pri odrazivom stave stien a podlahy (alternatívy 4–6).



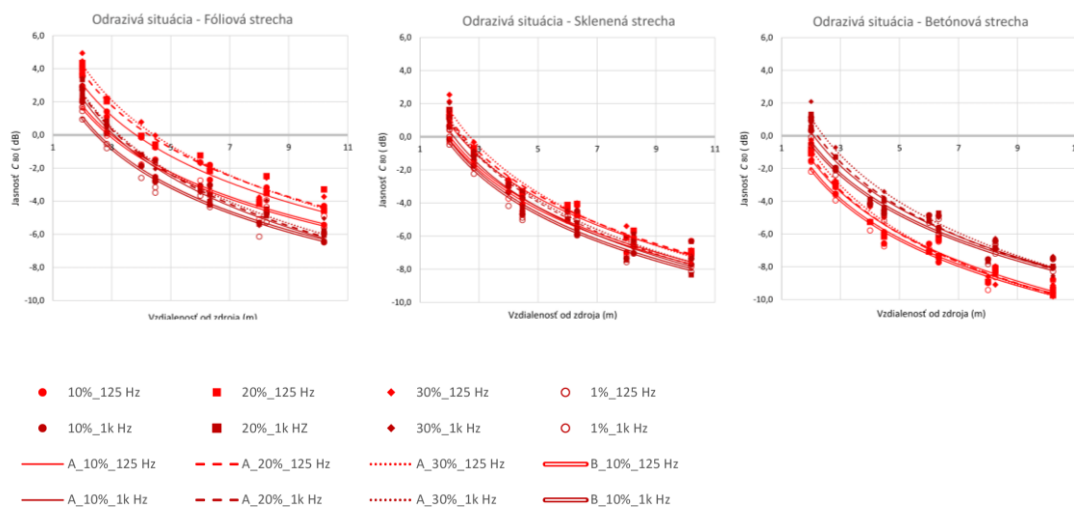
Obrázok 3.32: Simulovaný Index prenosu reči (–) v závislosti od vzdialenosti medzi zdrojom a prijímačom pri pohltivej situácii stien a podlahy (alternatívy 7–9).

3.4.3.3. Jasnosť zvuku

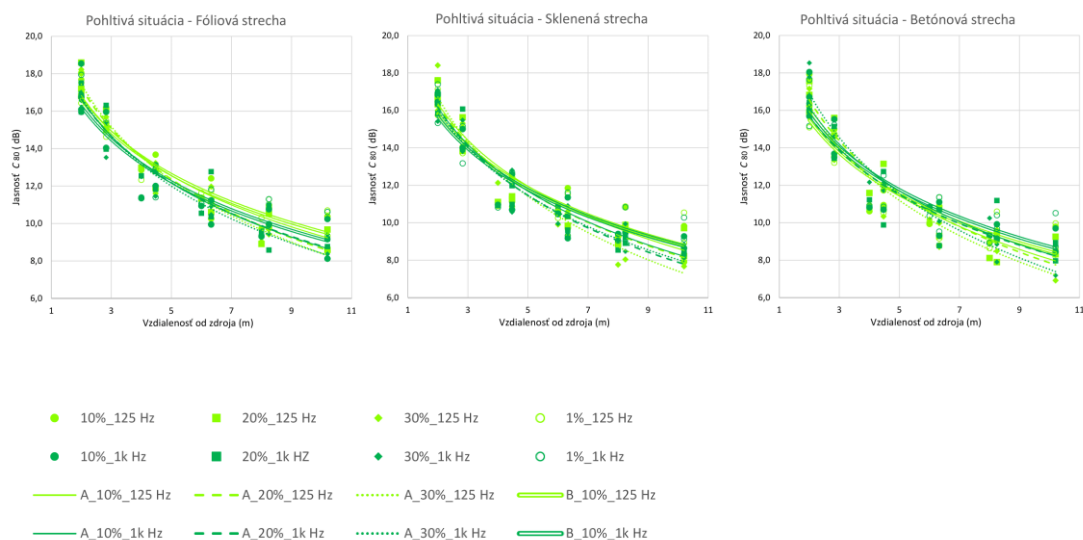
Výsledky parametra C_{80} sú zobrazené na Obrázok 3.33 - Obrázok 3.35. Rozdiel medzi oktávovými pásmami 125 Hz a 1 kHz je zreteľný v aktuálnej situácii aj v prípade odrazivej podlahy a stropu. Rozdiely sa pohybujú v rozmedzí 2 – 3 dB. Vo zvukovo pohltivej situácii sú hodnoty parametra jasnosti zvuku veľmi vysoké s minimálnymi rozdielmi. Vo všeobecnosti vyššia miera rozptylu vedie k vyšším hodnotám jasnosti zvuku v aktuálnej a reflexnej situácii. V prípade vysoko pohltivej situácie vyššie hodnoty rozptylu povrchov znižujú jasnosť zvuku.



Obrázok 3.33: Simulovaná Jasnosť zvuku (dB) v závislosti od vzdialenosti medzi zdrojom a prijímačom pri súčasnej situácii stien a podlahy (alternatívy 1–3).



Obrázok 3.34: Simulovaná Jasnosť zvuku (dB) v závislosti od vzdialenosti medzi zdrojom a prijímačom pri odrazivej situácii stien a podlahy (alternatívy 4–6).



Obrázok 3.35: Simulovaná Jasnosť zvuku (dB) v závislosti od vzdialenosti medzi zdrojom a prijímačom pri pohltivej situácii stien a podlahy (alternatívy 7–9).

3.4.4. Záver

V prípadovej štúdií bol skúmaný vplyv rozptylu povrchov na hladinu akustického tlaku, jasnosť zvuku a index prenosu reči. Zvýšený rozptyl ovplyvnil úroveň akustického tlaku iba v odrazivej situácii a v aktuálnej situácii (s približne 20 % zvukovou pohltivosťou na stenách a podlahe). Rozdiely pri pohltivej situácii boli zanedbateľné. Index prenosu reči bol ovplyvnený rozptylom v rámci hraníc JND. Len v pohltivej situácii sa pri väčších vzdialenostiach od zdroja prejavili rozdiely blízke 10 %. V prípade jasnosti zvuku boli rozdiely väčšie ako JND pozorované vo väčšine prípadov. Vyšší rozptyl vedie vo všeobecnosti k nižším hodnotám jasnosti zvuku len v prípade zvukovo pohltivej situácie. V ostatných dvoch prípadoch je to naopak.

4. ZÁVER

4.1. Hodnotenie cieľov

Cieľ 1: Preskúmať vplyv objemu a geometrie átria na akustický komfort.

Cieľ bol naplnený. Prostredníctvom numerických simulácií v softvéri Odeon® bola vyhodnotená závislosť parametrov T_{30} , STI, C_{80} a G od pôdorysného pomeru a výšky strešnej roviny pri konštantnom objeme. Výsledky potvrdili, že proporcie priestoru majú výrazný vplyv najmä na parametre zrozumiteľnosti a jasnosti.

Cieľ 2: Porovnať akustické vlastnosti zastrešenia z ETFE a skla.

Cieľ bol naplnený. V práci boli použité koeficienty pohltivosti na základe meraní z literatúry a realizované simulácie pre identické geometrie s oboma typmi materiálov. ETFE strecha preukázala zlepšenie parametrov zrozumiteľnosti v porovnaní so sklom, najmä pri nízkych a stredných frekvenciách.

Cieľ 3: Overiť vplyv rozloženia pohltivosti v priestore na akustický komfort.

Cieľ bol naplnený. Pomocou variantov A0–A3 a B1–B3 bola analyzovaná účinnosť rôzneho umiestnenia pohltivých plôch. Výsledky ukázali, že strategické rozmiestnenie pohltivých materiálov môže výrazne ovplyvniť nielen hodnoty T_{30} , ale aj rovnomernosť distribúcie akustického poľa.

Cieľ 4: Posúdiť význam rozptylu zvuku na vybrané akustické parametre.

Cieľ bol naplnený. V prípade štúdií simulujúcich prítomnosť publika alebo textúrovaných stien boli aplikované rôzne hodnoty súčiniteľa rozptylu podľa štandardov. Ukázalo sa, že rozptyl pozitívne ovplyvňuje parametre jasnosti a STI.

Cieľ 5: Zhodnotiť aplikovateľnosť jednotlivých riešení pri návrhu multifunkčných átrií.

Cieľ bol naplnený. V práci sú zhrnuté praktické odporúčania v nasledujúcej časti.

4.2. Závbery pre prax

- **Pohltivosť povrchov** sa podľa viacerých štúdií existujúcich átrií pohybuje v rozmedzí 20-25 percent. Ak je tato hodnota nižšia, výber zastrešenia môže spôsobiť nekvalitné prostredie z hľadiska akustického komfortu
- **Dlhé a úzke átriá (1:3)** majú najvyšší podiel vertikálnych stien, a preto je potrebné strategicky umiestniť pohltivé plochy minimálne na jednu z dvojice rovnobežných plôch (strop alebo podlaha, jedna z dlhých stien, jedna z krátkych stien), aby sa predišlo trepotavej ozvene a nepravidelnému rozloženiu zvukovej energie. Trepotavá ozvena predstavuje pre priestor problém v prípade ak je určený na prezentovanie hudby. V prípade reči obyčajne nespôsobuje zníženie akustického komfortu.
- **Zmena materiálu zastrešenia z tradičného skla na ETFE vankúše** vedie k zlepšeniu akustických podmienok v priestore, najmä v nízkych a stredných frekvenciách. ETFE vankúše v nízkych frekvenciách neodrážajú, ale prepúšťajú zvuk, čím dochádza k zníženiu počtu odrazov a teda aj k skráteniu celkového

dozvuku. Vo vyšších frekvenciách ETFE vankúše zvuk odrážajú ale vďaka ich tvaru prispievajú k difúznosti priestoru.

- **Vo átriách** je pre udržanie zrozumiteľnosti reči dôležité nielen optimalizovať objem a tvar, ale aj správne rozmiestniť pohlcujúce a rozptyľujúce prvky. Napríklad balkóny môžu mať zásadný vplyv na zlepšenie akustického komfortu ak sú správne navrhnuté.
- Má význam používať prvky s vysokým **koeficientom rozptylu**. Zistilo sa, že vyššie hodnoty povrchového rozptylu zvuku vedú k nižším hodnotám T_{30} , najmä stredných frekvenciách, ktoré sú problematické pre veľké átria s presklenou strechou.
- Pri pomere strán átria 1:1 je vplyvom zvyšujúcej sa výšky strechy nárast hodnôt času dozvuku výraznejší pri nízkych frekvenciách, čo platí aj pre ETFE aj sklo. Pri pomeroch strán 1:3 je najvýraznejší v stredných frekvenciách.
- Pri veľkých átriách (nad 13500 m³) nemá ďalšie zväčšovanie objemu signifikantný vplyv na predlžovanie času dozvuku.

4.3. Závery pre vedu

- Výskum potvrdil, že **akustické vlastnosti átrií nemožno spoľahlivo hodnotiť len pomocou tradičného parametra ako T_{30}** . Dôležitými doplňujúcimi faktormi pre popísanie akustického komfortu sú aj STI, Jasnosť (C_{50}/C_{80}), hladina akustického tlaku a jej rozloženie v rámci priestoru (popísaná napr. Silou zvuku G). .
- Využitie **transparentných membránových konštrukcií**, ako sú ETFE vankúše, predstavuje výzvu pri modelovaní – nie sú štandardizované koeficienty pohltivosti pre všetky typy a vrstvenia, čo znižuje presnosť simulácií a vyžaduje ďalší výskum, najmä meraním v reálnych podmienkach.
- Práca preukázala, že **objem a tvar priestoru ovplyvňujú nielen samotný čas dozvuku, ale aj jeho distribúciu**, čo má významný dopad na zrozumiteľnosť v rôznych častiach priestoru. Geometrické vlastnosti teda neslúžia len na estetické alebo dispozičné účely, ale priamo ovplyvňujú akustickú funkčnosť.
- Závery dizertačnej práce môžu slúžiť ako **východisko pre tvorbu doplňujúcich odporúčaní k existujúcim normám** (napr. STN 73 0527), ktoré zatiaľ nepostihujú

špecifiká veľkých zastrešených vnútorných priestorov s transparentnými konštrukciami.

5. POUŽITÁ LITERATÚRA

Kaššáková M., Urbán D., Vargová A., Rychtáriková M. 2017. Influence of sound scattering on reverberation time in large rooms. 2017.

Rubino, C., Liuzzi, S. a Martellotta, F. 2023. *Sustainable Sound Absorbers to Improve Acoustical Comfort in Atria: A Methodological Approach*. Bari : Dipartimento di Architettura, Costruzione e Design, Politecnico di Bari, 2023.

Rychtáriková M., Urbán D., Kaššáková M., Maywald C., Glorieux Ch. 2017. Perception of acoustic comfort in large halls covered by transparent structural skins. *Proceedings of meetings on acoustic*. 2017, Zv. 30, 1, s. 30.

Rychtáriková, M., Chmelík, V. a Urbán, D. 2019. *Akustika: stavebná a priestorová*. Bratislava : Eurostav, 2019.

Sluyts, Y., a iní. 2023. Determination of the sound absorption coefficient of ETFE cushions in-situ using the genetic material optimizer in Odeon®. 2023, Zv. 31, 1.

Urbán D. 2016. Comparative Study of the Acoustic Comfort in Atria, Covered by Foil and Glass-based Materials. *COST-STSM-TUI301-33175*. 2016.

Urbán, D., a iní. 2017. Influence of transparent roofing systems on room acoustic properties of large atria. *Akustika* . 2017, 28(1):97-102.

Vojteková E. 2016. *Presklené Átria*. Bratislava : ISBN: 978-80-227-4601-4, 2016.