

Akustická studie

ŘEŠENÍ PROSTOROVÉ AKUSTIKY

Právnická fakulta Masarykovy univerzity

Objednatel: **Masarykova univerzita, Veveří 158/70, 611 80 Brno**

Číslo zakázky: **19 007**

Počet stran: **14**

Zhotovitel:



AKUSTING, spol. s r. o., Cejl 76, 602 00 BRNO
tel.+ fax +420 545 210 297

Měřili: **Ing. Miroslav Dostál, Ing. Hana Vojířová**

Vypracoval: **Ing. Miroslav Dostál**

Kontrolovala: **Ing. Hana Vojířová**

Datum: **28. ledna 2019**

Veškerá práva k využití si vyhrazuje AKUSTING společně se zadavatelem. Výsledky obsažené v dokumentaci jsou duševním vlastnictvím firmy AKUSTING. Jejich veřejná publikace a další využití nad rámec původního smluvního určení nebo předání třetí osobě je vázáno na souhlas zpracovatele.

AKUSTING, spol. s r. o. je držitelem certifikátů systému managementu kvality ČSN EN ISO 9001:2016 pro činnosti "zpracování akustických studií, projektů a realizace protihlukových opatření".

DIČ: CZ 27679748
IČO: 27679748

e-mail: akusting@akusting.cz
http:// www.akusting.cz

OBSAH

1	ÚVOD	3
2	LEGISLATIVA	3
3	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	3
4	OBSAH PRÁCE	4
5	LEGISLATIVA	4
6	MĚŘENÍ DOBY DOZVUKU UČEBEN	5
6.1	Popis měření	5
6.2	Měřicí aparatura	5
6.3	Výsledky měření	5
6.4	Nejistota měření	8
6.5	Zhodnocení výsledků zkoušky	8
7	NÁVRH AKUSTICKÉHO ŘEŠENÍ UČEBNY 160	10
7.1	Učebna 160	10
7.2	Učebna 302	11
8	ZÁVĚREČNÝ KOMENTÁŘ	13
9	POPIS NAVRŽENÝCH AKUSTICKÝCH MATERIÁLŮ	13
9.1	Pohltivost navržených obkladů	13
9.2	Popis navržených obkladů	14

1 Úvod

Tato zpráva obsahující měření, výpočty a vyhodnocení s ohledem na platnou legislativu byla vypracována jako podklad pro návrh množství a typu akustických prvků v prostorách dvou typových učeben Právnické fakulty Masarykovy univerzity v Brně. Zakázka je vedena pod číslem 19 007.

Pro posouzení jsou použity příslušné normy ČSN a odborná literatura.

Úkolem práce bylo zjištění stávajících akustických parametrů a návrh akustických řešení prostorů směřujících k dosažení optimálních poslechových podmínek.

2 Legislativa

- 1 ČSN EN ISO 3382-1: Akustika. Měření parametrů prostorové akustiky. Část 1: Prostory pro přednes hudby a řeči. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví; prosinec 2009.
- 2 ČSN EN ISO 3382-2: Akustika. Měření parametrů prostorové akustiky. Část 2: Doba dozvuku v běžných prostorech. Úřad pro technickou normalizaci a státní zkušebnictví; únor 2009.
- 3 ČSN 73 0525: Akustika. Projektování v oboru prostorové akustiky. Prostory pro kulturní účely. Prostory ve školách. Prostory pro veřejné účely. Český normalizační institut. Únor 1998.
- 4 ČSN 73 0527: Akustika. Projektování v oboru prostorové akustiky. Prostory pro kulturní účely. Prostory ve školách. Prostory pro veřejné účely. Český normalizační institut; březen 2005.
- 5 ČSN EN ISO 11654: Akustika. Absorbéry zvuku používané v budovách. Hodnocení zvukové pohltivosti. Český normalizační institut; prosinec 1998.
- 6 Výstavba školských zařízení – Akustické řešení školních staveb; Ministerstvo školství ČR; duben 1972.
- 7 Výkresová dokumentace, zakreslení stávajícího stavu; Oddělení facility managementu SUKB MU, Brno; březen 2018.

3 Seznam použitých zkratk a symbolů

f	$[Hz]$	- frekvence
T	$[s]$	- doba dozvuku
T_0	$[s]$	- optimální doba dozvuku
T_{20}	$[s]$	- doba dozvuku určená z poklesu v rozmezí 5 až 25 dB
T_{30}	$[s]$	- doba dozvuku určená z poklesu v rozmezí 5 až 35 dB
T_N	$[s]$	- doba dozvuku neupraveného prostoru
T_U	$[s]$	- doba dozvuku upraveného prostoru
V	$[m^3]$	- objem místnosti
c	$[m.s^{-1}]$	- rychlost šíření zvuku ve vzduchu
d_{min}	$[m]$	- minimální vzdálenost mikrofonu od zdroje
α_w	$[0]$	- vážený činitel zvukové pohltivosti
α	$[0]$	- činitel zvukové pohltivosti
$\alpha_{125-4kHz}$	$[0]$	- frekvenční průběh zvukové pohltivosti v oktávách
$\sigma(T_{20})$	$[s]$	- směrodatná odchylka výsledku měření T_{20}
$\sigma(T_{30})$	$[s]$	- směrodatná odchylka výsledku měření T_{30}
TP	$[-]$	- toleranční pásmo

4 Obsah práce

Obsahem studie je řešení dvou typových učeben vedoucí ke zlepšení poslechových podmínek.

Struktura: • měření doby dozvuku v učebnách;

• vyhodnocení výsledků a modelace prostorů;

• návrh řešení prostorové akustiky na základě akustických výpočtů.

5 Legislativa

Normy **ČSN 73 0527** a **ČSN 73 0525** uvádí zásady pro projektování a realizaci uzavřených prostorů pro kulturní účely, prostorů ve školách a prostorů pro veřejné účely. Platí pro nově zřizované, rekonstruované nebo adaptované prostory, v nichž kvalita poslechových podmínek či akustická pohoda hraje významnou roli. Rozhodujícím krokem pro vytvoření příznivých akustických poměrů v uzavřeném prostoru je dosažení optimální doby dozvuku, odpovídající danému účelu prostoru.

Pro uzavřené prostory pro kulturní účely, prostory ve školách a prostory pro veřejné účely stanovují normy pro daný objem místnosti V [m^3] a s ohledem na využití místnosti optimální dobu dozvuku T_0 [s] a přípustné rozmezí poměru dob dozvuku T/T_0 v závislosti na středním kmitočtu oktávového pásma. Důležité je, aby byla doba dozvuku ve frekvenčním spektru vyrovnaná.

V normě jsou uvedeny hodnoty optimální doby dozvuku pro místnosti o objemu nad 100 m^3 . Pro místnosti menší je možné hodnoty T_0 odečíst z grafu dle příslušné křivky. Učebny posuzujeme jako „Učebny a posluchárny“ a hodnotíme je v obsazeném stavu.

Učebna 160

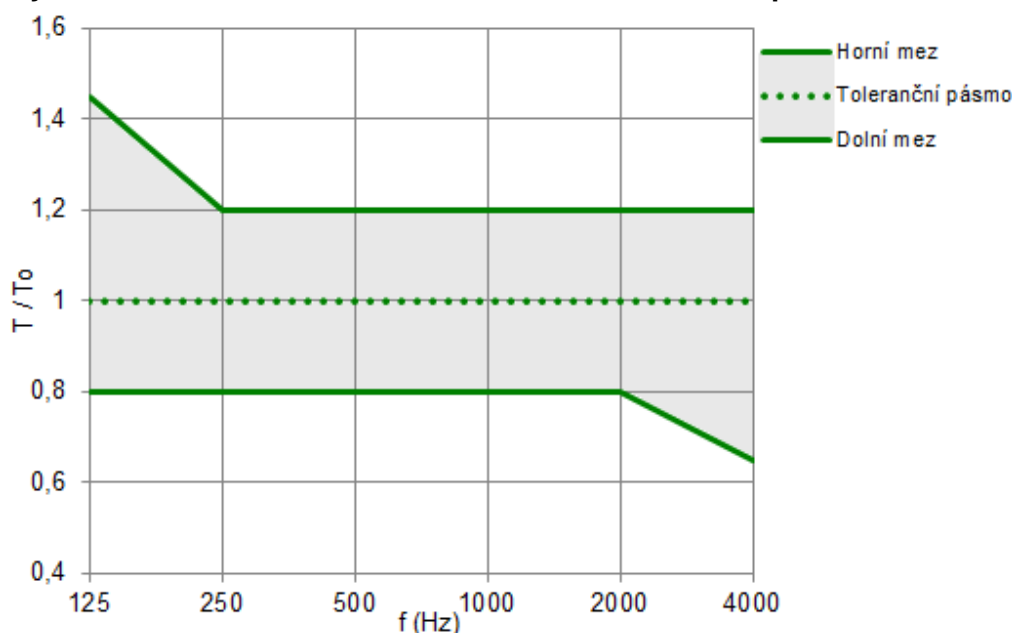
195 $m^3 \rightarrow T_0 = 0,6$ s

Učebna 302

292 $m^3 \rightarrow T_0 = 0,7$ s

Přípustná toleranční pásma pro odchylky doby dozvuku od optimální hodnoty (T/T_0) jsou uvedena v grafu 5.1. Odpovídající toleranční pásmo je určeno převažujícím typem signálu v posuzované místnosti. Doba dozvuku se vypočte pro oktávová pásma od 125 Hz do 4000 Hz.

Graf 5.1: Přípustné rozmezí poměru dob dozvuku T/T_0 obsazeného prostoru určeného k přednesu hudby i řeči v závislosti na středním kmitočtu oktávového pásma



Tab. 5.1: Toleranční pásmo obsazeného prostoru pro přednes hudby i řeči

TOLERANČNÍ PÁSMO						
f [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
TP Horní mez	1,45	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20
TP Střed	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
TP Dolní mez	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,65

6 Měření doby dozvuku učeben

6.1 Popis měření

Měření doby dozvuku T_{20} a T_{30} ve dvou učebnách bylo provedeno metodou přerušovaného šumu. Jako zdroj šumu byl použit vnitřní generátor zvukoměru 2250. Bylo použito růžového šumu, který byl reprodukován pomocí všesměrového zdroje. Celkem bylo v každé z učeben provedeno měření v minimálně osmi různých kombinacích polohy všesměrového zdroje a polohy mikrofону. Vzdálenost od kterékoliv polohy mikrofону k nejbližšímu odrazivému povrchu, včetně podlahy byla větší jak čtvrtina vlnové délky, tj. normálně kolem 1 m. Při měření byl mikrofon umisťován do výšky 1,5 m nad úroveň podlahy.

Doba dozvuku T_{20} resp. T_{30} byla vypočtena ze sklonu křivky poklesu akustického tlaku v části -5 až -25 dB resp. -5 až -35 dB pod počáteční úroveň jako doba potřebná k poklesu hladiny o 60 dB v oktákových pásmech 125 Hz až 4 kHz. Výsledná doba dozvuku každého prostoru byla následně vypočtena jako aritmetický průměr ze všech naměřených dob dozvuku pro dané kmitočtové pásmo.

6.2 Měřicí aparatura

Zvukoměr: 2250, v. č. 2611534, ověř. list 8012-OL-10183-17 z 31. 3. 2017, platnost do 4. 4. 2019

Mikrofon: 4189, v. č. 2983517, ověř. list 8012-OL-10184-17 z 31. 3. 2017, platnost do 4. 4. 2019

Třída přesnosti měřidel: 1

Akustický kalibrátor: 4230, v. č. 1639122, kalibr. list 8012-KL-10185-17 z 3. 4. 2017, platnost do 2. 4. 2019

Výrobce přístrojů: Brüel & Kjaer, Dánsko

Všesměrový zdroj hluku: DODECAHEDRON, číslo karty zařízení 012

Výkonový zesilovač: QSC AUDIO RMX 1450, v. č. 110626402

Generátor šumu: Vnitřní generátor zvukoměru 2250

Stáčecí metr: JOBI, i. č. SM-145-06, kalibr. list KL-P06892/2016, kalibrace 29. 6. 2016, platnost do 28. 6. 2026

Commetr: C 3120, v.č. 07900040, kalibr. list 7561F/13, kalibrace 24. 9. 2013, platnost do 23. 9. 2023

Anemometr EXTECH: 45158, v. č. 09596, kalibr. list 6015-KL-P0737-18, kalibrace 18. 10. 2018, platnost do 17. 10. 2028

6.3 Výsledky měření

Měření bylo provedeno v kmitočtovém rozsahu 50 Hz až 10 kHz. Hodnocení dle legislativy se provádí pouze v kmitočtovém rozsahu třetinooktákových pásem 100 Hz až 5 kHz.

6.3.1 Doba dozvuku učebny 160

Tab. 6.1: Průměrná doba dozvuku (průměrovaná z poloh 1 až 8) T_{20} a T_{30} včetně nejistoty, resp. směrodatné odchylky výsledku měření.

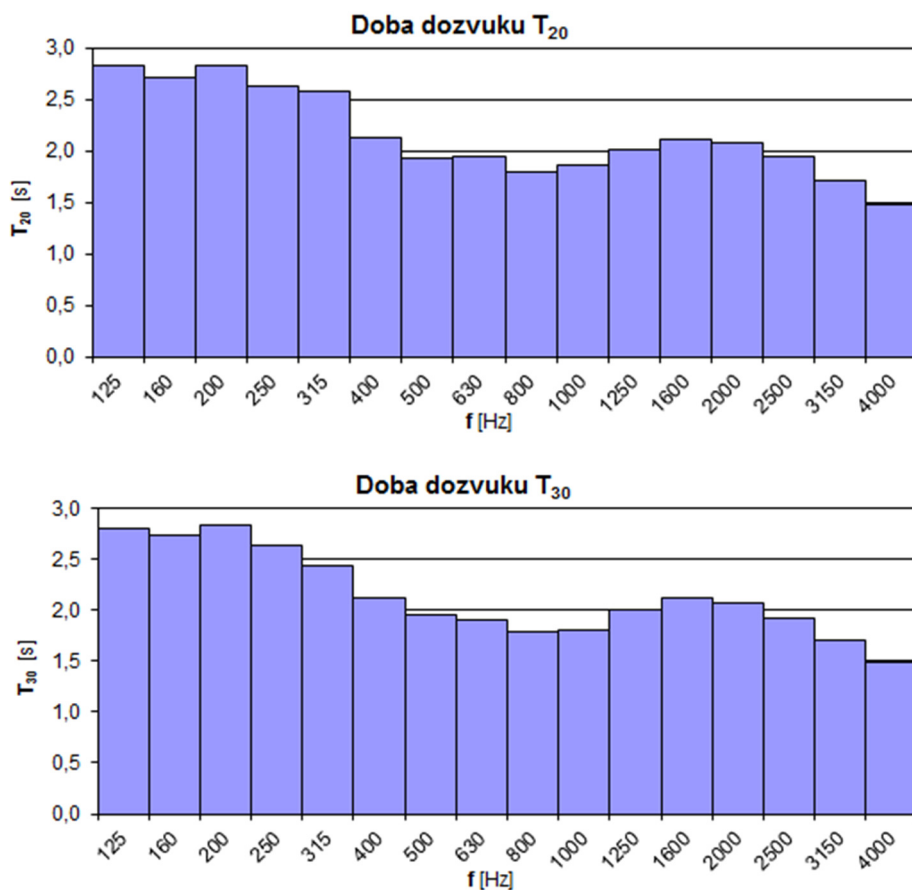
f [Hz]	T_{20} [s]	T_{30} [s]	$\sigma(T_{20})$ [s]	$\sigma(T_{30})$ [s]
100	3,20	3,24	0,15	0,09
125	2,84	2,80	0,12	0,07
160	2,72	2,74	0,11	0,07
200	2,84	2,84	0,10	0,06
250	2,63	2,64	0,09	0,05
315	2,58	2,43	0,08	0,04
400	2,13	2,12	0,06	0,04
500	1,92	1,96	0,05	0,03
630	1,95	1,91	0,05	0,03
800	1,80	1,80	0,04	0,02
1000	1,86	1,81	0,04	0,02
1250	2,00	2,01	0,03	0,02
1600	2,11	2,11	0,03	0,02
2000	2,08	2,06	0,03	0,02
2500	1,94	1,93	0,02	0,01
3150	1,71	1,71	0,02	0,01
4000	1,48	1,49	0,02	0,01
5000	1,24	1,24	0,01	0,01

f [Hz]	T_{20} [s]	T_{30} [s]
125	2,92	2,92
250	2,68	2,64
500	2,00	2,00
1000	1,89	1,87
2000	2,04	2,04
4000	1,48	1,48

$$T_{20} = 2,2 \text{ s}$$

$$T_{30} = 2,2 \text{ s}$$

Graf 6.1: Doba dozvuku T_{20} a T_{30} učebny 160



6.3.2 Doba dozvuku učebny 302

Tab. 6.2: Průměrná doba dozvuku (průměrovaná z poloh 1 až 11) T_{20} a T_{30} včetně nejistoty, resp. směrodatné odchylky výsledku měření.

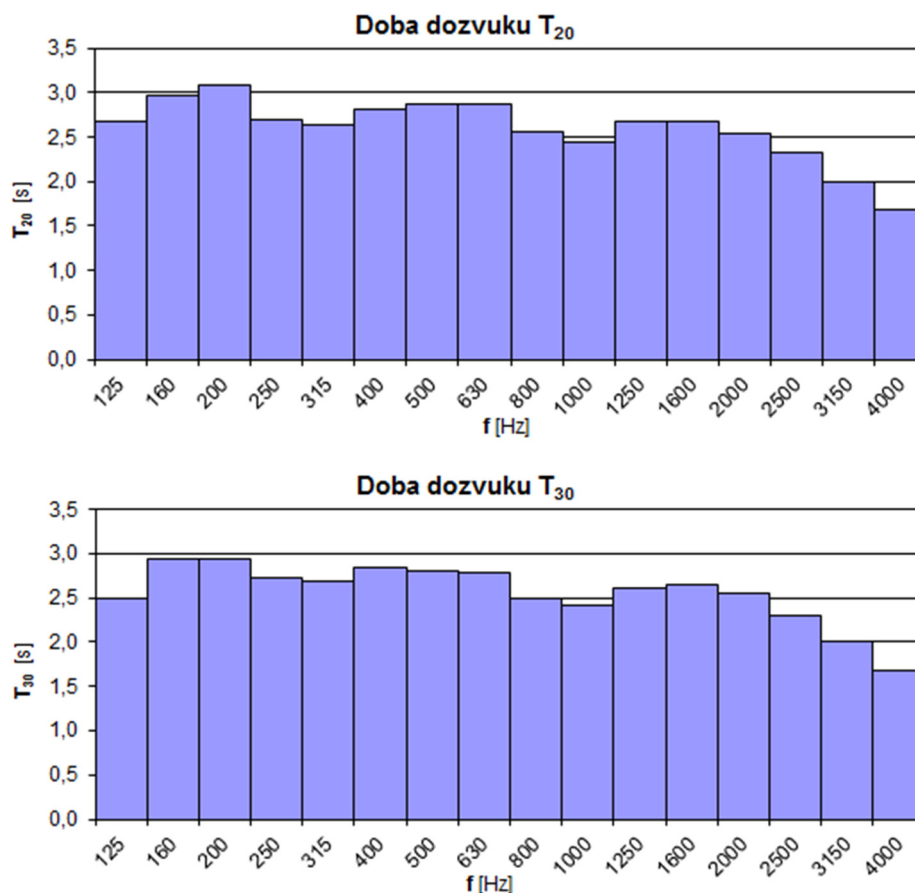
f [Hz]	T_{20} [s]	T_{30} [s]	$\sigma(T_{20})$ [s]	$\sigma(T_{30})$ [s]
100	2,39	2,34	0,11	0,06
125	2,69	2,49	0,10	0,06
160	2,98	2,94	0,10	0,06
200	3,08	2,95	0,09	0,05
250	2,70	2,72	0,07	0,04
315	2,64	2,68	0,06	0,04
400	2,80	2,84	0,06	0,04
500	2,87	2,80	0,05	0,03
630	2,87	2,79	0,05	0,03
800	2,56	2,49	0,04	0,02
1000	2,43	2,42	0,03	0,02
1250	2,68	2,62	0,03	0,02
1600	2,67	2,65	0,03	0,02
2000	2,55	2,55	0,03	0,02
2500	2,32	2,31	0,02	0,01
3150	1,99	2,01	0,02	0,01
4000	1,68	1,68	0,01	0,01
5000	1,34	1,34	0,01	0,01

f [Hz]	T_{20} [s]	T_{30} [s]
125	2,69	2,59
250	2,81	2,78
500	2,85	2,81
1000	2,56	2,51
2000	2,51	2,50
4000	1,67	1,68

$$T_{20} = 2,5 \text{ s}$$

$$T_{30} = 2,5 \text{ s}$$

Graf 6.2: Doba dozvuku T_{20} a T_{30} učebny 302



6.4 Nejistota měření

Nejistota měření silně závisí na počtu zjištěných průměrů. Skupinové průměrování nebo průměrování jednotlivých dob dozvuku vykazuje stejné závislosti na počtu průměrů. Směrodatná odchylka výsledku měření je dána vztahy:

$$\sigma(T_{20}) = 0,88T_{20} \sqrt{\frac{1 + (1,90/n)}{NBT_{20}}}$$

$$\sigma(T_{30}) = 0,55T_{30} \sqrt{\frac{1 + (1,52/n)}{NBT_{30}}}$$

kde B je šířka pásma v hertzech. Pro oktávový filtr $B = 0,71f_s$ a pro třetinooktávový filtr $B = 0,23f_s$, kde f_s je střední kmitočet pásma filtru.

n počet poklesů změřených v každém místě

N počet nezávislých míst měření (kombinací míst zdroje a příjmu)

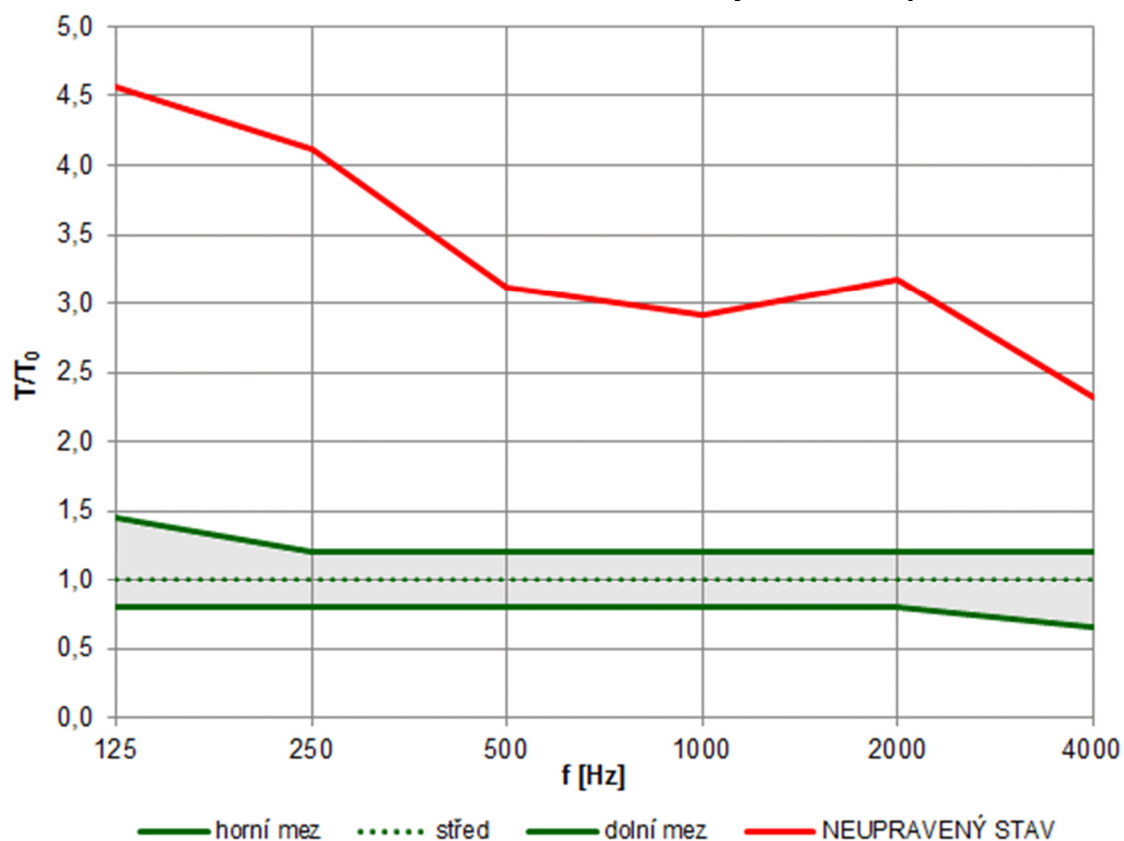
6.5 Zhodnocení výsledků zkoušky

V grafech je znázorněn kmitočtový průběh doby dozvuku v třetinooktávových pásmech v prostoru a jeho porovnání s optimální dobou dozvuku.

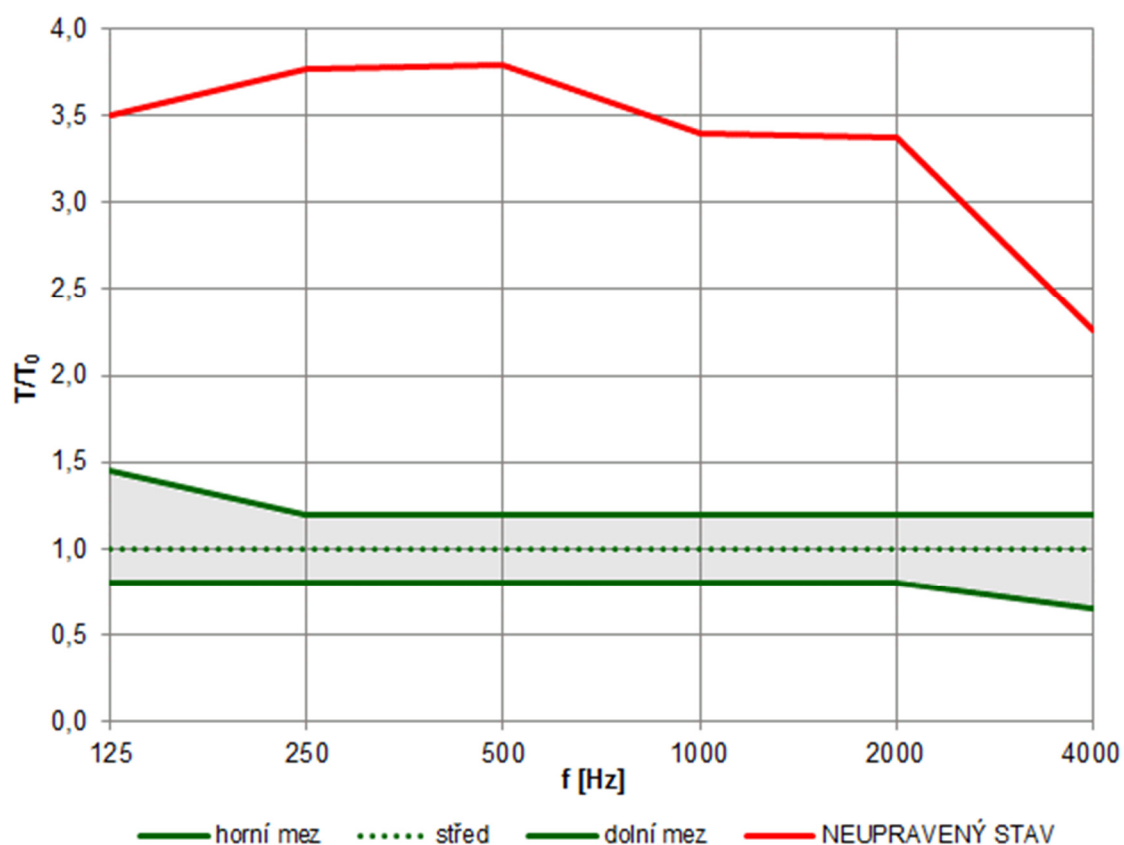
Průměrná doba dozvuku v prostoru **učebny 160** je $T_{30} = 2,2 \text{ s}$, průměrná doba dozvuku v prostoru **učebny 302** je $T_{30} = 2,5 \text{ s}$. Z definice je doba dozvuku časové rozpětí, ve kterém hladina akustického tlaku A po vypnutí zvukového zdroje klesne o 60 dB. Z toho plyne, že čím je tato doba vyšší, tím déle doznívá hluk v této místnosti produkovaný. Dle tabulky 2 normy ČSN 730527 posuzujeme učebny jako „Učebny a posluchárny“, požadavek $T_0 = 0,7 \text{ s}$.

Z měření jsou zřejmé vysoké hodnoty doby dozvuku v celé části spektra, akustické úpravy by měly snížit dobu dozvuku v celém kmitočtovém pásmu.

Graf 6.3: Grafické znázornění dozvuku vzhledem k normovým mezím v prostoru učebny 160



Graf 6.4: Grafické znázornění dozvuku vzhledem k normovým mezím v prostoru učebny 302



7 Návrh akustického řešení učebny 160

Pro optimální poslechové podmínky posuzujeme následující akustické úpravy, podložené akustickými výpočty dle Eyringa.

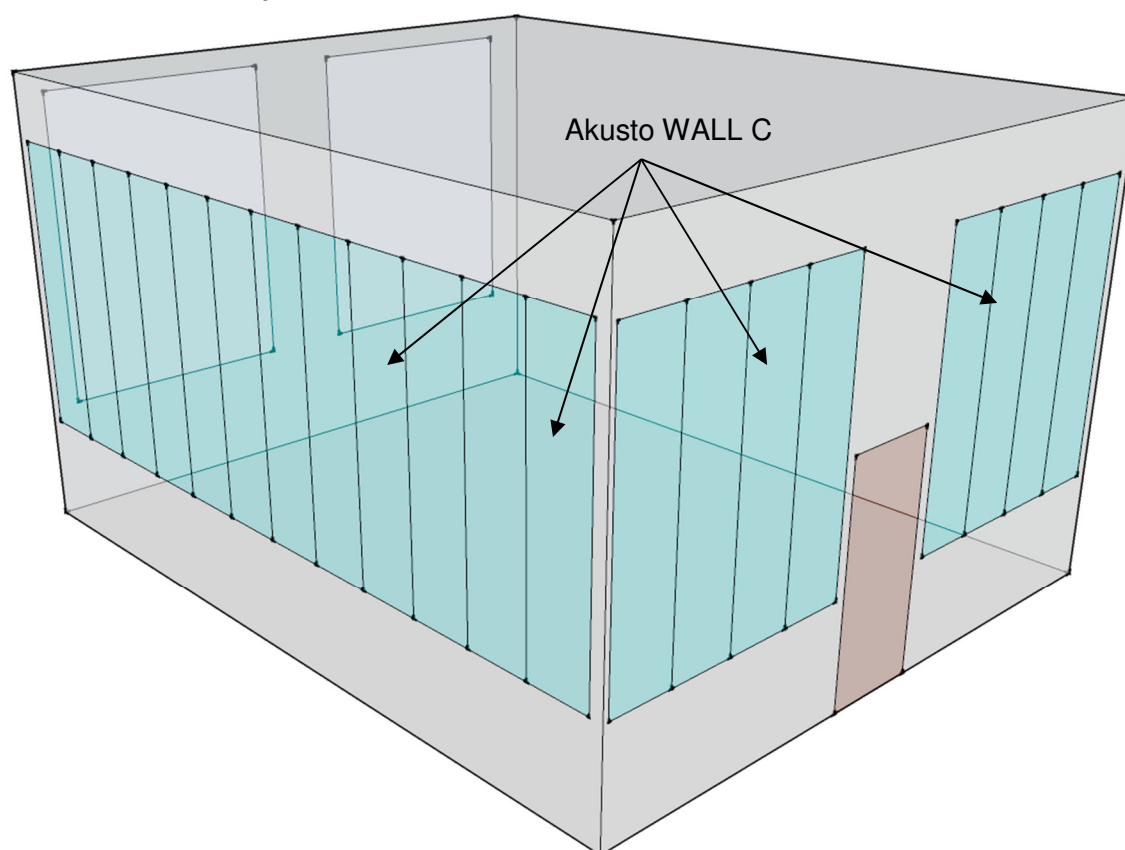
V následující kapitole jsou přiloženy výsledky výpočtů po úpravě učeben akustickými obklady. Návrh ctí požadavek objednatele instalovat úpravy na stěny a použít při tom stejné panely jako jsou již v některých učebnách instalovány.

7.1 Učebna 160

Posuzovaná učebna má obdélníkový půdorys. Na podlaze je PVC, strop a stěny jsou omítnuté. Všechny povrchy jsou velmi odrazivé. V učebně je místo pro 33 osob.

Zadní a boční stěna místnosti budou upraveny pomocí akustického obkladu z minerální vaty. Výpočet byl proveden s deskami **Ecophon Akusto Wall C** s povrchovou úpravou **Super G**. Desky mají tloušťku 40 mm, celková hloubka systému je 50 mm. Počet panelů je 20 o celkové ploše cca 33 m².

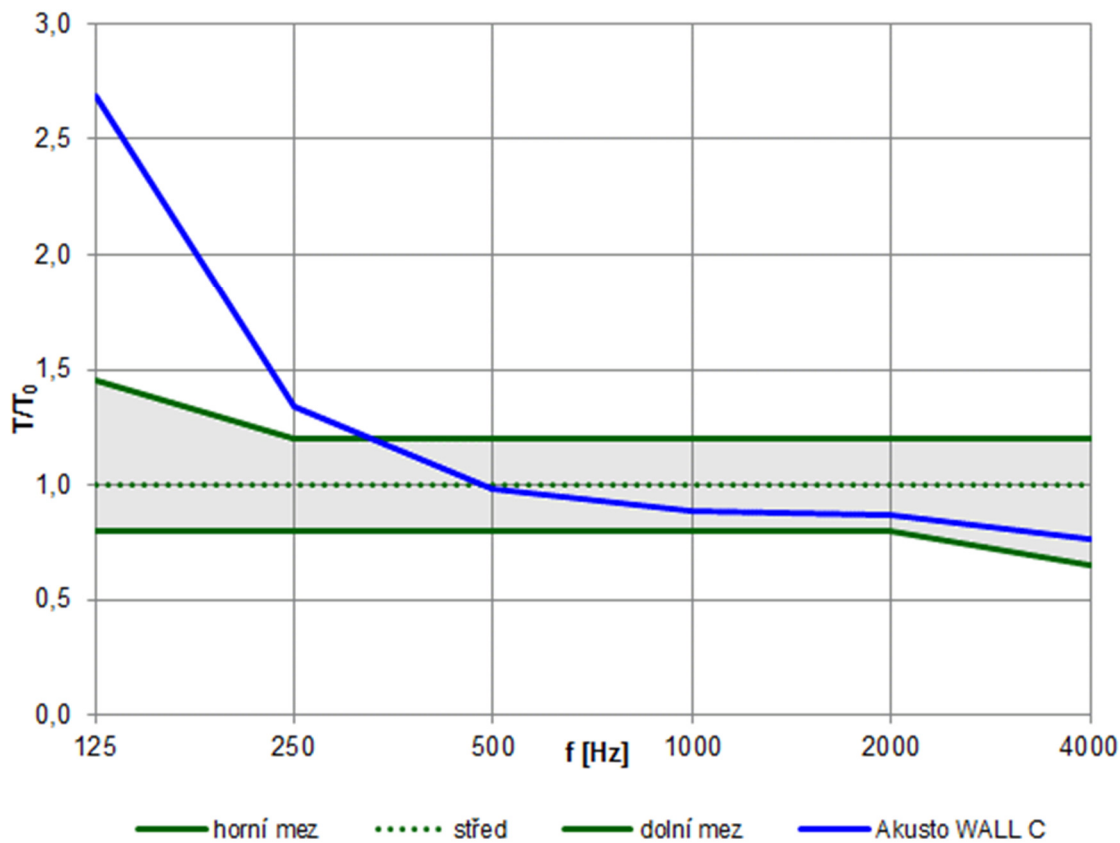
Obr. 7.1: Schéma učebny 160



Tab. 7.1: Doba dozvuku v prostoru učebny 160

Učebna 160	V = 195 m ³	Doba dozvuku [s]					
		f / Hz					
		125	250	500	1000	2000	4000
Prostor bez úprav – měření	T _N	2,92	2,64	2,00	1,87	2,04	1,48
Po akustických úpravách	T _U	1,72	0,86	0,63	0,57	0,56	0,49

Graf 7.1: Grafické znázornění doby dozvuku obsazené učebny vzhledem k normovým mezím



7.2 Učebna 302

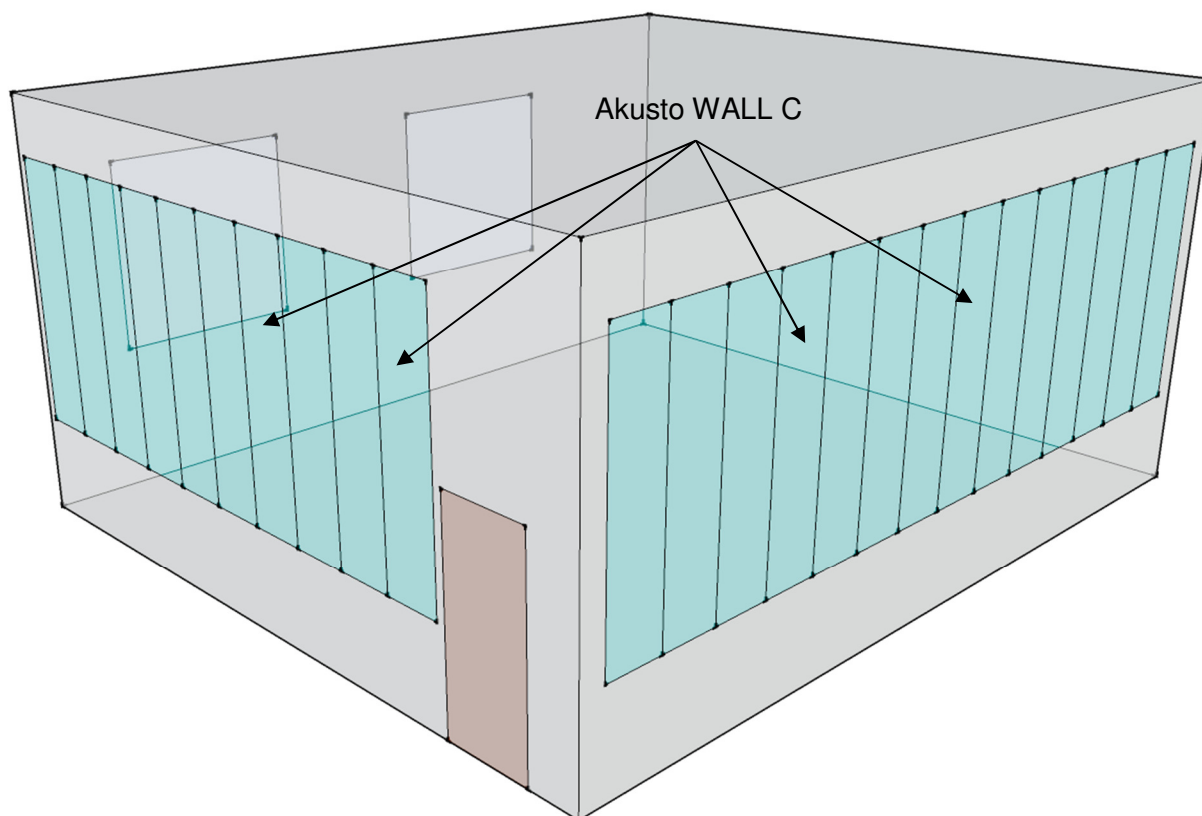
Posuzovaná učebna má obdélníkový půdorys. Na podlaze je PVC, strop a stěny jsou omítnuté. Všechny povrchy jsou velmi odrazivé. V učebně je místo pro 41 osob.

Zadní a boční stěna místnosti bude upravena pomocí akustického obkladu z minerální vlny. Výpočet byl proveden s deskami **Ecophon Akusto Wall C** s povrchovou úpravou **Super G**. Desky mají tloušťku 40 mm, celková hloubka systému je 50 mm. Počet panelů je 24 o celkové ploše cca 39 m².

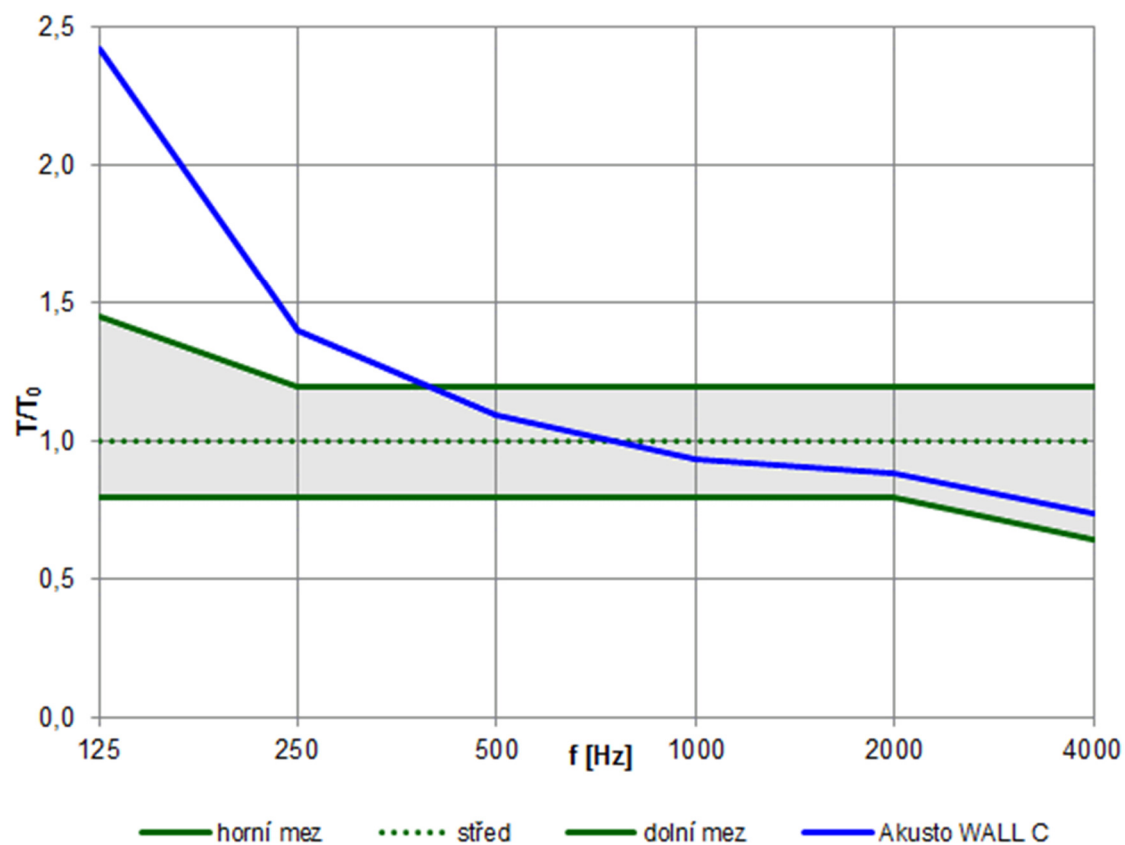
Tab. 7.2: Doba dozvuku v prostoru učebny 302

Učebna 302	V = 292 m ³	Doba dozvuku [s]					
		f / Hz					
		125	250	500	1000	2000	4000
Prostor bez úprav – měření	T _N	2,59	2,78	2,81	2,51	2,50	1,68
Po akustických úpravách	T _U	1,79	1,04	0,81	0,69	0,65	0,55

Obr. 7.2: Schéma místnosti



Graf 7.2: Grafické znázornění doby dozvuku obsazené učebny vzhledem k normovým mezím



8 Závěrečný komentář

Měření dozvuku a podrobné akustické výpočty prokázaly, že akusticky neupravené učebny neodpovídají z hlediska doby dozvuku požadavkům platných norem a účelu využití, což vede ke špatné srozumitelnosti v prostoru. Pro zlepšení poslechových podmínek a snížení doby dozvuku k optimálním hodnotám byl v obou řešených učebnách navržen a posouzen akustický obklad zadní a boční stěny. Po realizaci dojde k poklesu doby dozvuku v celém frekvenčním spektru. Ten se pak bude kromě nízkých frekvencí pohybovat v přípustném rozmezí. Nízké frekvence pro daný účel využití (převážně řeč) nejsou problematické a jejich řešení by vyžadovalo kromě akustických úprav stěn také zásahy do stropu, což by výrazně zvýšilo cenu realizace. Pokud by se ukázalo, že je potřeba řešit i tyto nízké frekvence, další variantou je dodatečné doplnění stěn o rezonátory, či kmitající panely.

9 Popis navržených akustických materiálů

9.1 Pohltivost navržených obkladů

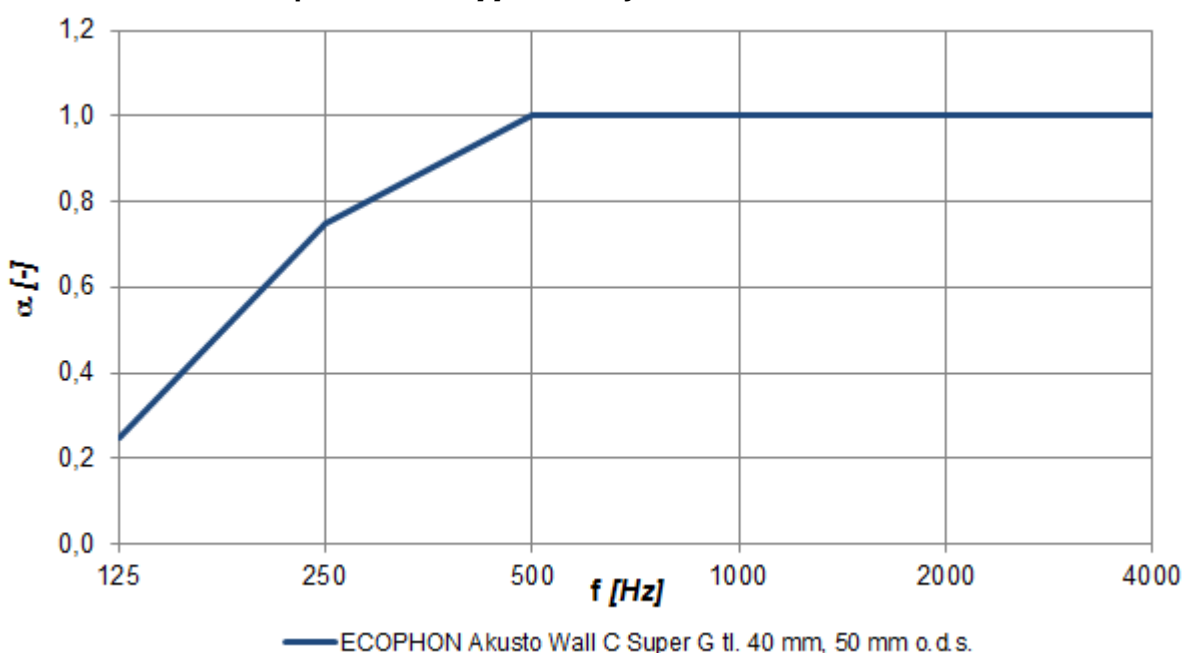
V následující tabulce a grafu přikládáme pohltivosti obkladů použitých při výpočtu. Dále přikládáme jejich stručný popis.

Tab. 9.1: Činitele zvukové pohltivosti α [-] navržených obkladů

ČINITEL ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI α [-]						
f [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
ECOPHON Akusto WALL C Super G tl. 40 mm, 50 mm o.d.s.*	0,25	0,75	1,00	1,00	1,00	1,00

*o.d.s. = celková hloubka systému

Graf 9.1: Činitel zvukové pohltivosti α [-] navržených obkladů



9.2 Popis navržených obkladů

Vertikální prvky ECOPOHON Akusto Wall C Super G

Popis: Systém Akusto Wall C je stěnový zvukový absorbér se skrytým nosným rástrem a sraženými hranami tvořícími úzké drážky mezi jednotlivými panely. Ty jsou vyrobeny ze skelného vlákna o vysoké hustotě, pohledová plocha je ze sklovláknité tkaniny. Akusto Wall C poskytuje širokou škálu provedení. Panely jsou demontovatelné. Systém sestává z panelů ECOPHON Akusto Wall C a nosného rástru Connect. Celková hmotnost systému je 5 kg/m².

Povrch Super G byl navržen do prostředí, kde dochází k riziku mechanického poškození. Super G je sklovláknitá tkanina s vysokou odolností proti mechanickým nárazům. Kombinace této silné tkaniny a jádra ze skelné vlny o vysoké hustotě je základem robustních akustických stěnových a stropních panelů odolných proti mechanickému poškození.

Zadní plocha panelů je pokryta skelnou tkaninou. Rohy jsou opatřeny nátěrem a povrchová úprava pohledové strany částečně překrývá delší hrany.

Základní rozměry: 2700 × 600 mm, tl. 40 mm.

Výrobce: ECOPHON

Obr. 9.1: Příklad realizace stěnového obkladu Akusto Wall C

