



▲ Obr. 1. Celkový pohled

Nové interiéry poslucháren ČVUT s akustikou ze skla



Ing. arch. Ing. Vít Domkář

Absolvoval Fakultu stavební ČVUT v Praze, obor architektura a stavitelství. Od roku 2003 se zabývá projektovou činností v oboru pozemních staveb a urbanizmu. Od roku 2008 navrhuje a realizuje převážně akustické interiéry. V roce 2014 se stává členem firmy AVETON s.r.o., kde na pozici architekt-designér zajišťuje projekci a realizace atypických interiérů.
E-mail: domkar@aveton.cz



Ing. Tomáš Hrádek

V roce 2008 absolvoval Elektrotechnickou fakultu ČVUT v Praze. Od roku 2007 se věnuje akustice s hlubším zaměřením na prostorovou akustiku a měření akustických parametrů. V roce 2014 se stává členem firmy AVETON s.r.o., kde se kromě projektové činnosti a specializovaných akustických měření věnuje výzkumu a vývoji. Je autorizovaným technikem ČKAIT v oboru technika prostředí staveb.
E-mail: hradek@aveton.cz

Komplex budov Fakulty stavební ČVUT v Praze prochází již řadu let po etapách kontinuální rekonstrukcí. Nové pojetí interiérů je spojeno s modernizací provozního i estetického pojetí výukových prostor. S každou etapou jde také o významnou příležitost aplikace progresivních řešení, která se vyznačují využitím nových technologií a materiálů s inovativním pojetím interiérového designu. Vedle toho se zde odráží myšlenka stavby jako edukativního nástroje a zdroje inspirace pro samotné studenty.

Po realizaci atria D od architektonického studia VYŠEHRAD atelier s.r.o. v roce 2008 a série přednáškových sálů v budově C – jih v roce 2012 byla aktuálně dokončena další etapa v podobě přednáškových sálů v budově C – sever. Pod oběma realizacemi jsou podepsáni Ing. arch. Vladimír Gleich a Ing. arch. Ing. Vít Domkář.

Požadavkem uživatele bylo vytvořit moderní a technologicky funkční interiér, který je zároveň inspirativním prostředím pro studenty. Již architektonický koncept vznikl v součinnosti s odborníky na akustiku a volba akusticky vhodných a esteticky kvalitních materiálů dala vzniknout speciálním modulárním strukturám, které definují celkový design.

Vzhledem k atypickému řešení bylo nutné, aby i samotnou realizaci provedla odborná akustická firma. Garanci za korektní výsledek převzala firma AVETON s.r.o., jejíž tým zajišťoval optimalizace akustických parametrů pomocí průběžných měření a vyhodnocení.

Úzká spolupráce všech profesí byla pro pozitivní výsledek velmi důležitá a domníváme se, že tato realizace ji dobře reprezentuje.

Architektonické řešení

V severním traktu budovy C jde celkem o čtyři posluchárny stejného designového provedení. Liší se pouze barevností podlah, částí akustického podhledu a odlišnou povrchovou úpravou obkladů bočních stěn. Sály jsou situovány k prosklené fasádě budovy a mají kapacitu 128, respektive 84 posluchačů. Volbou a uspořádáním akusticky vhodných a esteticky kvalitních materiálů vzniká vizuálně velmi zajímavý interiér se stylem, blízkým technickému zaměření univerzity. Převládající materiály kov, sklo a buková překližka jsou doplněny detaily v černé barvě. Vizuální schéma stěn a stropů je záměrně monochromatické, aby se zvýraznila kvalita použitých materiálů, konstrukční detaily a barevné akcenty podlahových krytin a částí podhledu.

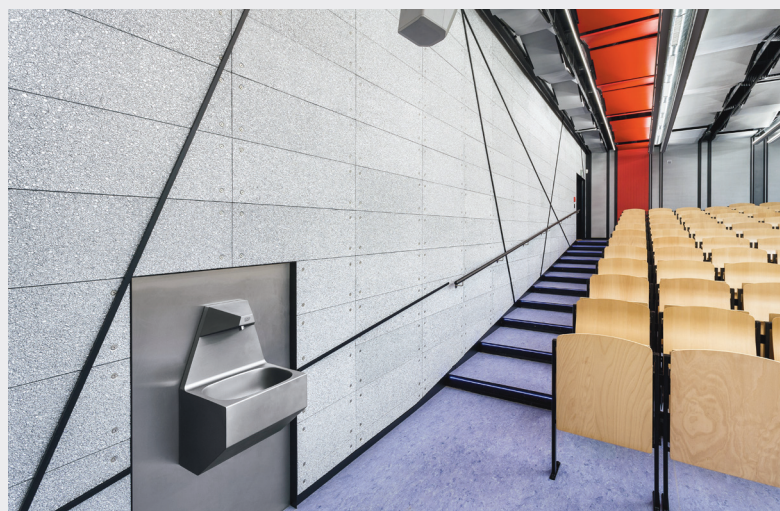
Důležitou součástí interiéru tvoří také umělé osvětlení, které je kompletně řešeno LED technologií. Světelnou scénu lze ovládat více oddělenými okruhy, které zajistí snadnou kontrolu jak provozního, tak efektního osvětlení. To slouží pro nepřímé nasvětlení podhledů a obkladů.

Podhled

Akustický podhled je plochou, která kromě své absorpční funkce zajišťuje formou distribuce zvuku dobrou slyšitelnost přednášeného slova i v zadních řadách. Tomu napomáhá členění jeho povrchu pomocí nakloněných odrazivých desek. Jejich sklon se pohybuje v rozmezí

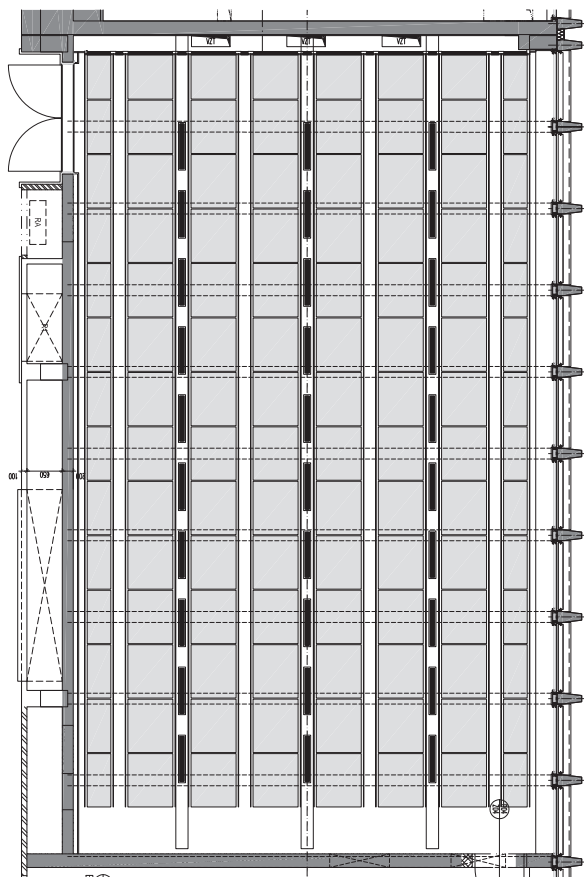


▲ Obr. 2. Celkový pohled

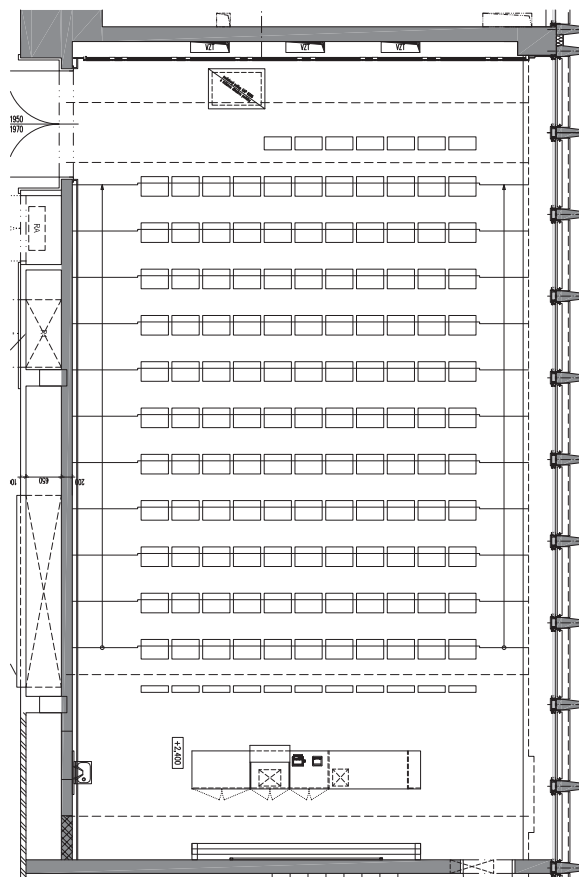


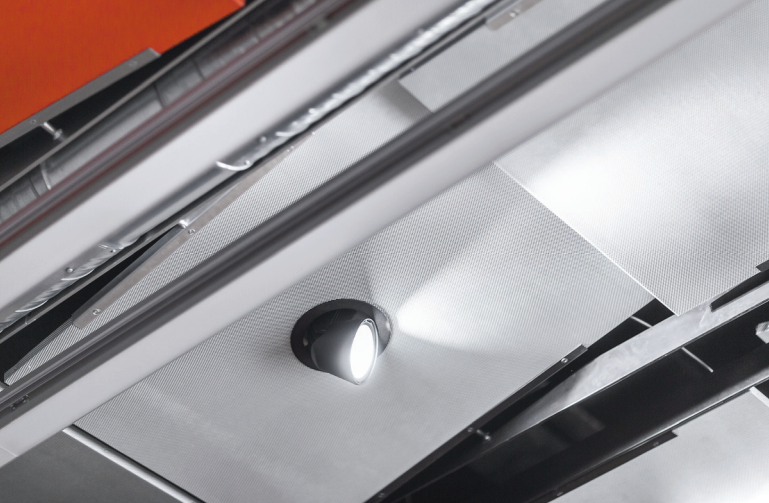
▲ Obr. 3. Pohled na boční stěnu

▼ Obr. 4. Podhled



▼ Obr. 5. Půdorys





▲ Obr. 6. Akustický pohled



▲ Obr. 7. Akustický obklad bočních stěn



▲ Obr. 8. Akustický obklad zadní stěny



▲ Obr. 9. Akustický obklad Glasio

▼ Obr. 10. Akustický obklad Glasio



+15° až -15° a vytváří sofistikovanou absorpčně-difuzní akustickou strukturu s otevřeným objemem. Do podhledu jsou integrována vzduchotechnická spiro potrubí s průběžnou výdechovou mřížkou. Nosné prvky podhledu jsou zhotoveny z masivních ocelových profilů a kazety jsou z MDF desek potažených jemným tahokovem. Převážná část povrchových úprav je provedena chromovým nástřikem, detaily jsou v černém laku. Podhledové segmenty se propisují do zadní stěny a pomocí vnitřní perforace vytvářejí plnohodnotný akustický absorbér.

Stěnové obklady

Obklady bočních stěn jsou řešeny zcela unikátním materiálem, akusticky pohltivým sklem, jehož charakter koresponduje s interiérovým záměrem. Ortogonální spárořez s diagonálními prvky dodávají interiéru měřítko a zajímavý detail. Obklad je montovaný na vynášecí rošt se vzduchovou mezerou, čímž je dosaženo optimální pohltivosti obkladu.

Obklad zadní stěny je z perforovaných panelů potažených tahokovem. Segmentace obkladu zajišťuje vizuální vazbu s podhledem. Přední stěna obložena není, je natřena černou malbou pro podporu celkové interiérové koncepce.

Podlaha

Pro zvýšení kapacity a z hlediska změny dispozic sálů byly vybudovány nové elevace. Jejich nosná konstrukce je ocelová a přes čela schodišťových stupňů je veden odtah VZT systému. Jako krytina je použito marmoleum různých barevných odstínů.

Inovace

Projekt využívá zcela nový materiál – zvukově pohltivé sklo Glasio. Jedná se o český, světově ojedinělý vynález, který přináší nové možnosti integrace akustiky do interiéru. Toto pohltivé sklo je akusticky velmi efektivním materiálem (v řečovém pásmu pohltí až 90 % dopadající zvukové energie), přitom je průsvitný a vysoce estetický.

Nezaměnitelný vzhled materiálu vzniká použitím skelné drti a recyklátu vybraných frakcí. Díky specifické technologii zvané sintrování se pevně spojí jednotlivé části drtě a zvýší třpytí povrchu. Vzniká tak autentická povrchová struktura, jejíž přidanou hodnotou je akustická absorpce.

Desky jsou spojeny pouze teplem a neobsahují žádné další příměsi. Z tohoto důvodu jsou ekologicky a hygienicky nezávadné a zcela nehořlavé. Pro jeho průsvitnost lze materiál kombinovat s umělým osvětlením integrovaným ve vzduchové mezeře za obkladem. Pomocí světla a jeho proměnlivosti přináší obklad Glasio zcela nové možnosti interiérového designu.

Velký potenciál využití je podpořen možností probarvení materiálu ve vlastní hmotě. V tomto případě lze pracovat jak se samotným odstínem barvy, tak s její intenzitou. Barvy ještě více umocní strukturu skla a dodají mu tak charakter luxusního materiálu.

Pro zvýšení pevnosti v tahu je do desek zatavena nerezová síť. Mechanické laboratorní zkoušky prokázaly, že výrobek je zcela bezpečný.

Akustika výukových prostor

Posluchárny jsou prostory s vysokými nároky na akustiku a zejména na srozumitelnost mluveného slova. Zvláště na půdě Fakulty stavební ČVUT v Praze by měl být jejich interiér pro studenty příjemný, zajímavý a v ideálním případě inspirující. Při projektování prostorové akustiky platí, že pokud se neomezujeme pouze na systémová řešení a máme možnost invenčně pracovat s novými materiály, může výsledné dílo optimálně kloubit estetiku a potřebné akustické funkce.

Jak již bylo zmíněno v úvodu, jedním z nejdůležitějších kvalitativních parametrů poslucháren a učeben je prostorová akustika. Kromě srozumitelnosti mluveného slova má zásadní význam také distribuce zvuku od přednášejícího směrem k posluchačům. Akustika prostoru má prokazatelný vliv na únavu a schopnost soustředění studentů i přednášejícího, a z toho důvodu se investice do jejího kvalitního řešení bezpochyby vyplatí.

Cílové akustické parametry výukových prostor jsou jednoznačně definovány v normě ČSN 73 0527 – Akustika – Projektování v oboru prostorové akustiky – Prostory pro kulturní účely – Prostory ve školách – Prostory pro veřejné účely – z března 2005, která je závazná podle vyhlášky č. 343/2009 sbírky zákonů ČR definující hygienické a provozní požadavky prostor a provozoven pro výchovu a vzdělávání dětí a mladistvých. Norma stanovuje optimální dobu dozvuku prostoru v závislosti na jeho objemu a funkční klasifikaci (viz obr. 14) a příslušné toleranční meze v závislosti na frekvenci (hodnoceno v oktávních pásmech v rozsahu 125 Hz až 4 kHz – viz obr. 15). V návrhu je nutné respektovat celý frekvenční průběh horní i dolní meze tolerance. V případě delší doby dozvuku klesá srozumitelnost mluveného slova. V případě přetlumení (kratší doby dozvuku) klesá zejména ve vzdálenějších místech poslucháren hlasitost mluveného slova přednášejícího a tím i odstup užitečného signálu od šumu (opět klesá srozumitelnost). Akustika výukových prostor má být podle normy hodnocena v obsazeném stavu (obsazenost 80–100 %).

V rámci řešení akustiky nelze uvažovat pouze o době dozvuku, ale o celkové koncepci v širším kontextu. Tím je myšlena zejména zmiňovaná distribuce zvuku a rozložení akustického pole. Kromě tvrdých zpožděných odrazů zvuku od zadní stěny je nutné eliminovat vznik třepotavé ozvěny, tedy násobných odrazů zvuku mezi dvěma rovnoběžnými odrazivými plochami.

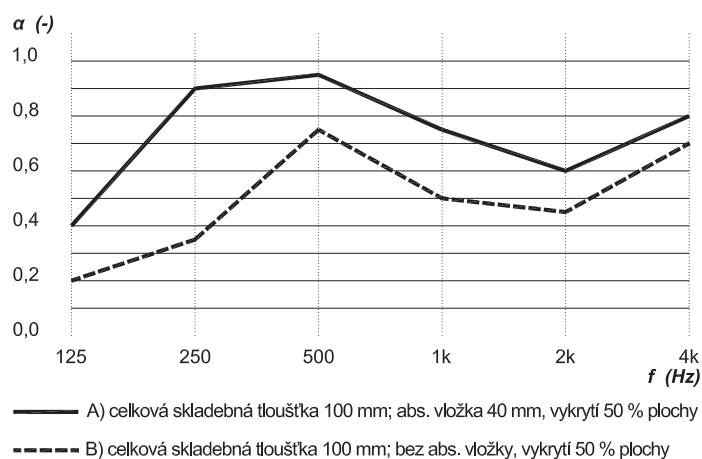
Akustiku lze řešit různými způsoby s použitím rozličných materiálů. Někdy je akustik nucen hledat na základě požadavků architekta nová atypická řešení a používat materiály v nových aplikacích (dřevo, keramika, sklo atd.). V takových případech je projektování do určité míry výzkumnou tvůrčí činností. Teoretické předpoklady funkčnosti nových akustických prvků bývají často již v této úvodní fázi podloženy akustickými měřeními



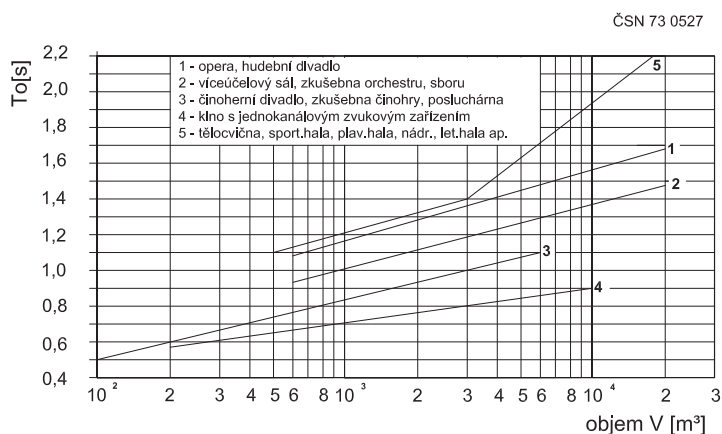
▲ Obr. 11. Probarvení pomocí transparentních barev



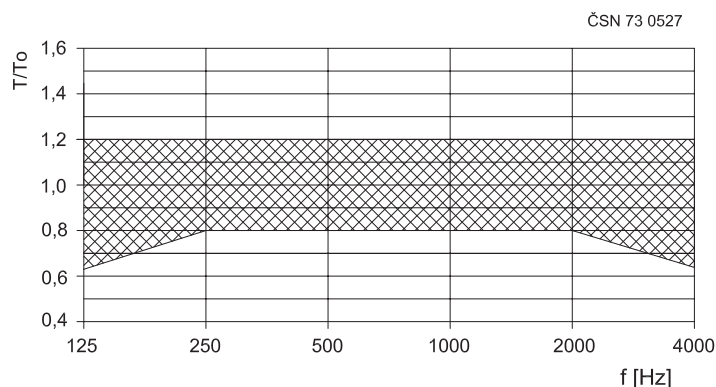
▲ Obr. 12. Detail struktury akustického obkladu Glasio



▲ Obr. 13. Graf činitele zvukové pohltivosti akustického obkladu Glasio



▲ Obr. 14. Závislost optimální doby dozvuku T_0 [s] pro kmitočet 1000 Hz na objemu V [m³] uzavřeného prostoru v obsazeném stavu (u závislosti č. 5 v neobsazeném stavu)



▲ Obr. 15. Přípustné rozmezí poměru doby dozvuku T/T_0 obsazeného prostoru určeného k přednesu řeči v závislosti na středním kmitočtu oktávnového pásma

(měření činitele zvukové pohltivosti pro kolmý dopad v impedanční trubici, měření činitele zvukové pohltivosti pro všesměrový dopad v dozvukové místnosti, měření činitele difuzity).

Základní informací je zamýšlené budoucí využití řešených prostor. V současnosti již v případě poslucháren není výjimkou požadavek na víceúčelové využití (promítání filmů, poslech reprodukováné i akustické hudby atd.). V takovém případě je účelné požadavek normy na optimální dobu dozvuku korigovat podle konkrétního požadavku.

Akustika řešených poslucháren

Prostorová akustika pracuje se všemi plochami a prvky interiéru (jejich velikostí, akustickými vlastnostmi a pozicemi v prostoru). Jejím úkolem je jak optimální ztlumení prostoru (parametry dané normou ČSN 73 0527), tak vhodná distribuce užitečného zvukového signálu v prostoru. Ta je důležitá z hlediska srozumitelnosti řeči, rovnoměrného rozložení akustického pole u posluchačů atd.

Empirický výpočet doby dozvuku byl proveden podle Eyringa:

$$T_E = \frac{0,163 \cdot V}{-S \cdot \ln(1 - \alpha_s) + 4mV} [s]$$

kde:

- $V [m^3]$ objem místnosti;
 $S [m^2]$ celková plocha ohraničujících stěn místnosti;
 $\alpha_s [-]$ střední hodnota činitele zvukové pohltivosti;
 $m_s [-]$ činitel útlumu zvuku při šíření ve vzduchu.

Střední hodnotu činitele zvukové pohltivosti vypočteme podle vztahu:

$$\alpha_s = \frac{\sum S_i \cdot \alpha_i}{S} [-]$$

kde:

- $S_i [m^2]$ dílčí pohltivá plocha;
 $\alpha_i [-]$ činitel zvukové pohltivosti dílčích ploch;
 $S [m^2]$ celková plocha ohraničujících stěn místnosti.

Pro případ ortogonálních prostor, u nichž hrozí zvýšené riziko vzniku třepotavé ozvěny, se používá empirický výpočet podle Fitzroye, který skutečnost nerovnoměrného rozložení absorpčních materiálů na jednotlivých rovnoběžných plochách zohledňuje:

▼ Obr. 16. Měření činitele zvukové pohltivosti v dozvukové místnosti – vzorek segmentového akustického podhledu



$$T_F = 0,163 \cdot \frac{V}{S^2} \left[\frac{-x}{\ln(1 - \alpha_x)} + \frac{-y}{\ln(1 - \alpha_y)} + \frac{-z}{\ln(1 - \alpha_z)} \right] [s]$$

kde:

- $x, y, z [m^2]$ celková plocha dvojice protilehlých stěn;
 $\alpha_{x,y,z} [-]$ střední hodnota činitele zvukové pohltivosti dvojice protilehlých stěn;
 $V [m^3]$ objem místnosti;
 $S [m^2]$ celková plocha ohraničujících stěn místnosti.

Střední hodnotu činitele zvukové pohltivosti pro jednotlivé dvojice protilehlých stěn vypočteme podle vztahu:

$$\alpha_{x,y,z} = \frac{\sum S_i \cdot \alpha_i}{S} [-]$$

kde:

- $S_i [m^2]$ dílčí pohltivá plocha;
 $\alpha_i [-]$ činitel zvukové pohltivosti dílčích ploch;
 $S [m^2]$ celková plocha ohraničujících stěn místnosti.

Výpočet doby dozvuku zohledňuje i zvukové pohltivosti prvků a konstrukcí, které nejsou definovány jako akustický obklad. Jejich vliv na výsledné akustické parametry a akustické prostředí nelze pominout (přítomné osoby, nábytek, sedadla atd.)

Koncepce akusticko-interiérového řešení se ve všech posluchárnách shoduje. Optimální dobu dozvuku volíme podle jejich objemu (viz tab. 1). Vzhledem k profilaci segmentového podhledu byl však jeho výpočet do určité míry orientační. Výšku poslucháren jsme uvažovali jako střední hodnotu výšky jednotlivých segmentů, přestože prostor nad podhledem není uzavřený (jedná se o přístup z hlediska empirického výpočtu).

Prostor	Objem [m³]	Optimální doba dozvuku T_0 [s]
Posluchárna C 202, C 206	540	0,70
Posluchárny C 204, C 208	440	0,65

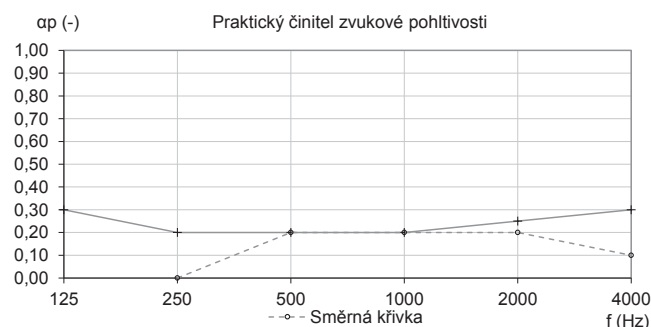
▲ Tab. 1. Optimální doba dozvuku v závislosti na objemu poslucháren

Stěnové obklady

Obklad zadní stěny se vertikálně člení a kontinuálně přechází do podhledové části. Perforace panelu je provedena ve střední části tak, aby zabránila silnému odrazu zvuku zpět k přednášejícímu. Perforace je skryta za průzvučnou vrstvou pohledového tahokovu. Do dutiny sendvičové struktury je umístěn akustický absorbér, který mění frekvenční průběh činitele zvukové pohltivosti a zajišťuje jeho velmi dobrou kmitočtovou vyrovnanost.

Akustický obklad bočních stěn je plnoplošně tvořen jednotným materiálem – skleněnou deskou Glasio. Hlavní úlohou obkladu je přispět k celkovému ztlumení prostoru a eliminovat vznik třepotavé ozvěny mezi rovnoběžnými bočními stěnami.

Desky jsou zavěšovány na vyrovnavací nosný rošt, který v sobě



▲ Obr. 17. Výsledky měření činitele zvukové pohltivosti v dozvukové místnosti typové části segmentového akustického podhledu

navíc integruje funkci laťového rezonátoru. Právě toto provedení nosné konstrukce dovoluje využít celou vnitřní dutinu obkladu a zefektivňuje akustickou funkci.

K čelní stěně je přisazena rozměrná posuvná tabule překrývající značnou část její plochy. Tato stěna je zcela bez akustických obkladů.

Podhled

Stropní podhled je komplexním akustickým celkem s funkcí širokopásmového absorbéru s frekvenčně vyrovnaným průběhem činitele zvukové pohltivosti. Podhled je dvouvrstvý. Vrchní, neviditelná část černé akustiky je formou rozměrných tvárnicevých rezonátorů umístěných kontaktně na stávající stop (maximum činitele zvukové pohltivosti v oktávovém pásmu je 125 Hz). Spodní, podhledová část tvoří strukturovaný, částečně otevřený pohled, jehož tvar a materiálové řešení jsou důležité pro vhodnou distribuci zvuku v prostoru hlediště mezi posluchače.

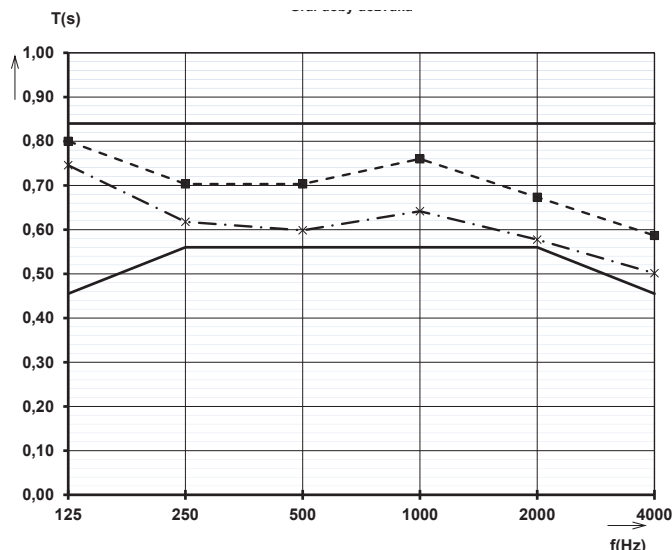
Vzhledem ke značné otevřené ploše mezi jednotlivými segmenty je objem prostoru nad podhledem z akustického hlediska plnohodnotně funkční. Část zvuku vstupuje otevřenou plochou nad úroveň podhledu, kde je zvuk dílčím způsobem pohlcen, nebo se s časovým zpožděním vrací zpět do prostoru posluchárny.

Vzhledem k atypickému podhledu byl činitel zvukové pohltivosti určen na základě teoretického předpokladu s určitou mírou nejistoty. V projektu bylo uvažováno s aplikací absorpční vložky v podobě minerální vlny položené na podhledových panelech – s tím, že její množství bude korigováno na základě výsledků měření činitele zvukové pohltivosti v dozvukové místnosti a dále na základě etapových měření na stavbě in situ. Absorpční vložka představovala jednoduchý korekční faktor akustického řešení posluchárny.

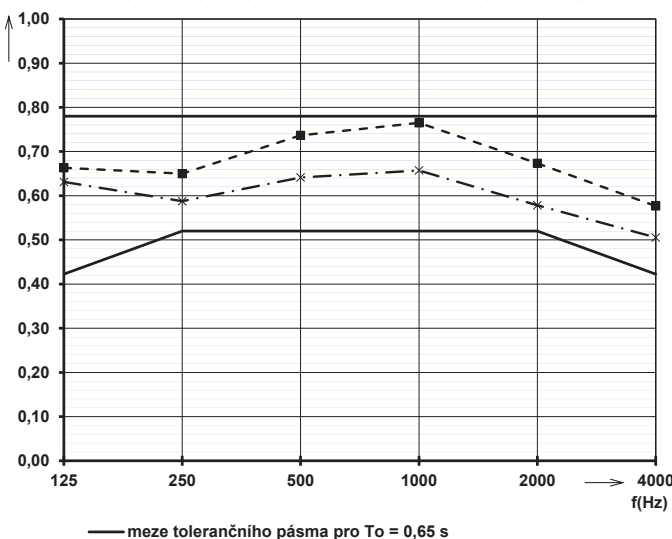
Detailní závěrečné akustické měření bylo uskutečněno v neobsazeném stavu a pro výsledné zhodnocení a porovnání s mezi tolerančního pásma byla 80% obsazenost poslucháren teoreticky dopočtena. Grafy na obr. 18 a 19 dokumentují, že výsledná doba dozvuku odpovídá hodnotám definovaným požadavkem normy.

Základní údaje o stavbě

Název stavby:	Rekonstrukce poslucháren ČVUT Fakulty stavební, budova C – sever
Investor:	České vysoké učení technické v Praze
Generální projektant:	GREBNER – projektová a inženýrská kancelář spol. s r. o.
Generální dodavatel:	Ridera Stavební a.s.
Autoři interiérů:	Ing. arch. Vladimír Gleich, Ing. arch. Ing. Vít Domkář
Řešení prostorové akustiky:	Ing. Tomáš Hrádek, Ing. Karel Motl
Dodavatel prostorové akustiky:	AVETON s.r.o.



▲ Obr. 18. Výsledky závěrečného měření doby dozvuku v posluchárně C 202 (zcela totožné s posluchárnou C 206) v neobsazeném stavu a výsledky po dopočtení pohltivé plochy osob při 80% obsazenosti posluchárny



▲ Obr. 19. Výsledky závěrečného měření doby dozvuku v posluchárně C 208 (zcela totožné s posluchárnou C 204) v neobsazeném stavu a výsledky po dopočtení pohltivé plochy osob při 80% obsazenosti posluchárny

english synopsis

New Interiors of Czech Technical University Lecture Rooms with Glass Acoustic Panels

The campus of the Faculty of Civil Engineering, Czech Technical University (ČVUT), has been going through a continuous renovation for years. The user's requirement was to create a modern and technologically functioning interior. The architectural concept was elaborated in cooperation with acoustic experts and specialists and the choice of high quality materials in terms of their acoustic properties and appearance gave rise to special modular structures that define the entire design.

klíčová slova:

posluchárny ČVUT, akustický obklad Glasio

keywords:

lecture rooms of ČVUT, Glasio acoustic panel