



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta elektrotechnická
Katedra radioelektroniky**

**Úprava akustiky malé místnosti
Acoustic Design of Small Rooms**

Bakalářská práce

Studijní program: Komunikace, Multimédia a Elektronika

Studijní obor: Multimediální technika

Vedoucí práce: Dr. Ing. Libor Husník

Eugeniu Berdan

Praha 2017

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Berdan** Jméno: **Eugeni** Osobní číslo: **434718**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra radioelektroniky**
Studijní program: **Komunikace, multimédia a elektronika**
Studijní obor: **Multimediální technika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Úprava akustiky malé místnosti

Název bakalářské práce anglicky:

Acoustic Design of Small Rooms

Pokyny pro vypracování:

Na základě analýzy specifik akustiky malých místností vypracujte návrh akustických úprav pro vybrané místnosti. V těchto místnostech změřte relevantní akustické parametry. Na základě průzkumu trhu akustických prvků a materiálů proveďte požadovaný návrh a proveďte diskusi variability pro různé účely.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Kolmer, F., Kyncl, J.: Prostorová akustika, SNTL/Alfa 1980
- [2] Kuttruff, H.: Room Acoustics, Spon Press, 2009

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Dr. Ing. Libor Husník, katedra radioelektroniky FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **10.02.2017**

Termín odevzdání bakalářské práce: _____

Platnost zadání bakalářské práce: **30.08.2018**

Podpis vedoucí(ho) práce

Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

„Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.“

Praha, 20.5.2017

.....
Podpis autora

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu této bakalářské práce, Dr. Ing. Liboru Husníkovi, za trpělivé a ochotné vedení, odborné připomínky a za cenné rady při vypracovávání této práce i realizaci praktické části. Dále bych rád poděkoval mé rodině a všem blízkým přátelům za veškerou podporu, trpělivost, vstřícnost a pochopení, motivaci a povzbuzování za všech okolností.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá akustikou uzavřeného prostoru. Popisuje přístupy prostorové akustiky, faktory, které ovlivňují šíření zvuku v místnosti a shrnuje druhy akustických obkladů, jejich vlastnosti, princip fungování a vliv na akustiku v místnosti. Uvedeny jsou také některé katalogové modely, které jsou dostupné především na místním trhu. Dále je popsán princip posouzení akustiky v uzavřeném prostoru a měření, které je zacíleno především na dobu dozvuku, společně s teoretickými předpoklady a výpočty. Na vyhodnocení a výsledky měření pak navazuje návrh úpravy daných místností akustickými obklady, za účelem zlepšení zvukové absorpce a optimalizování doby dozvuku, pro dosažení kvalitnější akustiky odpovídající účelu těchto prostor.

Klíčová slova

prostorová akustika, pohlcování zvuku, činitel zvukové pohltivosti, dozvuk, doba dozvuku, akustický obklad, posluchárna

Abstract

This bachelor thesis deals with acoustics in enclosed space. It describes the approaches of room acoustics, factors affecting the sound propagation in a room and summarizes the types of acoustic panels, their properties, function principle and effect on the acoustics in the room. There are also mentioned some models of acoustic panels available mainly on the local market. Then the principle of evaluation of room acoustics is described as well as measurement aimed at reverberation time and the theoretical assumptions and calculations. The results are followed by a design of acoustic treatment in order to improve sound absorption and optimize reverberation time for the purpose of enhancing acoustics corresponding with the function of the room.

Keywords

room acoustics, sound absorption, sound absorption coefficient, reverberation, reverberation time, acoustic panel, lecture room

Obsah

Úvod.....	7
1 Přístupy prostorové akustiky.....	8
1.1 Vlnová akustika.....	8
1.2 Geometrická akustika.....	9
1.3 Statistická akustika.....	10
2 Parametry v prostorové akustice.....	11
2.1 Činitel zvukové pohltivosti.....	11
2.2 Dozvuk.....	11
2.3 Doba dozvuku.....	12
2.3.1 Doba dozvuku podle Sabina.....	12
2.3.2 Doba dozvuku podle Eyringa.....	13
2.3.3 Doba dozvuku podle Millingtona.....	13
2.3.4 Vliv prostředí na dobu dozvuku.....	13
3 Faktory ovlivňující akustiku prostoru.....	14
3.1 Pohlcování zvuku.....	14
3.1.1 Přeměna zvukové energie.....	14
3.2 Akustické obklady pro pohlcování zvuku.....	15
3.2.1 Porézní materiály.....	15
3.2.2 Akustické obklady založené na rezonančním principu.....	16
3.2.2.1 Kmitající membrány a desky.....	16
3.2.2.2 Helmholtzovy rezonátory.....	17
3.2.3 Rozptylové prvky – difuzory.....	18
3.2.4 Příklady katalogových modelů akustických obkladů.....	19
3.2.4.1 Porézní akustické prvky.....	19
3.2.4.2 Akustické obklady s rezonančním principem.....	25
3.2.4.3 Difuzory.....	29
3.2.4.4 Bass trap.....	31
4 Praktická část.....	33
4.1 Měření doby dozvuku.....	33
4.1.1 Měření pomocí MLS signálu.....	33
4.1.2 Určení doby dozvuku z impulzní odezvy.....	34
4.2 Měřené místnosti.....	36
4.2.1 Učebna 554 a studio.....	36
4.2.1.1 Teoretická doba dozvuku.....	39
4.2.1.2 Měření.....	41
4.2.1.3 Návrh úpravy učebny 554.....	45
4.2.2 Učebna C3-438.....	49
4.2.2.1 Teoretická a naměřená doba dozvuku učebny 438.....	51
5 Závěr.....	60
6 Literatura a zdroje.....	62
7 Přílohy.....	66

Úvod

V této práci je popisována oblast akustiky, která řeší šíření zvuku v uzavřených prostorech a úpravy místností pro dosažení lepších vlastností z hlediska samotného vjemu zvuku. Prostorová akustika nebo akustika prostor je obor zabývající se šířením zvukových vln a vnímáním zvuku v uzavřených prostorech. Šíření zvuku může v místnostech ovlivnit mnoho různých faktorů a přihlížení k těmto faktorům je pro kvalitní akustiku velmi důležité.

Už při architektonickému návrhu a designu se často uvažuje s vlastnostmi dané místnosti z hlediska zvukového vjemu a akustických vlastností. Klíčovou roli zde hraje jak tvar samotné místnosti, tak i použité materiály pro výstavbu zdí, případně nosných sloupů, jejich obložení, ale i interiérové vybavení jako například nábytek. Samotný účel místnosti je ale neméně důležitý. Je nezbytné vědět, k čemu je místnost určena. Zda je to kancelářský nebo obytný prostor, přednášková síň či tovární hala. Pro každý z takových prostorů je potřeba určit veškeré požadavky spojené s vnímáním zvuku. Je jasné, že například v přednáškové místnosti je potřebné docílit dobré srozumitelnosti řeči, kdežto v průmyslových a výrobních prostorech se požaduje co nejlepší utlumení hluku pro bezpečnou práci. Ve většině případů musíme uvažovat kompromis v řešení. Jedním z takových případů jsou místnosti používané pro hudební tvorbu a reprodukci nebo nahrávací studia, kdy různé části místnosti požadují jiné řešení pro dosažení celkového charakteru akustiky daného prostoru. Interiéry, kde může docházet ke shromáždění většího počtu lidí, jako jsou například restaurace je též nutné vhodně upravit ve smyslu akustiky za účelem pohlčení hluku. V mnoha případech je však nutné přihlídnout i k subjektivním dojmům a požadavcům dané skupiny lidí či jedince, kdy je nezbytné přistoupit ke všemu individuálně a proto nelze snadno říci, že objektivní řešení je vždy to nejvhodnější a nejlepší.

Těmito problémy prostorové akustiky se zabýváme již od starověku, kdy sledujeme vývoj hudebního umění a počátky divadla jako takového v antickém Řecku a Římě. Velké umělecké prostory s hledištěm jako například otevřené amfiteátry požadovaly zajištění kvalitní slyšitelnosti, nejen samotné kvality zvuku, ale i hlasitosti. Proto vidíme, že takové prostory mají své charakteristické tvary, a nacházíme prvky jako jsou rezonátory. S rozvojem architektury i umění se objevují uzavřené místnosti různých tvarů a účelů, kde už je nutné více se zabývat akustikou, neboť dochází k poměrně většímu množství odrazů zvukových vln a tedy se mění parametry jako je dozvuk či frekvenční charakteristika.

Je tedy jasné, že při řešení prostorové akustiky není jediným bodem zkoumání pouze fyzikální podstata šíření zvuku, ale zapojují se obory jako psychoakustika, architektura, interiérový design ale i materiállové inženýrství. V dnešní době je mnoho způsobů, jak přistupovat k problémům akustiky místností a jejich řešení. Tyto způsoby budou popsány v prvních kapitolách.

Cílem této práce, jež je rozdělena na 5 kapitol, je především objektivně posoudit akustiku konkrétních místností a za použití akustických prvků navrhnout určité úpravy, které povedou ke zlepšení kvality poslechu v dané místnosti. První kapitola popisuje přístupy prostorové akustiky. Další dvě kapitoly se zabývají některými klíčovými vlastnostmi charakterizujícími akustiku v dané místnosti a faktory, které ji mohou ovlivnit. Navíc budou popsány akustické prvky, které se používají pro úpravu místností, společně s některými modely, které jsou dnes nabízeny na trhu. Poslední část této práce je vyhrazena pro praktické měření doby dozvuku v daných místnostech, vyhodnocení a návrh úpravy akustiky.

1 Přístupy prostorové akustiky

1.1 Vlnová akustika

Pro pravidelné pravoúhlé prostory tvaru kvádra (například tzv. „krabice od bot“), se pro modelování zvukového pole (především v oblasti nízkých kmitočtů) používá vlnová akustika. Tato metoda vychází z vlnové rovnice a jejich okrajových podmínek. Pro své náročné výpočty se využívá hlavně v jednoduchých případech s rovnoběžnými protilehlými stěnami (které se uvažují jako tuhé)[1]. Zde se řeší chování dopadající a odražené vlny, kdy dochází ke vzniku stojatého vlnění, jehož vlastnosti závisí jak na samotné vlně resp. její vlnové délce, tak na rozměrech místnosti.

Kmitny a uzly (místa s maximální a minimální amplitudou součtu dopadající a odražené vlny) tohoto vlnění způsobují deformaci zvukového pole a je narušena jeho difúznost, neboť frekvence shodné s vlastními kmity budou rezonovat. To pak můžeme vnímat například jako celkovou změnu barvy zvuku. Při výpočtu vlnové rovnice tedy hledá vlnová akustika vlastní kmitu (módy) daného prostoru:

$$f_N = \frac{c}{2} \cdot \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2} \quad (\text{Hz}) \quad (1)$$

kde c rychlost šíření zvuku [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
 l_x, l_y, l_z rozměry místnosti (délky hran kvádra) [m]
 n_x, n_y, n_z celá čísla.

Z pohledu přenosu zvuku ze zdroje k posluchači je zřejmé, že akustické vlastnosti daného prostoru jsou závislé na kmitočtu. Útlum vlastních kmitočtů je způsoben útlumem při šíření vlny vzduchem a pohlcováním stěnami a proto musíme uvažovat i materiály, kterými stěny pokrýváme. Pro kvalitní přenos zvuku je tedy nutné zajistit co největší hustotu vlastních kmitů v poslechovém kmitočtovém pásmu a dostatečné tlumení vlastních kmitů, z toho vyplývá i požadavek pro co nejplošší rezonanční křivky okolo vlastních kmitů. [1, 11] Pro rovnoměrné zvukové pole je nutné, aby kmitočtová vzdálenost dvou sousedních módů byla co nejmenší.

Pro nízké frekvence (a tedy delší vlnové délky) zvukové pole není vyrovnané a vlastní módy jsou od sebe ve spektru hodně vzdáleny, což se projeví zvýrazněním dané frekvence díky rezonanci při shodě budícího a vlastního kmitočtu. Hranici, do které můžeme tuto skutečnost považovat za platnou a zvukové pole je nevyrovnané, určuje tzv. **Schroederův kritický kmitočet**:

$$f_k = 2000 \cdot \sqrt{\frac{T}{V}} \quad (\text{Hz}) \quad (2)$$

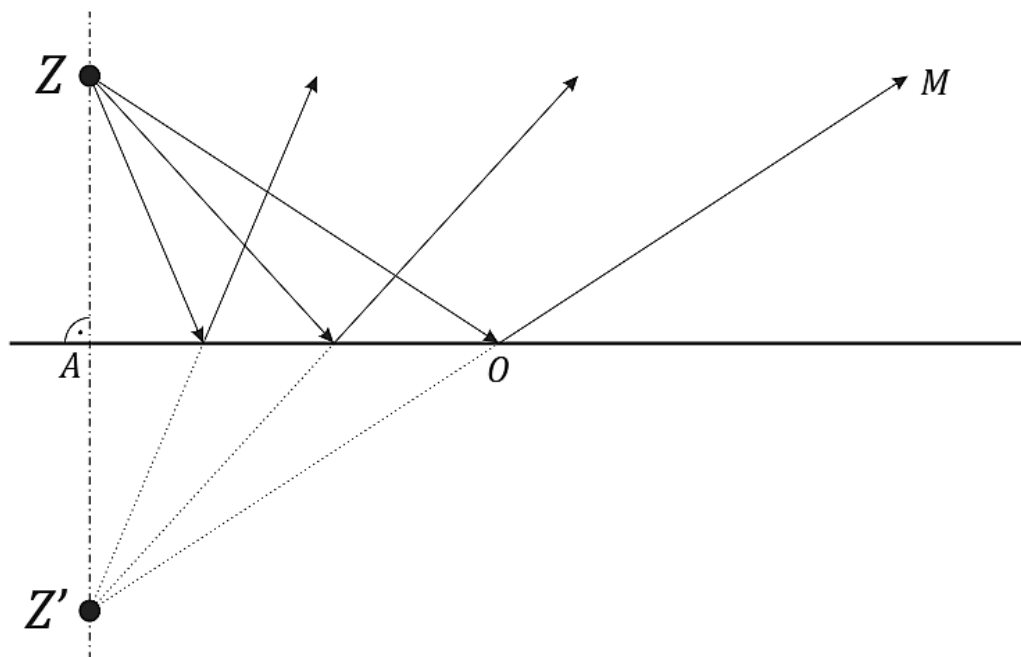
kde T doba dozvuku [s]
 V objem místnosti [m^3]. [16, 1, 7].

Od této kritické frekvence jsou vlastní módy prostoru náhodně rozloženy, zvukové pole je tedy difúzní. Dobrá difúznost zvuku je v praxi zajištěna volbou místností s takovým členěním, které umožní nepravidelné odrazy zvuku od stěn, což ale zamezí vzniku stojatého vlnění a tím i znemožní použití vzorce pro výpočet vlastních módů, proto je nutné určit aspoň kritický kmitočet pro zajištění rovnoměrnosti zvukového pole. [1, 43]

Pro dosažení lepších akustických podmínek se ze zkušeností při stavbě prostor doporučuje určité poměry rozměrů stěn, resp. délky l , šířky b , a výšky h . Pro menší objemy je podle zdroje [1] doporučený poměr $l : b : h = 2,5 : 1,5 : 1$, pro větší místnosti $l : b : h = 3 : 2 : 1$. Zdroj [45] uvádí $1 : 1,05 : 1,2$ nebo $1 : 1,25 : 1,6$ aj. Obecně však platí, že by poměry neměly být celočíselnými násobky.

1.2 Geometrická akustika

Pro oblast vyšších kmitočtů je možné použít pro výpočty a modelování geometrickou akustiku. Tato metoda přináší mnoho zjednodušení šíření zvukové vlny a zabývá se oblastí akustiky, která vylučuje ohyb zvukové vlny a zahrnuje pouze odraz zvukových vln od překážek [16, 1, 7]. To nám umožní používat pro modelování zvukový paprsek, jenž má směr normály k vlnoploše, kdy stejně jako v optice bude platit zákon rovnosti úhlu dopadu a úhlu odrazu. Čím větší jsou rozměry překážky, resp. plocha odrazu, tím více se chování zvukové vlny blíží k chování světelných paprsků. Stejně jako u světelného paprsku tedy uvažujeme zrcadlový odraz a to včetně odrazů vyšších řádů. Při takovém odrazu uvažujeme pomyslný zrcadlový zdroj jak znázorňuje obrázek 1.



Obr. 1: Princip odrazu paprsků vyjadřujících šíření zvukových vln (zrcadlení zdroje) – Z je zdroj zvuku, Z' pomyslný zdroj (zrcadlový obraz), O je místo odrazu, M je odražený paprsek [14]

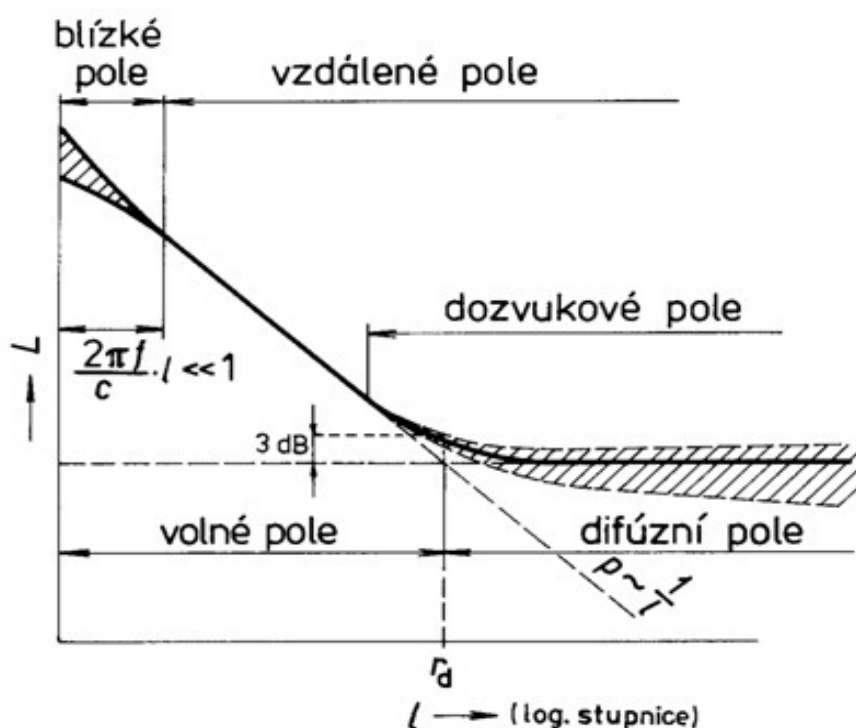
Geometrická akustika tak sleduje směr šíření vlny od zdroje zvuku k místu příjmu resp. zvukové paprsky, které právě vyjadřují směr šíření. Platí, že při každém odrazu paprsku od stěny dochází ke skokovému poklesu jeho energie (a vyzáření paprsku se zbytkem energie z nového pomyslného zdroje). Důležité je počítat nikoli jen s rovnými odrazovými plochami, ale i s vypuklými nebo vydutými (konvexní a konkávní plochy). Vypuklé plochy zvukové vlny rozptýlí, kdežto vyduté soustřeďují, obdobně jako v optice. Těchto účinků se využívá k dosažení co nejrovnoměrnějšího rozložení zvukové energie v místnosti. Cílem metody je konstrukce impulsní odezvy mezi místy zdroje a přijímače, která objektivně popisuje vlastnosti daného prostoru [16].

Nevýhodou tohoto přístupu je skutečnost, že ohyb zvukové vlny není možné vyloučit pro vlnové délky větší než jsou odrazové plochy. Navíc, je geometrická akustika výpočetně náročná a vzhledem k tomu, že hustota odrazů se s časem zvyšuje kvadraticky, od určitého okamžiku již není možné spočítat všechny odrazy [16, 11].

1.3 Statistická akustika

Statistická akustika umožňuje nalézt průměrné hodnoty veličin potřebných pro určení akustické kvality daného prostoru. Oproti předchozím metodám používá pro charakterizaci a popis zvukového pole veličiny energetické jako je hustota zvukové energie či intenzita zvuku. Zprůměrování hodnot pak dává lepší přehled o zvukových vlastnostech místnosti. Nezbytné předpoklady, ze kterých statistická teorie vychází, jsou [1, 16,4, 11]:

- Zvuková energie resp. její velikost se uvažuje jako součet středních hodnot energie způsobené odrazy od stěn. Nepočítá se s interferencemi odražených vln resp. s okamžitými hodnotami energetických veličin v daném bodě. Z toho vyplývá, že se uvažují pouze nezávislé (nekoherentní) zdroje.
- Všechny úhly dopadu zvukových vln v daném bodě jsou stejně pravděpodobné.
- Nutná podmínka pro statistickou akustiku je stejná hustota zvukové energie v každém bodě prostoru. Uvažujeme pouze pole odražených zvukových vln tedy místa kde je možné zanedbat působení energie přímých vln (difúzní pole). Jen v takovém případě je hustota zvukové energie konstantní. [1]



Obr. 2: Zvukové pole v uzavřené místnosti (závislost hladiny akustického tlaku L na vzdálenosti od zdroje r_d) [23]

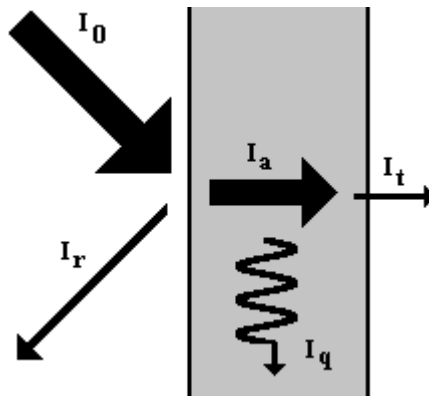
Platí tedy, že ve statistické akustice počítáme s difúzním zvukovým polem při kontinuálním vyzařování a pohlcování zvukových vln. Difúzní zvukové pole je takové, které vzniklo pouze odraženými zvukovými vlnami a hustota zvukové energie je konstantní. Splňuje tedy předpoklady pro statistickou akustiku. Z výše zmíněného je jasné, že statistickou akustiku je možné použít od kritické frekvence f_k .

2 Parametry v prostorové akustice

V návaznosti na přístupy modelování akustických prostor je nezbytné zmínit některé důležité parametry a vlastnosti potřebné k měření i modelování akustického pole v daném prostoru.

2.1 Činitel zvukové pohltivosti

Při řešení akustiky nesmíme vynechat zákon zachování energie a je potřeba počítat s přeměnami energie. Je zřejmé, že zvuková vlna odražená od stěny má menší energii než vlna, která dopadla na rozhraní. Z toho vyplývá, že část energie je pohlcena nebo projde skrz stěnu.



Obr. 3: Rozdělení energie při dopadu na stěnu [18]

Na obrázku 3 vidíme rozdělení energie zvukové vlny při dopadu na stěnu. I_0 a I_r je intenzita dopadající vlny resp. odražené. Absorbovaná část energie I_a se dále rozdělí na složku přeměněnou na teplo I_q a transferovanou I_t (prošla vlna).

Vlastnosti stěny z hlediska pohlcování zvuku jsou určeny **činitelem zvukové pohltivosti** α , který je definován jako poměr zvukové energie pohlcované stěnou ku zvukové energii na tuto plochu dopadající. [1, 5, 18, 11]

$$\alpha = \frac{W_{pohl}}{W_{dop}} \quad [-] \quad (3)$$

Někdy se také uvádí definice pomocí výkonů místo energií. Z principu zachování energie jasně vidíme (celková energie systému je konstantní), že činitel nabývá hodnot v intervalu od nuly do jedné. V praxi je časté, že místnost má více ploch s různým činitelem pohltivosti. V takovém případě použijeme vztah pro celkovou absorpci (pohltivost)[1, 18]:

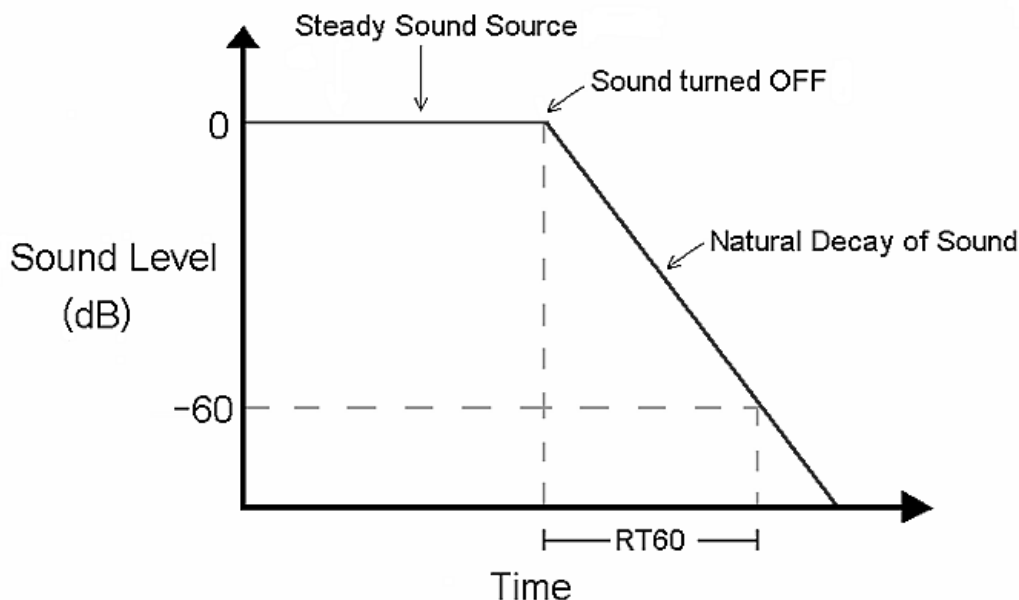
$$A = \alpha \cdot S = \alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \dots + \alpha_i S_i \quad [m^2] \quad (4)$$

2.2 Dozvuk

Při ustáleném stavu doplňuje zdroj zvuku energii, která byla pohlcena stěnami. Po vypnutí zdroje začne zvuková energie odražených vln vlivem pohltivosti stěn postupně ubývat. Zvuk, který se prostorem šíří po vypnutí zdroje do úplného pohlcení energie odražených vln se nazývá **dozvuk**. [1, 4, 6] Je to důležitý parametr pro popis akustických vlastností uzavřených prostor.

2.3 Doba dozvuku

Klíčovým parametrem pro charakterizování uzavřeného prostoru je **doba dozvuku**. Je obecně definována jako doba, za kterou úroveň intenzity zvuku v uzavřené místnosti po vypnutí zdroje poklesne o 60 dB (hodnota hladiny intenzity zvuku). [1, 4, 7, 27, 45] K poklesu dochází převážně díky útlumu překážek. Jelikož je činitel pohltivosti frekvenčně závislý, je i doba dozvuku závislá na kmitočtu. Známe různé metody teoretického výpočtu doby dozvuku v závislosti na případu použití.



Obr. 4: Definice doby dozvuku - znázornění změny hladiny intenzity zvuku v čase po vypnutí zvukového zdroje (Sound turned OFF). Doba od vypnutí po zeslabení hladiny o 60 dB je doba dozvuku (RT60)

(Zdroj: <http://www.sengpielaudio.com/calculator-RT60.htm>)

2.3.1 Doba dozvuku podle Sabina

Za Sabinova předpokladu, že zvuková energie je stěnami obklopujícími uzavřený prostor pohlcována plynule byl pro výpočet doby dozvuku v dané místnosti postupně odvozen výraz [1, 7, 4, 11]

$$T_s = 0,164 \cdot \frac{V}{\alpha \cdot S} \quad (\text{s}) \quad (5)$$

kde V celkový objem místnosti (m^3)
 α střední činitel pohltivosti (dle vztahu 6)
 S celkový obsah všech ploch (m^2).

Jsou-li v místnosti plochy o různém činiteli pohltivosti, spočítáme střední hodnotu činitele pohltivosti pomocí vztahu

$$\alpha = \frac{\alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \dots + \alpha_n S_n}{S} \quad (-) \quad (6)$$

kde $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ činitel zvukové pohltivosti různých stěn
 S_1, S_2, \dots, S_n plochy stěn s odlišným činitelem pohltivosti (m^2)
 S celková plocha stěn v místnosti. (m^2)

Sabinův vztah ale platí pouze pro menší hodnoty činitele α . [1, 11] Navíc je zřejmý problém při extrémních hodnotách. Pro $\alpha = 1$ (dokonale pohltivé stěny) by se měla doba dozvuku rovnat nule, což by podle tohoto vzorce nenastalo. (Obdobně je to pro $\alpha = 0$. V tomto případě by dle tohoto vztahu se doba dozvuku měla rovnat nekonečnu, což není vzhledem ke ztrátám při šíření možné).

2.3.2 Doba dozvuku podle Eyringa

Předpoklad plynulého pohlcování zvukové energie stěnami se tedy ukázal pro vyšší hodnoty činitele pohltivosti jako nevyhovující. Eyring proto uvažoval, že se dopadající zvukový paprsek zeslabuje skokově.[1] Pro dobu dozvuku zde platí

$$T_E = 0,164 \cdot \frac{V}{-S \ln \cdot (1 - \alpha)} \quad (\text{s}) \quad (7)$$

kde V objem místnosti (m^3)
 α střední hodnota činitele pohltivosti
 S celkový obsah všech ploch s různými materiály (m^2). [1, 45, 4, 11]

2.3.3 Doba dozvuku podle Millingtona

Přestože Eyringův vzorec do jisté míry řeší nedokonalosti Sabinova vzorce, ukazuje se v praxi, že není dostačující v případech, kdy činitel pohltivosti dosahuje hodnot větších než 0,8. Přesnější je Millingtonův vzorec, který v sobě zahrnuje předpoklad různých ploch o rozdílném činiteli absorpce. Tento vztah je ale výpočetně mnohem náročnější. [1, 4, 11]

$$T_M = 0,164 \cdot \frac{V}{-\sum_{i=1}^n S_i \ln \cdot (1 - \alpha_i)} \quad (\text{s}) \quad (8)$$

kde V objem místnosti (m^3)
 α_i činitel pohltivosti jednotlivé plochy
 S_i obsah ploch s příslušným činitelem pohltivosti α_i (m^2).

2.3.4 Vliv prostředí na dobu dozvuku

Doba dozvuku je ale závislá na kmitočtu i prostředí, jimž se zvuk šíří. Není tedy jednoduché dosáhnout ideální doby dozvuku pro všechna slyšitelná pásma. Pro útlum prostředím se do všech zmíněných vzorců pro dobu dozvuku přidává do jmenovatele korekční člen $4mV$. [1, 4, 11] Činitel útlumu m závisí na relativní vlhkosti, teplotě a kmitočtu [45]. Vzorce včetně korekce tedy vypadají takto:

$$T_S = 0,164 \cdot \frac{V}{\alpha \cdot S + 4mV} \quad (\text{s}) \quad (9)$$

$$T_E = 0,164 \cdot \frac{V}{-S \ln \cdot (1 - \alpha) + 4mV} \quad (\text{s}) \quad (10)$$

$$T_M = 0,164 \cdot \frac{V}{-\sum_{i=1}^n S_i \ln \cdot (1 - \alpha_i) + 4mV} \quad (\text{s}) \quad (11)$$

3 Faktory ovlivňující akustiku prostoru

Z předchozích poznatků je patrné, že akustické vlastnosti v uzavřeném prostoru závisí mj. na jejich rozměrech, kdy je potřebné např. zajistit rovnoměrné rozložení vlastních módů a tedy i vhodný poměr délek stěn (kap. 1.1). Samotná velikost místnosti resp. její objem má rovněž značný vliv na akustiku v ní. Akustické vlastnosti ale také závisí na materiálech, ze kterých jsou postaveny nebo kterými jsou obloženy zdi. V praxi je běžné, že dané prostory mnohdy nejsou vhodné pro potřebné využití (např. z hlediska doby dozvuku) nebo nejsou využívány v souladu s prvotním účelem a vyžadují tedy vhodnou úpravu pro dosažení optimálních podmínek. Řešení spočívá v úpravě stěn (či obecně ploch v místnosti) změnou pohltivosti, konkrétně pomocí konstrukcí či obkladů z materiálů o různých pohltivých vlastnostech.

3.1 Pohlcování zvuku

Víme, že v uzavřeném prostoru se zvukové vlny mnohonásobně odrážejí. Žádný povrch ale není dokonale odrazivý a jak již bylo uvedeno v kapitole 2.1 část energie se odrazí, část projde a část se pohltí (přemění se v jinou energii, zpravidla tepelnou). Rozdělení energie při dopadu na rozhraní materiálu znázorňuje obrázek 3. Jak již bylo uvedeno, poměr I_a/I_0 udává činitel pohltivosti α a může nabývat hodnot v intervalu $\langle 0,1 \rangle$, kdy $\alpha = 1$ představuje otevřené okno, jímž projde veškerá energie ven a zpět se neodráží nic, a $\alpha = 0$ znamená úplný odraz.

3.1.1 Přeměna zvukové energie

Přeměna zvukové energie na energii jinou při pohlcování zvuku je nevratná a při šíření v pevných látkách můžeme rozdělit přeměny podle zdrojů [1, 11] na tři typy :

1. Přeměny vznikající třením (viskózní ztráty) – k takovým přeměnám dochází při pohybu vzduchových částic podél určitého povrchu. Část energie zvuku se přemění na energii tepelnou v závislosti na velikosti plochy, na níž dochází ke tření. Pro co největší účinek přeměny je potřeba co největší plochy styku. K takovým ztrátám dochází především na stěnách otvorů, pórů apod.(3.2).[1] Některé obklady mají schopnost se při dopadu zvukové vlny rozkmitat. Energie se zde rozdělí na část, která se třením přemění na teplo a na část, která se díky kmitům přemění opět na akustickou energii. [1]

2. Přeměny vznikající poklesem akustického tlaku (relaxační ztráty) – v místech, kde dochází vlivem šíření zvuku ke stlačení vzduchu, se zvyšuje celkový i akustický tlak. Tím pochopitelně naroste teplota a následně dojde k výměně tepla s kostrou konstrukce. Při snížení teploty poklesne tlak a v souvislosti s tím dochází k relaxaci akustického tlaku. Při snížení (relaxaci) akustického tlaku se zmenší nashromážděná potenciální energie a tím i zvuková energie. Relaxace může být způsobena také například vyrovnáním teplot vodivé kostry s okolím.[1]

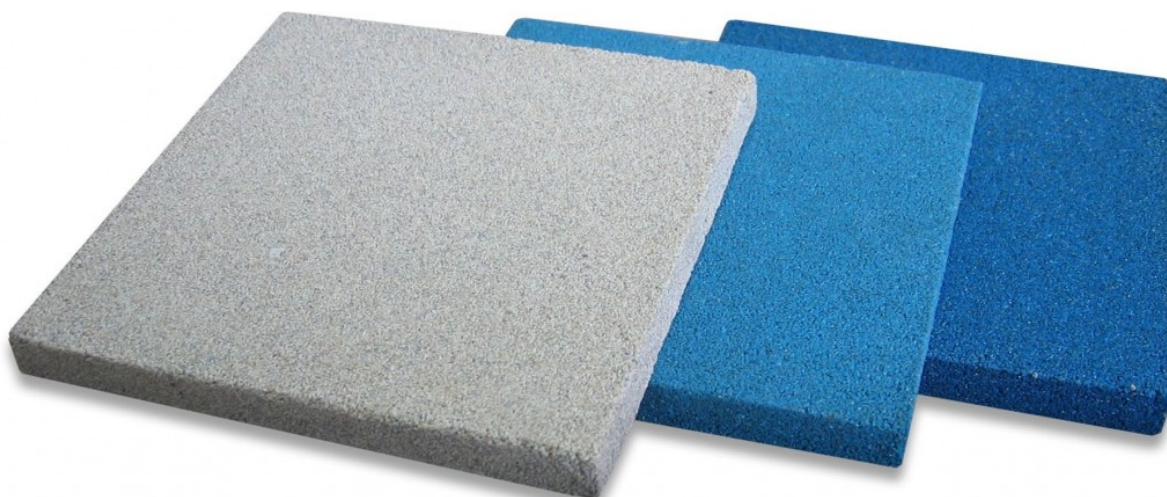
3. Přeměny nepružnou deformací těles – vznikají v látkách s tzv. pružnou hysterezí. To znamená, že při stlačení takové látky určitou silou se látka nevrátí zcela do původního stavu. Rozdíl mezi prací, která deformovala těleso a prací získanou pružností tělesa představuje úbytek zvukové energie. [1]

3.2 Akustické obklady pro pohlcování zvuku

Materiály používané pro obklady a konstrukce k úpravě místnosti z hlediska pohlcování zvuků můžeme rozdělit do několika skupin podle jejich principu a funkce. Toto rozdělení bude popsáno v následujících kapitolách společně s konkrétními příklady katalogových modelů dostupných na trhu.

3.2.1 Porézní materiály

Porézní materiál je pevná látka obsahující ve svém objemu mnoho malých dutinek vyplněných vzduchem a to až 99 % svého objemu. Takové materiály mají strukturu vláknitou, strukturu ztuhlé pěny [1] nebo partikulární (částice kameniva pojené lepidly či jinými pojivy). Typickým materiálem je např. minerální vlna. Pohlcování energie zde dochází přeměnou zvukové energie na tepelnou energii. Tato přeměna zde dochází zpravidla vzájemným třením vzduchových částic na rozhraní se stěnami dutin a vlivem viskózních sil. (3.1.1) Vzájemné propojení dutinek a pórů pomůže k dosažení ještě lepšího pohlcování zvuku, neboť se zvuk může materiálem šířit dále a tedy dochází k větší míře tření vzduchových částic na větší ploše rozhraní.



Obr. 5: Příklad akustického panelu z porézního materiálu (Zdroj: <http://www.acoustic-supplies.com>)

U materiálů ze zpěněné plastické hmoty není nutné dodržovat propojení pórů, zvuk zde prochází do sousedních pórů relativně snadno. Míra pohlcení zvukové energie je dána množstvím a velikostí dutinek, neboť to určí celkovou plochu na které dojde ke ztrátám třením. Činitel pohltivosti takových materiálů je závislý i na jeho tloušťce, která napoví, do jaké míry jaký kmitočet bude tlumen. Při umístění obkladu přímo na zeď může docházet k zpětnému odrazu zvukové vlny a tím i snížení pohltivosti. Zdroj [1, 29] uvádí, že řešením je vytvoření tzv. „vzduchového polštáře“, tedy odsazení akustického materiálu od konstrukce, čímž se vytvoří vzduchová mezera mezi stěnou a akustickým prvkem. Vlna, která je materiálem utlumena, se po průniku obkladem odrazí od stěny zpět do obkladu, čímž se utlumí ještě více. Účinek se zvýší při dodržení vhodné vzdálenosti v závislosti na vlnové délce zvukové vlny.

3.2.2 Akustické obklady založené na rezonančním principu

Prvky založené na rezonanci můžeme rozdělit na kmitající desky a membrány a Helmholtzovy rezonátory.

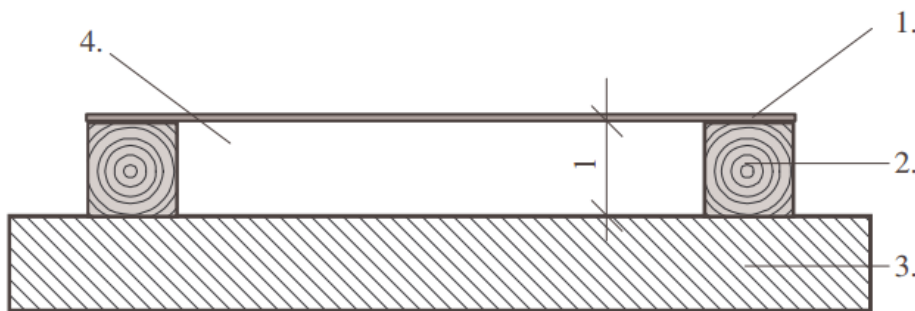
3.2.2.1 Kmitající membrány a desky

Kmitající membrány a desky jsou tenké desky či fólie, které tvoří rezonanční soustavu a jejich tuhost v ohybu je nepatrná. Membrány jsou připevněné na pevnou konstrukci (zpravidla dřevěný nebo kovový rošt) určující tloušťku mezery mezi pevným povrchem (stěnou), na který je konstrukce připevněna, a samotnou membránou. Mezera slouží k tlumení kmitů a je často vyplněna přidavným pohltivým prvkem, například porézním materiálem, pro lepší účinky tlumení.

Po dopadu zvukové vlny na membránu dojde k přeměně energie na mechanickou a membrána začne kmitat na vlastním rezonančním kmitočtu f_r , dále je postupně tlumena a dochází k přeměně energie na tepelnou. Rezonanční kmitočet závisí na plošné hmotnosti membrány m (hmotnost jednotkové plochy) a tloušťkou vzduchové mezery d dle vztahu: [1, 29, 7]

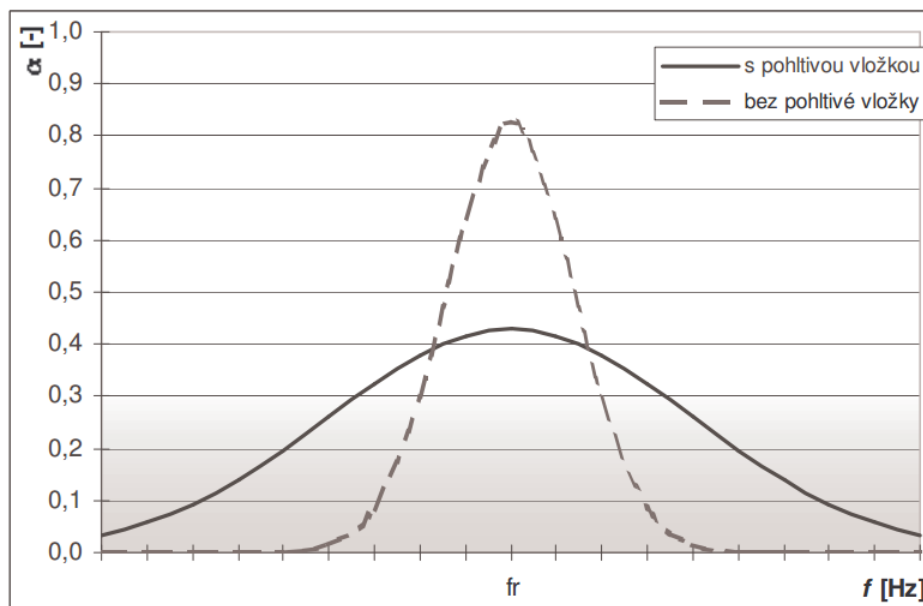
$$f_r = \frac{60}{\sqrt{m \cdot d}} \quad (\text{Hz}) \quad (12)$$

Z toho vyplývá, že zvětšíme-li plošnou hmotnost membrány a tloušťku vzduchové mezery, rezonanční kmitočet se sníží.



Obr. 6: Schéma kmitající membrány: 1. - kmitající membrána, 2. - nosný dřevěný rošt, 3. - nosná konstrukce, 4. - vzduchová mezera nebo pórovitý absorbent [17]

Vložením porézního materiálu do vzduchové kapsy mezi membránou a stěnou získáme větší šířku kmitočtového pásma pohlcování za současného snížení rezonanční frekvence. Vložený absorbér nesmí bránit kmitání membrány. Srovnání membrány se samotnou vzduchovou kapsou a s použitím absorbentu je znázorněno na obrázku 7. Pro výrobu membrán se používá například koženka nebo polyethylenová fólie apod., desky se vyrábí například ze sololitu či dřevěné překližky.



Obr. 7: Vliv použitého materiálu v kmitající membráně na šířku pásma a činitel pohltivosti [17]

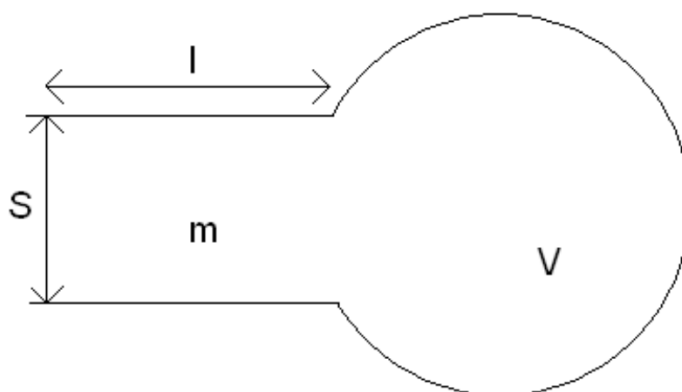
3.2.2.2 Helmholtzovy rezonátory

Helmholtzův rezonátor je tvořen dutinou o určitém objemu, který představuje akustickou poddajnost c_a , opatřenou otvorem a zúženým hrdlem. V této dutině slouží sloupec vzduchu o hmotnosti m_a jako píst. Při dopadu zvukové vlny dojde k jejímu mnohonásobnému odražení v dutině a dojde k útlumu a přeměně na tepelnou energii. Vlastní rezonanční kmitočet rezonátoru můžeme určit dle vztahu [1, 24]:

$$f_r = \frac{c_0}{2\pi} \sqrt{\frac{S_0}{V(l+2\Delta l)}} \quad (\text{Hz}) \quad (13)$$

kde

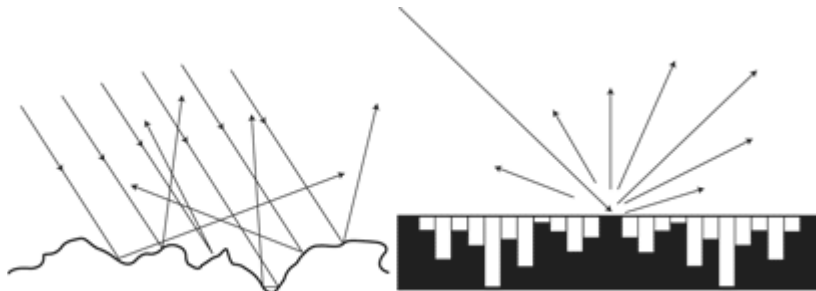
c_0	rychlost zvuku ve vzduchu (m/s)
S_0	průřez hrdla rezonátoru (m ²)
V	objem rezonátoru (m ³)
l	délka otvoru (m)
$2\Delta l$	korekce otvoru (m).



Obr. 8: Schéma Helmholtzova rezonátoru [22]

3.2.3 Rozptylové prvky – difuzory

Požadavek difúzního pole nám pomůže splnit akustický prvek zvaný difuzor. Funkce takového akustického prvku je odlišná od předchozích prvků, kdy (přednostně) nemění zvukovou energii na tepelné ztráty. Stavba difuzoru umožňuje dopadající zvukovou vlnu „rozbít“ a odrazit ji rozptýleně zpět do prostoru v různých směrech díky členitosti povrchu. Různou konstrukcí a členitostí můžeme určit směry odrazů energie, kdy vlnu můžeme selektivně nebo náhodně nasměrovat buď zpět do místnosti anebo například na jiné pohltivé prvky či do míst s posluchači. Právě rozptylem vln se vytvoří difúzní pole, které je žádané pro dobrý poslech.



Obr. 9: Znárodnění rozptylu zvuku do různých směrů na difuzoru (zdroj www.lydogakustikk.no)

3.2.4 Příklady katalogových modelů akustických obkladů

Oblast výroby akustických prvků je v dnešní době velmi rozšířena a výrobci se snaží nabídnout více než jen funkčnost akustického materiálu. Hlavním účelem takových obkladů je bezesporu zlepšení akustických vlastností prostorů. Výběr akustických prvků pro úpravu místnosti a optimalizování jejich akustických vlastností je kromě toho dnes dán samozřejmě cenou dostupných řešení, ale také například vzhledem, designem, estetikou či vlastnostmi jako nehořlavost panelů, hmotnost obkladů nebo jejich nezávadnost a bezpečnost.

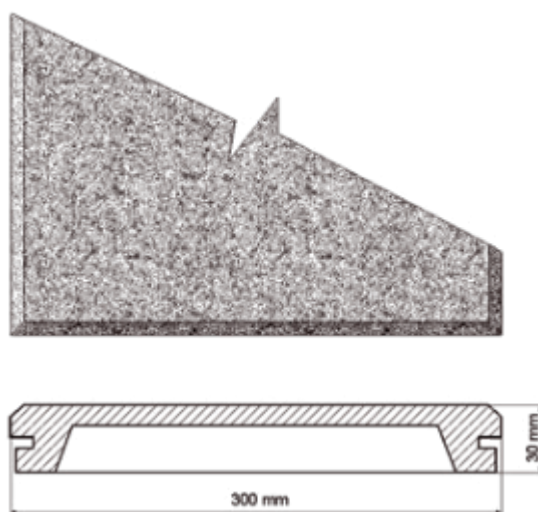
V této podkapitole budou popsány některé modely vybrané z mnohých produktů dnes dostupných na trhu včetně jejich technických specifikací. Veškerlé modely obkladových prvků a jejich technické specifikace byly čerpány z produktových katalogů a nabídek daných výrobců.

3.2.4.1 Porézní akustické prvky

„Sonit D30“ (Soning)

Obkladové desky vytvořené z velikostně tříděného barveného písku pojeného epoxidovou kompozicí. Kmitočtový průběh činitele zvukové pohltivosti lze výrazně měnit speciální úpravou rubové strany, velikostí vzduchové mezery a použitím doplňkových absorbérů.

„Vyznačuje se absorpcí zvuku v širokém kmitočtovém pásmu, nehořlavostí, prodyšností, ekologickou čistotou (neobsahuje vlákna), širokou barevnou škálou, velmi dobrou mechanickou, klimatickou a chemickou odolností, dlouhodobou životností a snadnou údržbou.“ [32]

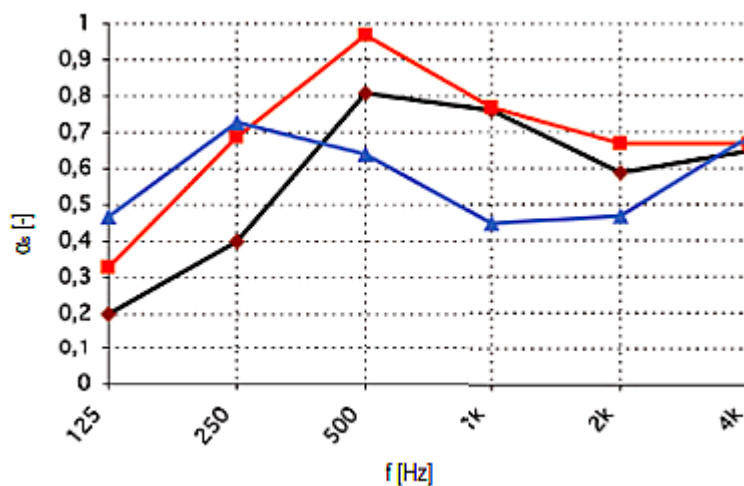


Obr. 10: Sonit D30 – technický náčrt [32]




Rozměry: 300 × 300 × 30 mm

Hmotnost: 2,75 kg/kus (30 kg/m²)

Činitel akustické pohltivosti: $\alpha_w = 0,65$ - absorpce zvuku na středních a vysokých kmitočtech



Obr. 11: Sonit D30 - průběh činitele zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci [32]

ZNAČKA	POPIS	NRC	α_w
	SONIT D30 — vzduchová mezera 75 mm	0,65	0,65 (L)
	SONIT D30 s doplňkovým absorbérem	0,75	0,75 (L)
	SONIT D30 s upravenou rubovou stranou a doplňkovým absorbérem	0,55	0,50 (L, H)

Obr. 12: Sonit D30 - průběh činitele zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci – legenda k obr. 11 [32]

„Sinus 3 cm“ (Alfacoustic.cz)

Jedná se o jedno z nejlevnějších nenáročných řešení akustického obkladu. Pěnový materiál s otevřenou buněčnou strukturou.

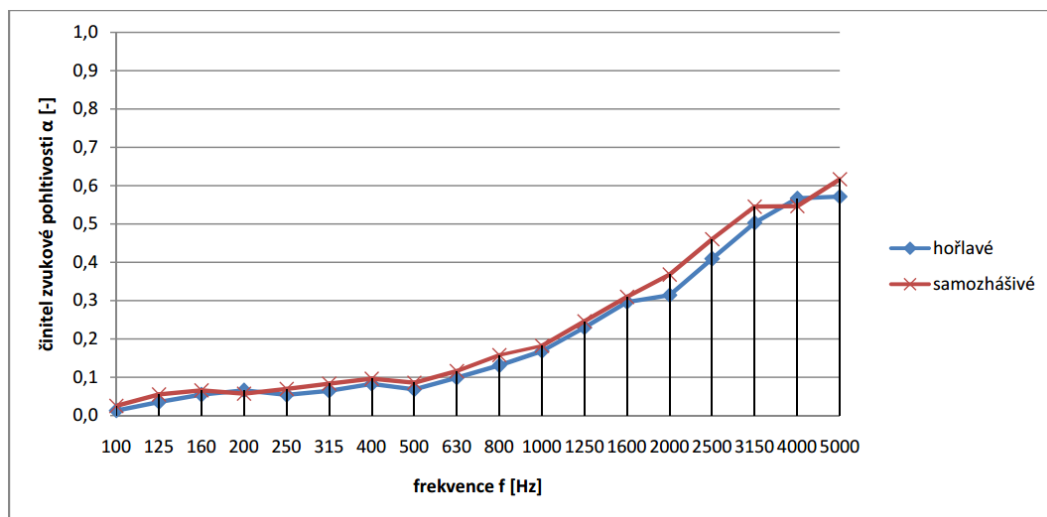
Použití: výrobní haly, obytné a kancelářské budovy, divadla, kina, studia a veškeré jiné prostory vyžadující akustickou pohodu

Rozměry: neuvedeno

Objemová hustota: 35 kg.m⁻³



Obr. 13: Sinus 3cm (zdroj: www.Alfacoustic.cz)



Obr. 14: "Sinus 3cm" - průběh činitele pohltivosti (zdroj: www.akusticka-pena.cz)

„Ecophon Solo Rectangle“ (Ecophon)

Akustické závěsné panely s jádrem ze skelné vlny o vysoké hustotě.

Rozměry: 2400x1200x40mm

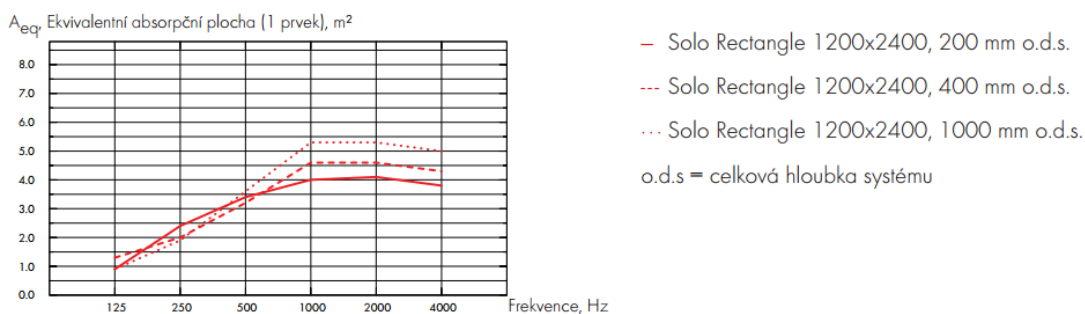
Hmotnost: 11,5 kg



Obr. 15: Ecophon Solo Rectangle (zdroj: www.ecophon.com)

Zvuková absorpce:

Výsledky zkoušek v souladu s normou EN ISO 354.



tl. mm	o.d.s. mm	A _{eq} Ekvivalentní absorpční plocha (1 prvek), m ²					
		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
40	200	0,90	2,40	3,40	4,00	4,10	3,80
40	400	1,30	2,00	3,20	4,60	4,60	4,30
40	1000	0,90	1,90	3,60	5,30	5,30	5,00

Obr. 16: Ecophon Solo Rectangle - katalogový list (zdroj: <http://www.ecophon.com/>)

„Akusto Wall A“ (Ecophon)

Akustický panel je vyroben ze skelného vlákna o vysoké hustotě (jádro), povrch je pokryt silnou sklovláknitou tkaninou. Hrany ponechány bez úprav. Nosný rastr z galvanizované oceli.

Rozměry: 2700x1200x40mm

Hmotnost: 4kg/m² (spolu s nosnou konstrukcí)



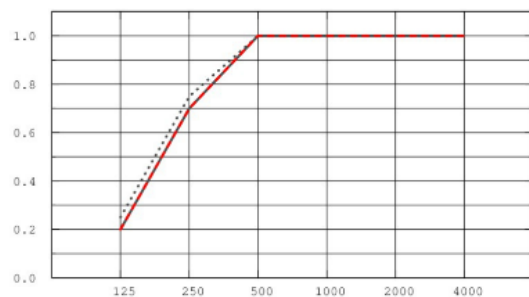
Obr. 17: Ecophon Akusto Wall A (zdroj:www.ecophon.com)

Zvuková absorpce:

Výsledky zkoušek v souladu s EN ISO 354.

Klasifikace podle EN ISO 11654, jednotlivé hodnoty pro NRC a SAA v souladu s ASTM C 423.

α_p , Praktický koeficient zvukové pohltivosti



--- Akusto Wall A Akutex FT 40 mm, 50 mm o.d.s.

— Akusto Wall A Texona 40 mm, 50 mm o.d.s.

--- Akusto Wall A Super G 40 mm, 50 mm o.d.s.

o.d.s = celková hloubka systému

Frekvence, Hz

	tl. mm	o.d.s. mm	α_p , Praktický koeficient zvukové pohltivosti						α_w	absorpční třída
			125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz		
Akutex FT	40	50	0.25	0.75	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	A
Texona	40	50	0.20	0.70	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	A
Super G	40	50	0.20	0.70	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	A

Obr. 18: Ecophon Akusto Wall A - katalogový list (zdroj: www.ecophon.com)

„Glasio“ (Aveton)

Revoluční akustický obklad vyroben ze skla. Technologie výroby umožňuje použít sklo, které samo o sobě má nízký činitel pohltivosti, jako silný absorpční obklad především pro řečové pásmo. Díky použití skla je takový prvek i designově atraktivní, kdy se dá využít jak různých barevných provedení, tak i dodatečného umělého osvětlení.

„GLASIO je porézním materiálem, tvořeným teplotně spojovanými částicemi křišťálového skla. Desky jsou spojeny pouze teplem a neobsahují žádné další příměsi, jakými jsou např. plniva a pojiva. Z tohoto důvodu jsou desky ekologicky a hygienicky nezávadné, zcela nehořlavé a snadno se udržují. Materiál je vyroben výhradně z recyklátu a je recyklovatelný. Jde o ryze český produkt.“

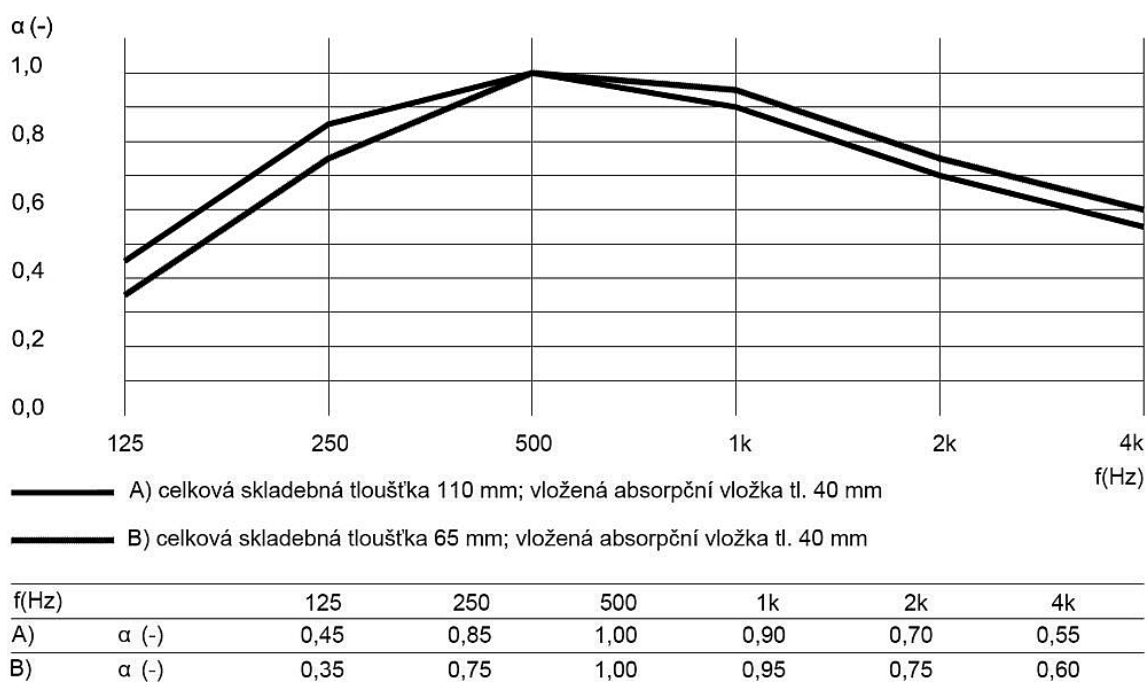
popis výrobce (Aveton) [49]

Rozměry: 600 x 600 mm, 300 x 900 mm

Hmotnost: 30 kg/m²



Obr. 19: GLASIO (zdroj: www.glasio.cz)



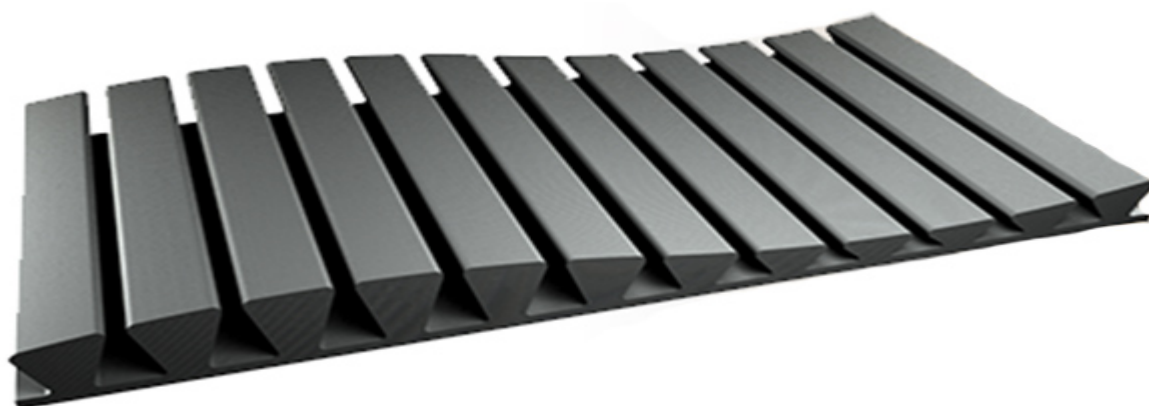
Obr. 20: GLASIO - katalogový list (zdroj: www.glasio.cz)

„Stripesorb ARC“ (ATP – Acoustic Treatment Pack)

Akustický prvek vyrobený ze standardní samozhášivé akustické pěny. Doporučuje se aplikovat do jednoduchých pracovních prostorů, hudebních studií, poslechových místností a do malých nahrávacích buněk.

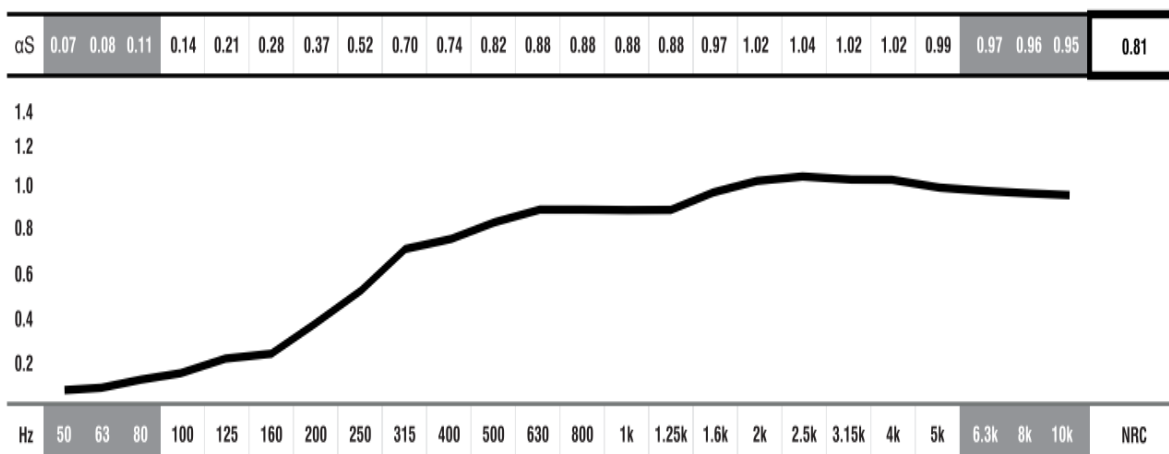
Rozměry: 120x60x11,5 cm nebo 60x60x11,5cm

Hmotnost: 0,8 kg nebo 0,4kg (dle verze)



Obr. 21:Stripesorb ARC (zdroj: www.atp.jocavi.net)

ABSORPTION COEFFICIENT



■ ABSORPTION COEFFICIENT: Values in accordance with the standards: EN 20654, ASTM C423 and EN 11654.

■ Values [$<100\text{Hz}$ and $>5\text{K}$] are Non Standard Values.

Obr. 22: Stripesorb ARC - průběh činitele pohltivosti – katalogový list od výrobce
zdroj: www.atp.jocavi.net

3.2.4.2 Akustické obklady s rezonančním principem

„AK-100“ (Akusting)

„Obkladový prvek, jehož hlavním akusticky účinným dílem je překližková membrána uchycená pružně na korpusu z dřevotřísky. Vnitřní prostor je vyplněn minerální plstí. Prvky se zavěšují za zadní desku panelu na stěny i strop místnosti.“

(popis od výrobce [37])

Výrobce uvádí, že tento prvek má zvýrazněnou pohltivost v úzkém pásmu nízkých kmitočtů. Nepotlačuje střední a vyšší frekvence.

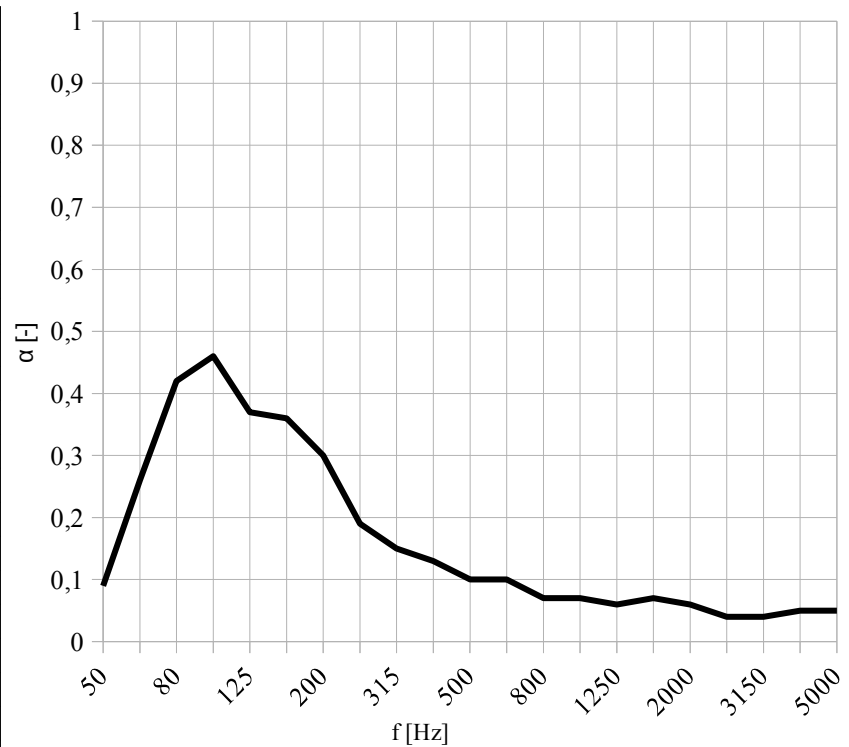


Obr. 23: Ak - 100 (zdroj: www.akusting.cz)

Rozměry : 1200 x 600 x 60 mm

Hmotnost: 16 kg / ks

f [Hz]	α [-]
50	0,09
63	0,26
80	0,42
100	0,46
125	0,37
160	0,36
200	0,3
250	0,19
315	0,15
400	0,13
500	0,1
630	0,1
800	0,07
1000	0,07
1250	0,06
1600	0,07
2000	0,06
2500	0,04
3150	0,04
4000	0,05
5000	0,05



Obr. 24: AK - 100 - průběh činitele pohltivosti (zdroj: www.akusting.cz)

„AR-180“ (Akusting)

„Akustický panel AR-180 je určen pro interiér objektů s vysokými nároky na prostorovou akustiku. Tento obkladový prvek, sloužící k selektivní absorpci nízkých kmitočtů. Účinná je přední stěna panelu zhotovená z povrchově upravené dřevotřískové desky s podélnou štěrbinou. Uvnitř je minerální plst. Prvky se zavěšují za záda panelu na stěny, případně i strop místnosti.“

(popis výrobce [www.akusting.cz])

Výrazně pohltivý na nízkých kmitočtech, mírně na středních a vysokých (v řečovém spektru).

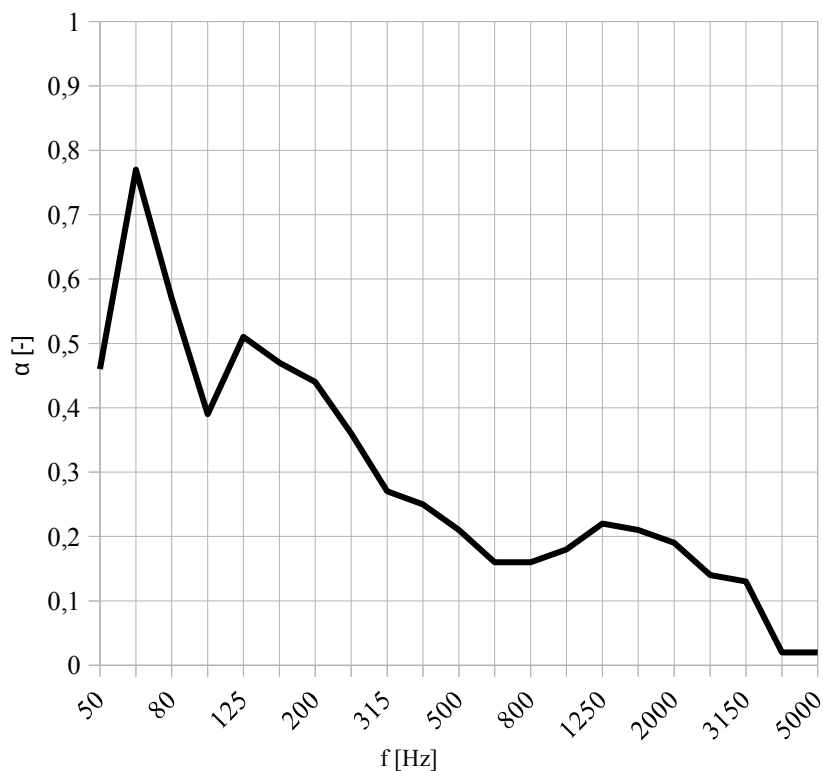


Obr. 25: AR-180 (zdroj: www.akusting.cz)

Rozměry: 1200x600x192 mm

Hmotnost: 21 kg/kus

f [Hz]	α [-]
50	0,46
63	0,77
80	0,57
100	0,39
125	0,51
160	0,47
200	0,44
250	0,36
315	0,27
400	0,25
500	0,21
630	0,16
800	0,16
1000	0,18
1250	0,22
1600	0,21
2000	0,19
2500	0,14
3150	0,13
4000	0,02
5000	0,02



Obr. 26: AR-180 - Průběh činitele zvukové pohltivosti (zdroj: www.akusting.cz)

„NOVATOP ACOUSTIC“

„Akustické panely jsou vyrobené z třívrstvé masivní desky perforované do různých profilů. Panely lze ve výrobě doplňovat absorbérem, celková skladba panelu se volí dle akustických požadavků projektu. Prefabrikovaný panel je připraven přímo k montáži. „

(popis výrobce [35])

Rozměry: (podle materiálu)

Smrk:

Standardní šířky (mm): 625, 1250, 2500

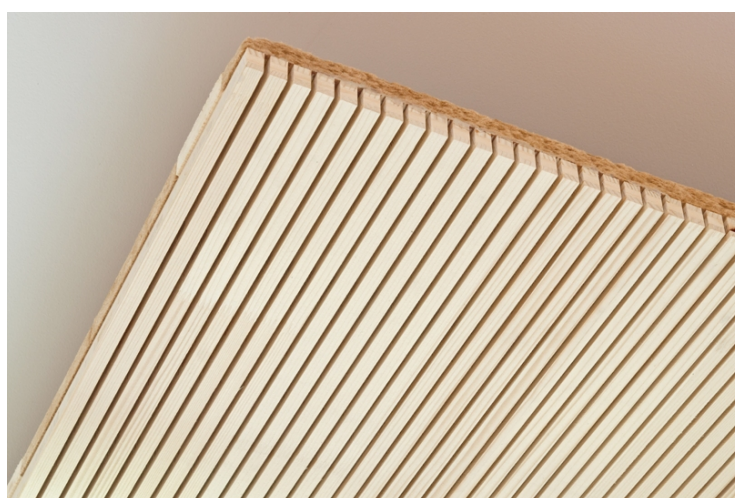
Standardní délky (mm): 2500, 5000

Jedle:

Standardní šířky (mm): 625, 1250, 2500

Standardní délky (mm): 2500, 3000, 5000

Hmotnost: liší se dle provedení a modelu



Obr. 27: NOVATOP ACOUSTIC „MARILYNE“ (zdroj: www.novatop-system.cz)

Číslo /profil	Skladba	Celková tloušťka [m]	Dutý prostor	Plošná hmotnost [kg/m ²]	Diagram	Řez
3.1 PROFIL MARILYNE 8-25	Vzduchová mezera [30 mm]	40	50	12,8		
	Příčný hranol [21 mm]					
	Steico Therm SD [20 mm]					
	SWP s perforací [19 mm]					
	Vážený činitel zvukové pohltivosti [alpha_w]			0,75		
	Třída pohltivosti			C	Číslo protokolu 311/12	

Obr. 28: NOVATOP ACOUSTIC „MARILYNE“ - katalogový list (zdroj: www.novatop-system.cz)

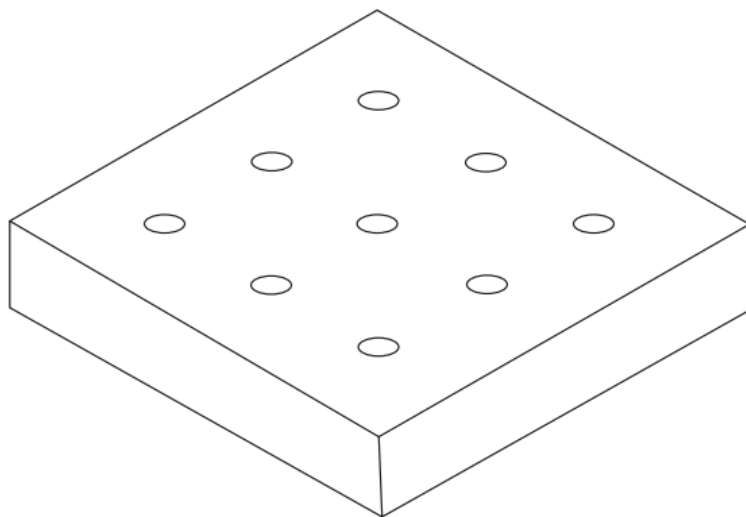
„BF – SON1“ (Soning)

„Akustický prvek sloužící k selektivní absorpci nízkých kmitočtů. Vyrobený je z laminované dřevotřísky, sololitu, vatelínu a minerální vlny. Vhodné pro akustické úpravy prostorů s vysokými nároky na vyrovnanou dobu dozvuku např. zvuková studia, režie, poslechové místnosti. Určený pro skrytou montáž např. nad prodyšným podhledem.“

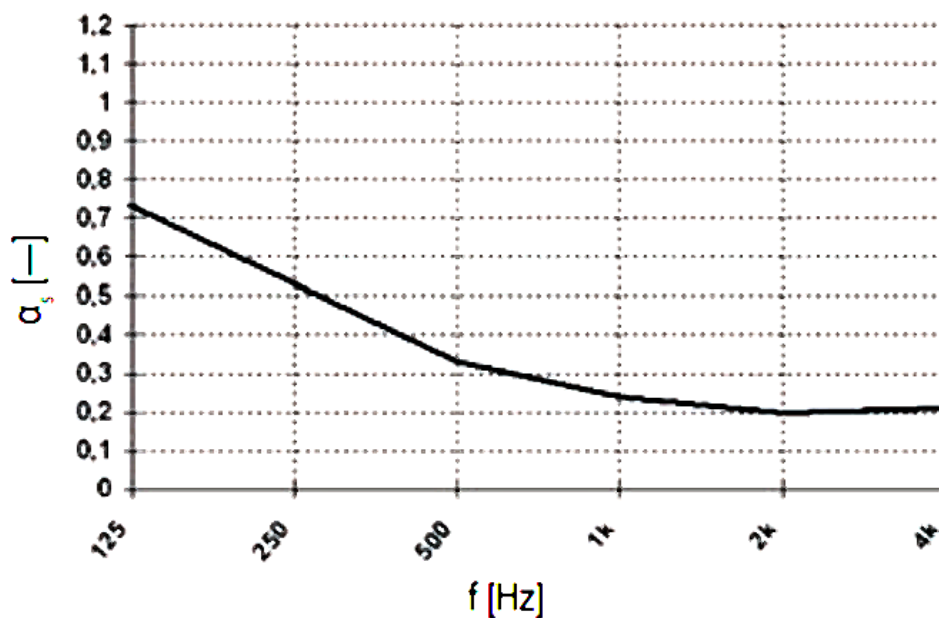
(popis výrobce [33])

Rozměry: 1000x1000x200 mm

Hmotnost: neuvedeno



Obr. 29: BF - SON1 náčres (katalogový list Soning - zdroj: www.znizovaniehluku.sk)



Obr. 30: BF - SON1 - průběh činitele pohltivosti (katalogový list Soning - zdroj: www.znizovaniehluku.sk)

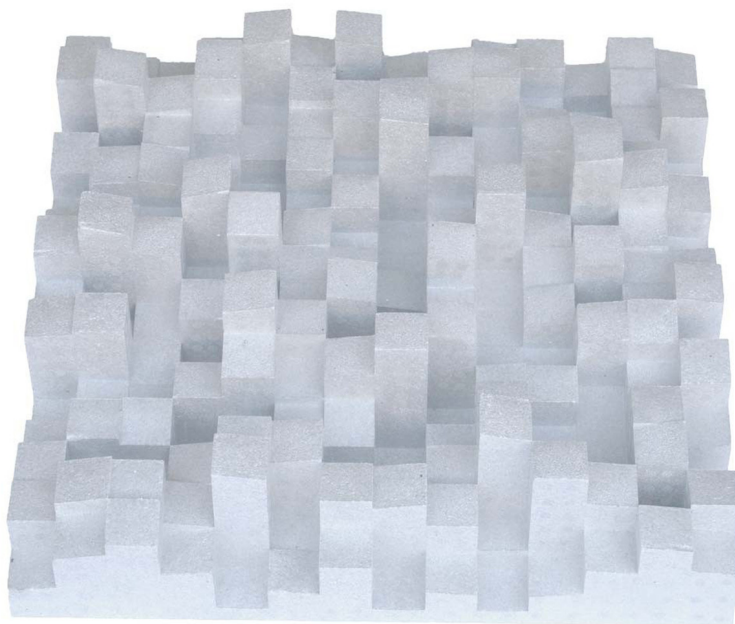
3.2.4.3 Difuzory

„Multifuser DC 2“ (Vicoustics)

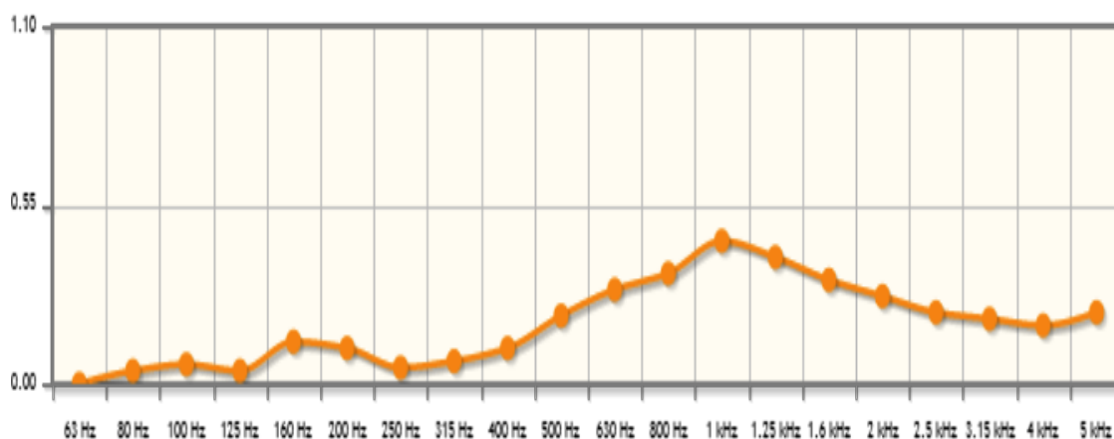
Dvoudimenzionální difuzní panel aplikovatelný na zdi či strop, účinný hlavně na středních a vysokých kmitočtech. Vyroben je z polystyrenu EPS (expandovaný polystyrén). Efektivní pro zlepšení srozumitelnosti verbálního projevu či hudby. Vhodný k aplikaci v nahrávacích studiích, posluchárnách, konferenčních místnostech apod.

Rozměry: 595x590x147mm

Hmotnost: neuvedeno



Obr. 31: Multifuser DC 2 (zdroj: www.gear4music.cz)



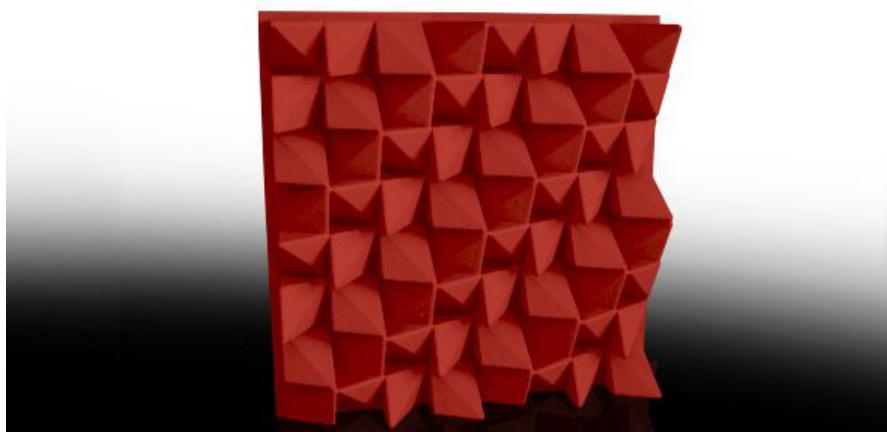
Obr. 32: Multifuser DC2 - průběh činitele pohltivosti (katalogový list – www.Vicoustic.com)

„Corralreef“ (Jocavi)

Třidimenzionální akustický difuzní panel s řízeným rozptylem vyrobený z polystyrénu s vysokou hustotou. Materiál má přidružený absorpční koeficient.

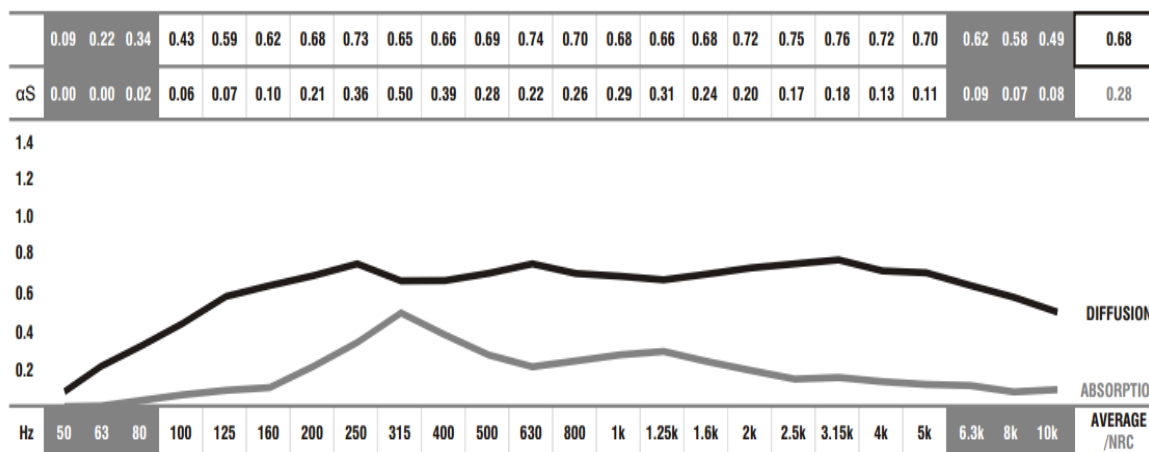
Rozměry: 60x60x12 cm

Hmotnost: 1,9 kg



Obr. 33: Corralreef difuzor (zdroj: www.sonsat.sk)

DIFFUSION - ABSORPTION COEFFICIENT



■ ABSORPTION COEFFICIENT: Values in accordance with the standards: EN 20654, ASTM C423 and EN 11654.

■ Values [$<100\text{Hz}$ and $>5\text{K}$] are Non Standard Values.

■ DIFFUSION COEFFICIENT: These values were obtained by mathematical calculations and tests carried out in our laboratory.

Obr. 34: Corralreef - koeficient pohltivosti a difúzní koeficient (katalogový list zdroj: www.jovita.net)

3.2.4.4 Bass trap

Speciálním akustickým prvkem je tzv. „bass trap“ neboli basová past. Přestože název může klamně naznačovat, že tento prvek „zachycuje“ zvuk na nízkých frekvencích, z principu vlnových délek to není možné, neboť by takový prvek musel velikostí odpovídat právě vlnové délce, a tedy mít rozměry v řádu jednotek až desítek metrů. Jedná se tedy o prvek, který pohlcuje energii na nízkých frekvencích a mění ji na tepelnou. Pracuje na principu porézního absorbéru nebo rezonátoru. Často se kombinují oba principy. Nejčastěji se umísťuje v rozích a spojnicích stěn, neboť právě v těchto místech má akustický tlak na nízkých frekvencích kmitny stojatého vlnění.[47][48]

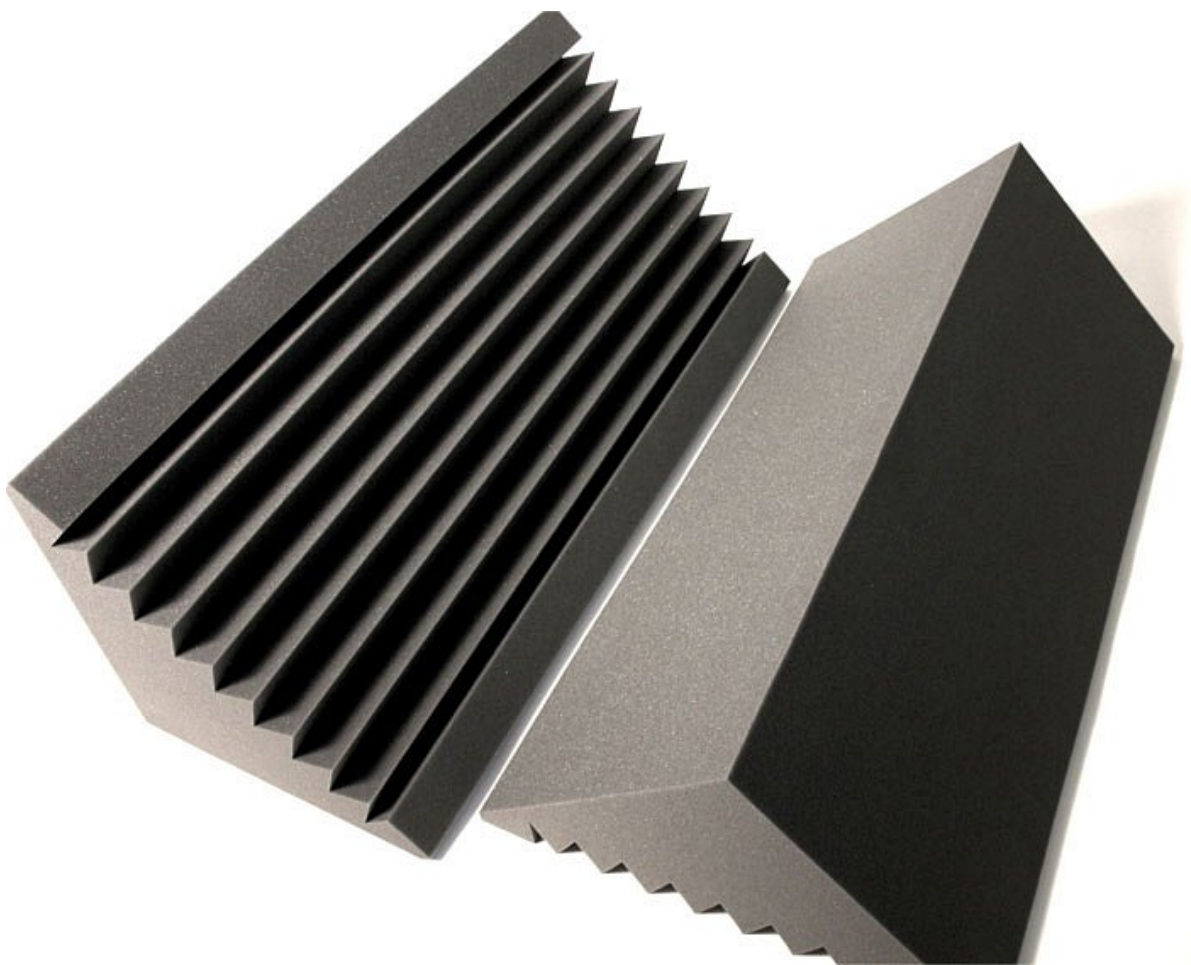
Basové pasti se v praxi využívají často v menších prostorech jako jsou zvuková a nahrávací studia, domácí kina, hudební poslechové místnosti apod. V takových místnostech je vzhledem k rozměrům prostoru a vlastním módům problematický poslech především na basových frekvencích. Vhodné použití basových pastí problémy na nízkých frekvencích v menších místnostech vyřeší nebo přinejmenším omezí.[29][47]

„Bass trap“ (akusticka-pena.cz)

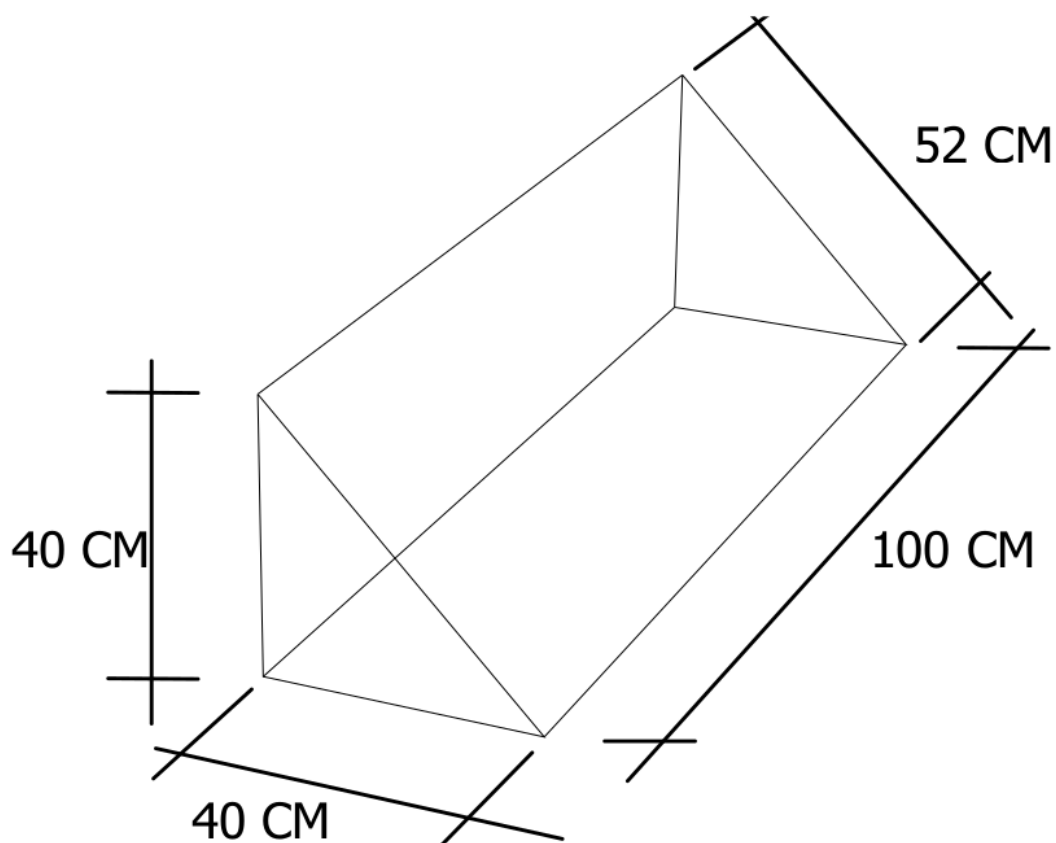
Basová past pohlcující nízké kmitočty vhodná pro umístění do rohů. Vyrobená z polyuretanové pěny a prodejce nabízí i samozhášivou úpravu.

Rozměry: viz obrázek

Hmotnost: neuvedeno



Obr. 35: Bass trap (Zdroj: <https://www.akusticka-pena.cz>)



Obr. 36: Bass trap – rozměry (Zdroj: <https://www.akusticka-pena.cz>)

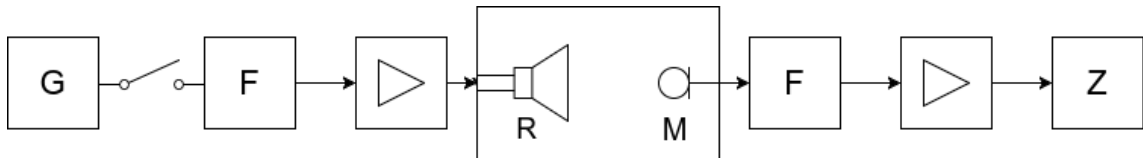
Tabulka závislosti činitele zvukové pohltivosti alfa na kmitočtu f (Hz)						
Frekvence	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Alfa činitel	0,70	0,91	0,65	0,70	0,64	0,78

Obr. 37: Bass trap – hodnoty činitele pohltivosti (Zdroj: <https://www.akusticka-pena.cz>)

4 Praktická část

4.1 Měření doby dozvuku

Cílem této práce je získat objektivní kvalitativní parametry určující akustické vlastnosti dané místnosti pro následný návrh její úpravy. Důležitým parametrem charakterizující akustické vlastnosti prostoru je právě doba dozvuku, která je v dnešní době nejčastěji měřenou objektivní veličinou pro popis akustiky prostoru. Výsledky řady testů v průběhu let ukazují, že doba dozvuku je klíčovým faktorem ovlivňující kvalitu poslechu v uzavřeném prostoru. [1] Proto bude v rámci této práce veškeré měření zacíleno na získání doby dozvuku. Standardní metoda měření doby dozvuku je popsána na obrázku 38.



Obr. 38: Blokové schéma zapojení standardní metody měření doby dozvuku

Řetězec pro měření se skládá na vysílací straně z generátoru šumivého signálu (G), oktávového (třetinooktávového) filtru (F), zesilovače reproduktoru (R) s všesměrovou charakteristikou vyzařování. Na přijímací straně je zapojen mikrofon s všesměrovou charakteristikou (M), oktávový nebo třetinooktávový filtr (F), zesilovač a hladinový zapisovač (Z). [1]

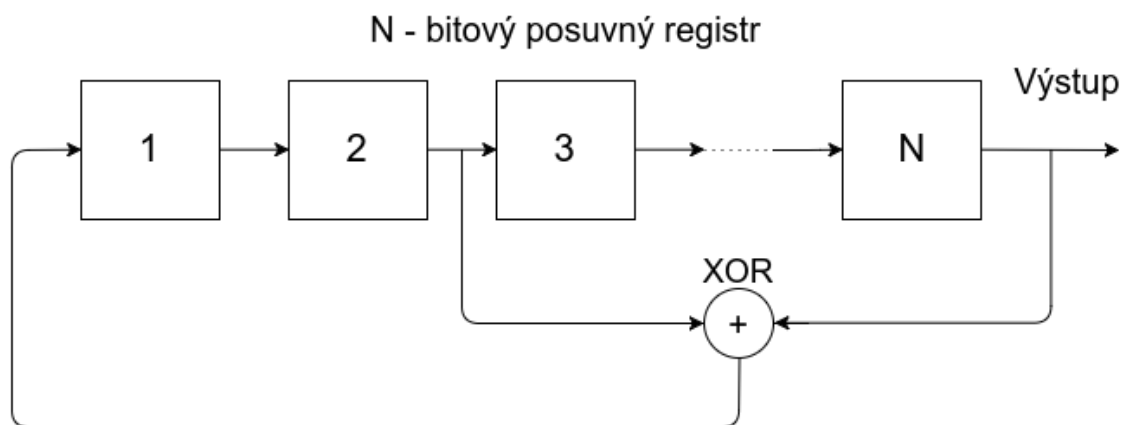
Zdroj musí vyzařovat takovým akustickým výkonem, aby hladina akustického tlaku měla alespoň 40 dB odstupu od hladiny hluku v pozadí [1] (zdroje [27,44] připouští menší i větší minimální hladiny pro různé případy). K vybuzení se používá šumový či modulovaný sinusový signál. Po vypnutí zdroje se zaznamenává pokles hladiny akustického tlaku. Měření by se mělo provádět pro více poloh snímacího mikrofону, ideálně v typických polohách zdrojů (např. řečník). V dnešní době se místo magnetických a jiných zapisovačů používá počítač s vhodným zvukovým rozhraním a příslušným softwarem. V běžných podmínkách není vždy možné dosáhnout odstupu 60 dB pro získání doby dozvuku dle definice. Proto se často místo doby dozvuku dle definice T_{60} měří doba dozvuku T_{30} nebo T_{20} , kdy T_{30} je doba dozvuku přepočítána z doby potřebné pro poklesu o 30 dB $\Delta t_{30\text{dB}}$, platí tedy, že $T_{30} = 2\Delta t_{30\text{dB}}$ ($T_{20} = 3\Delta t_{20\text{dB}}$, pokles o 20 dB). Měří se také *počáteční doba dozvuku* EDT (early decay time), tedy přepočet doby dozvuku z doby, kdy hladina klesne o 10 dB od ustáleného stavu. EDT se považuje za lepší popis vnímání zvuku v místnosti. [1, 4 13, 27]

4.1.1 Měření pomocí MLS signálu

Analýza akustických vlastností prostor pomocí klasické impulzní metody je v praxi nemožná, neboť impulzní odezva prakticky zanikne v hluku pozadí. V dnešní době se pro zjištění impulzní odezvy (díky zvýšení výkonu výpočetní techniky) používá metoda, která tento nedostatek kompenzuje. Metoda zvaná **MLS - Maximum-Length Sequences** spočívá v generování pseudonáhodné 2-úrovňové posloupnosti. Taková posloupnost má podobné vlastnosti jako šum, a tedy ploché frekvenční spektrum a konstantní spektrální výkonovou hustotu (kromě malé stejnosměrné složky). Velkou výhodou použití MLS posloupností je velká šumová imunita měření. Perioda MLS signálu je určena jako

$$L = 2N - 1 \quad (14)$$

kde N je celé číslo (pro měření akustických vlastností N do 16). Taková posloupnost je generována pomocí řady posuvných registrů se zpětnou vazbou.



Obr. 39: Blokové schéma generátoru MLS signálu

Aby se posloupnost nezačala opakovat v cyklu kratším než je maximální délka, je nezbytné dodržet vhodné umístění zpětných vazeb registru dané tabulkou zpětných vazeb, tedy jaké bity budou zavedeny jako zpětnovazební. Pro správnou funkci je nutné na začátku nastavit všechny bity na log „1“ abychom předešli tzv. „zakázanému stavu“, kdy všechny registry budou v hodnotě log „0“ a generátor nezačne pracovat.

Pro samotné použití těchto signálů je nezbytné binární signál převést na analogový symetrický 2 – úroňový signál, kdy binárnímu stavu „1“ bude přiřazena analogová úroveň „-1V“ a stavu „0“ úroveň „+1V“.

Po aplikaci tohoto signálu bude námi zaznamenaný signál obsahovat jak původní signál tak i impulsní odezvu dané místnosti. Závislost výstupního signálu můžeme vyjádřit jako konvoluci vstupního signálu $x[n]$ s impulsní odezvou $h[n]$

$$y[n] = x[n] * h[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x[k] h[n-k] \quad (15)$$

kdy signál impulsní odezvy získáme vzájemnou korelační funkcí vstupního MLS signálu a jeho odezvy na výstupu (případně můžeme výpočty provádět v kmitočtové doméně, kdy spektra jednotlivých signálů mezi sebou násobíme či dělíme). [26]

4.1.2 Určení doby dozvuku z impulsní odezvy

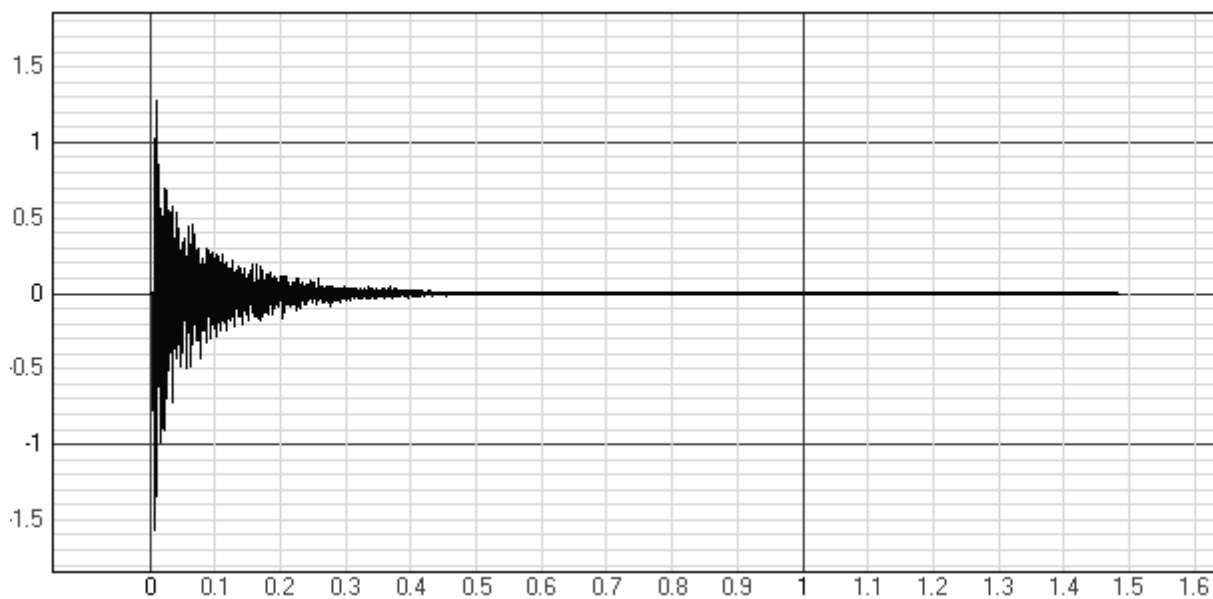
Doba dozvuku se často určuje nepřímou z impulsní odezvy, získané například metodou MLS, pomocí Schroederovy metody zpětné integrované impulsové odezvy. Jedná se o vyjádření vztahu mezi průměrným poklesem energie $E(t)$ příslušnou impulsovou odezvou $p(t)$

$$E(t) \sim \int_t^{\infty} p^2(x) dx = \int_0^{\infty} p^2(x) dx - \int_0^t p^2(x) dx \quad (16)$$

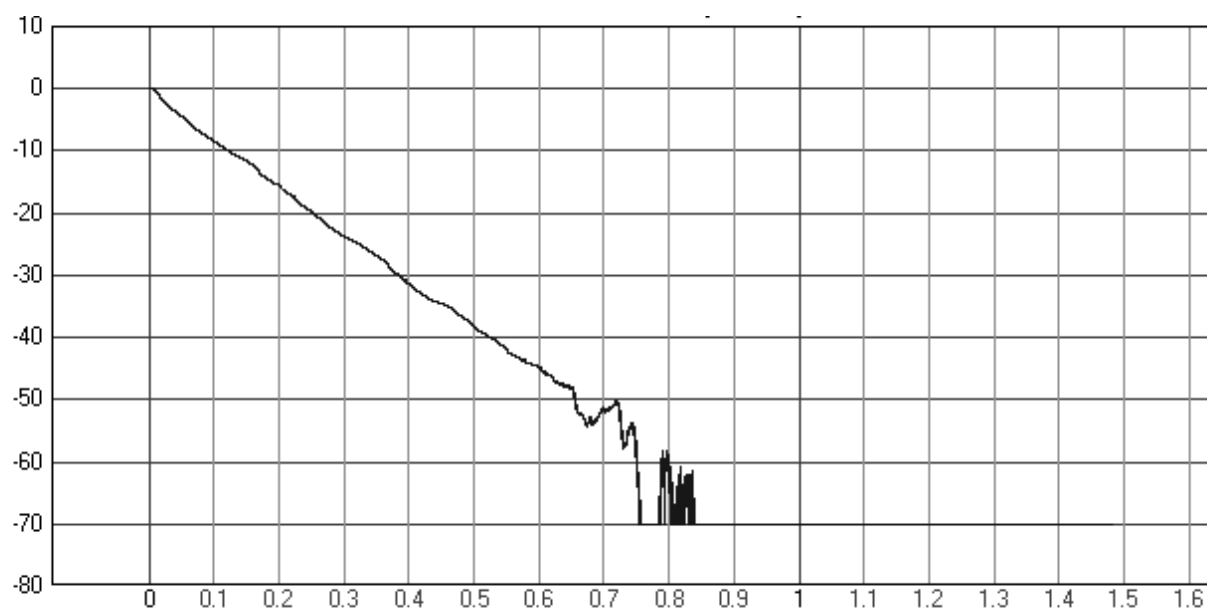
kde E je energie křivky poklesu jako funkce času
 p akustický tlak impulsové odezvy jako funkce času
 t čas.

[1, 27]

Ze vzniklého časového průběhu doznívání následně získáme dobu dozvuku, často místo T_{60} se určí T_{30} či T_{10} (případně EDT). V následujících ilustracích 40 a 41 je znázorněn příklad impulsní odezvy a vyjádření dozvuku pomocí Schroederovy křivky poklesu.



Obr. 40: Příklad impulsní odezvy horizontální osa – čas v sekundách, vertikální osa – amplituda tlaku v Pascalech) [převzato z programu EASERA]



Obr. 41: Dozvukový pokles – Schroederova křivka z impulsní odezvy z obr. 40 (horizontální osa – čas v sekundách, vertikální osa – normovaná hladina zvuku v decibelech kdy 0 dB je maximum). Zde je vidět, že z dané křivky by bylo složité určit T_{60} , doba dozvuku T_{10} , T_{20} a T_{30} se ale dá určit poměrně přesně [převzato z programu EASERA]

4.2 Měření místnosti

Účelem tohoto měření bylo změřit dobu dozvuku některých místností. Byly zvoleny tři místnosti. Neodhlučněná učebna 554 a multimediální studio (552) na katedře radioelektroniky fakulty elektrotechnické a laboratoř C3-438. První měření sloužilo především k porovnání akusticky upravené a neupravené místnosti s návrhem na zlepšení akustických vlastností (učebna 554 a studio). Druhé měření slouží k následnému návrhu úpravy akustiky, kdy se mění účel místnosti z laboratoře na posluchárnu (místnost 438).

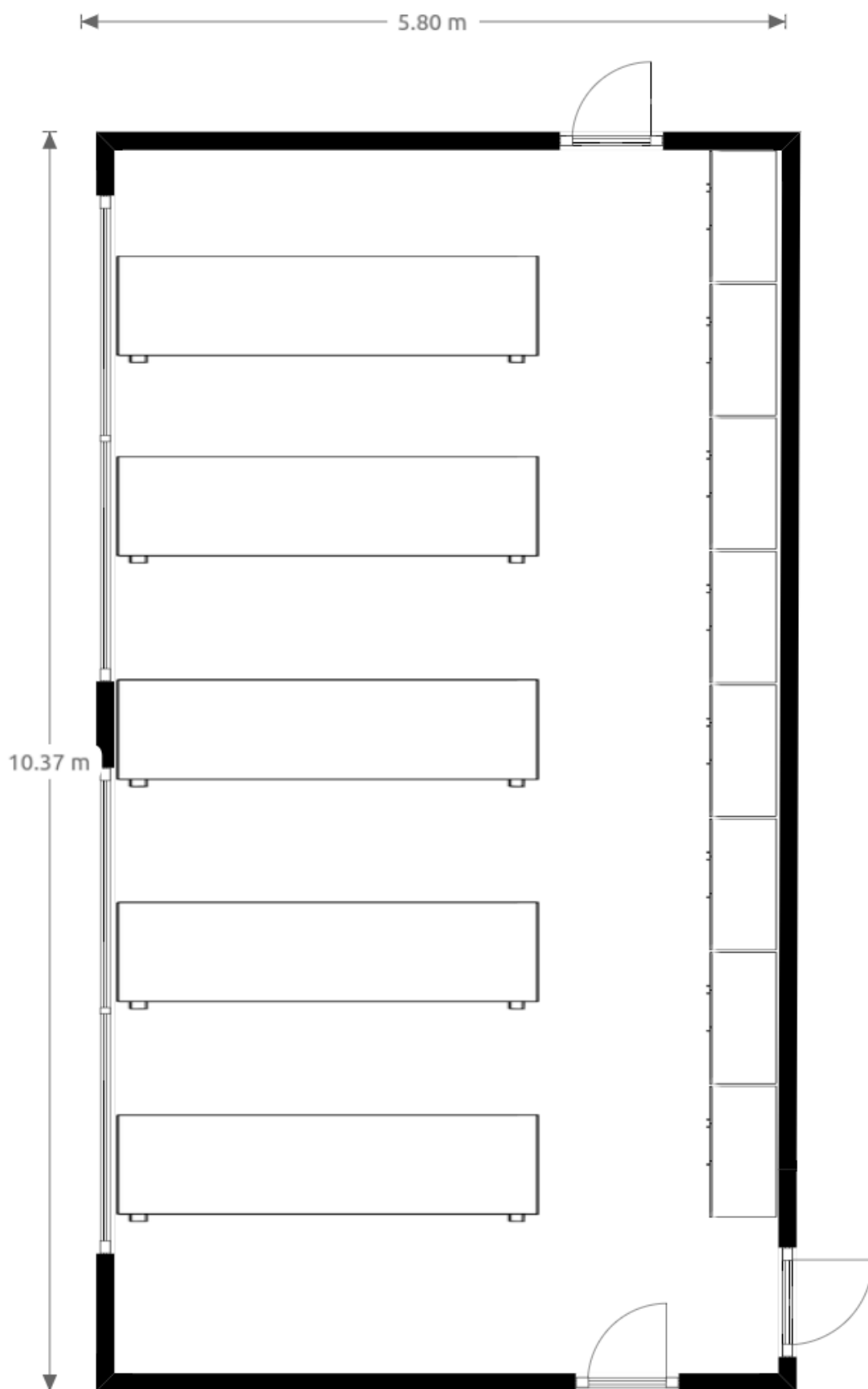
4.2.1 Učebna 554 a studio

Učebna 554 (obr. 42) není nijak akusticky upravena. Je vybavena několika školními lavicemi a skříněmi podél stěny. Ostatní zdi jsou holé a podlaha je pokryta linoleem. Na jedné straně navíc jsou vsazena velká okna. Dá se tedy předpokládat, že ta místnost není ideální z hlediska kvality poslechu přednášejícího, jelikož značná plocha je obsazena materiály s nízkou pohltivostí. V tabulce 1 jsou uvedeny krajní plochy místnosti společně s použitými materiály a objem místnosti. Rozměry byly změřeny pomocí obyčejného svinovacího metru a výsledné plochy byly zaokrouhleny na celá čísla.

Tabulka 1: Rozměry učebny 554 (krajní plochy)

Materiál	plocha [m²]
okna	23
linoleum	48
Stěny (beton)	111
Dveře (3x)	5
Skříně dřevěné	24
celková plocha [m²]	211
Objem [m³]	182
objem s nábytkem [m³]	171

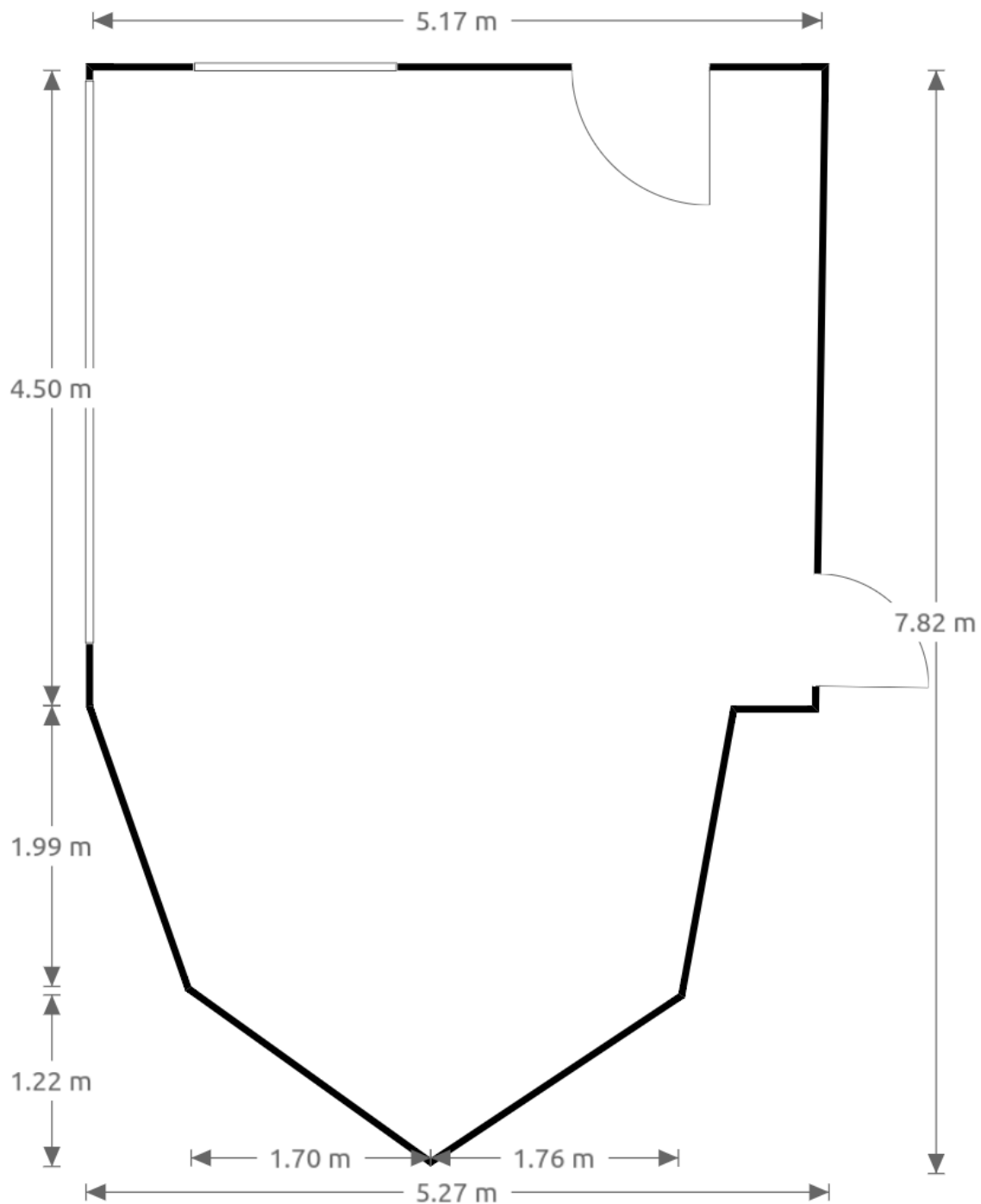
Oproti tomu, multimediální studio (obr. 43) je již akusticky upraveno. Po celé místnosti jsou na značně velkých plochách zdi obloženy akustickými panely Sonit, které vykazují vysokou akustickou pohltivost především ve středních kmitočtech. Na jedné straně se nachází poměrně obsáhlý závěs, který tlumí na středních a vyšších kmitočtech a navíc je strop podložen stropními podhledy, které absorbují zvuk na nízkých frekvencích. Na podlaze je položen tenčí koberec. Zde je tedy předpoklad krátké doby dozvuku, což je již při rozhovoru v této místnosti patrné. V tabulce 2 jsou uvedeny hlavní plochy společně s použitými materiály a objem místnosti.



Obr. 42: Náčrt půdorysu místnosti 554 (společně s nábytkem)

Tabulka 2: Rozměry povrchů studia a použité materiály

Materiál	plocha [m ²]	Materiál	plocha [m ²]
skleněná okna	2	tenký koberec	33
zavěs	15	dřevěné překližky	4
stěna (beton)	33	polstrované dveře	2
dřevěné dveře	2	Nf panely	23
Sonit	31	objem [m³]	108



Obr. 43: Náčrt půdorysu multimediálního studia

4.2.1.1 Teoretická doba dozvuku

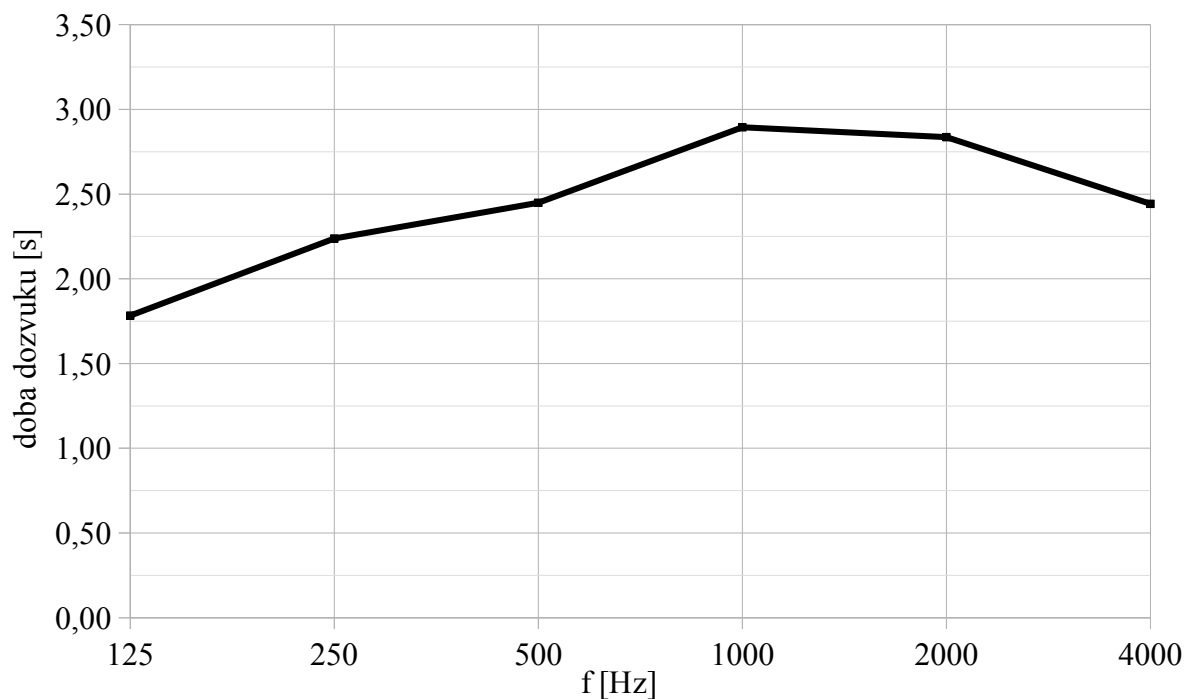
Po zjištění rozměrů a materiálů v obou místnostech můžeme vypočítat teoretickou dobu dozvuků dle některých ze vztahů na výpočet (5, 7, 8). Pro výpočet bylo také nezbytné zjistit činitele pohltivosti daných materiálů. Hodnoty jsou převzaty ze zdrojů. [5][39][41]. Byla vypočtena konkrétně doba dozvuku podle Sabina a Eyringa

Učebna 554

Tabulka 3: Rozměry ploch, materiály a činitele pohltivosti a vypočtená hodnota doby dozvuku (místnost 554)

Materiál	plocha [m ²]	kmitočty f [Hz]					
		125	250	500	1000	2000	4000
		činitel pohltivosti α [-]					
Okna	23	0,3	0,2	0,15	0,1	0,06	0,04
Linoleum	48	0,02	0,025	0,03	0,035	0,04	0,04
Zed' - beton	111	0,01	0,016	0,019	0,023	0,035	0,05
Dveře (dřevěné) (3x)	5	0,15	0,11	0,09	0,07	0,06	0,06
Skříně	24	0,15	0,11	0,1	0,07	0,06	0,07
celková plocha	211	střední činitel pohltivosti α [-]					
		0,063	0,051	0,047	0,041	0,042	0,049
Doba dozvuku (Sabine)	T_S [s]	2,10	2,60	2,84	3,27	3,14	2,70
Doba dozvuku (Eyring)	T_E [s]	2,03	2,53	2,77	3,20	3,07	2,63

Průměrná doba dozvuku dle vztahu (5, 7) pro učebnu 554 je $T_S = T_E = 2,7$ s. Z toho můžeme určit Schroederův kmitočet dle vztahu (2) $f_r = 244$ Hz.



Obr. 44: Graf - teoretická doba dozvuku pro místnost 554

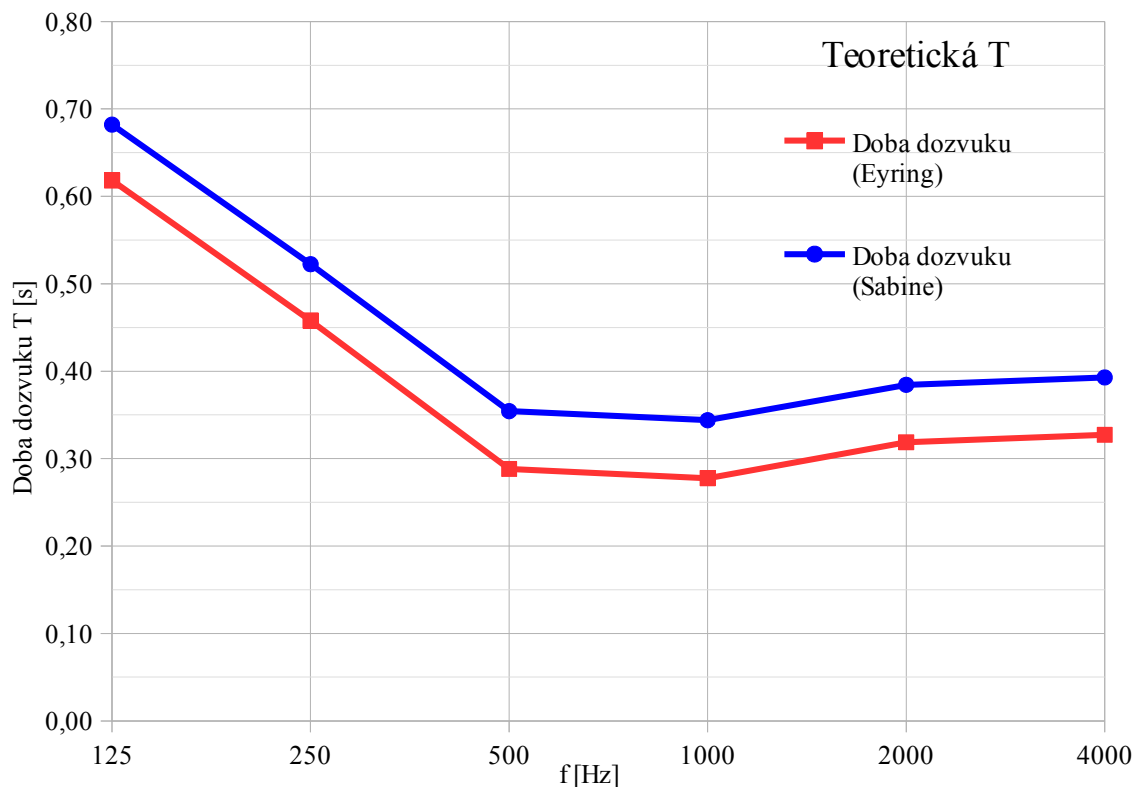
Studio (552)

Tabulka 4: Rozměry ploch, materiály a činitele pohltivosti a vypočtená hodnota doby dozvuku (studio)

Materiál	plocha [m ²]	kmitočet f [Hz]					
		125	250	500	1000	2000	4000
		činitel pohltivosti α [-]					
sklo	2	0,3	0,2	0,15	0,1	0,06	0,04
závěs	15	0,07	0,3	0,5	0,7	0,7	0,6
stěna	33	0,01	0,016	0,019	0,023	0,035	0,05
dřevěné dveře	2	0,15	0,11	0,09	0,07	0,06	0,06
Sonit	31	0,18	0,38	0,78	0,75	0,55	0,5
tenký koberec	33	0,05	0,1	0,25	0,3	0,35	0,4
dřevěné překližky	4	0,08	0,08	0,09	0,1	0,1	0,1
polstrované dveře	2	0,25	0,3	0,4	0,45	0,45	0,4
Nf panely	23	0,7	0,55	0,35	0,25	0,2	0,2
celková plocha [m²]	143	střední činitel pohltivosti α [-]					
objem [m³]	108	0,181	0,236	0,349	0,359	0,321	0,314
Doba dozvuku (Eyring)	T [s]	0,62	0,46	0,29	0,28	0,32	0,33
Doba dozvuku (Sabine)	T_s [s]	0,68	0,52	0,35	0,34	0,38	0,39

Průměrná doba dozvuku dle vztahu (5, 7) pro studio je $T_s = 0,45$ s. $T_E = 0,38$ s.

Schroederův kritický kmitočet dle vztahu (2) $f_{rS} = 129$ Hz, $f_{rE} = 119$ Hz.



Obr. 45: Graf - teoretická doba dozvuku pro studio

4.2.1.2 Měření

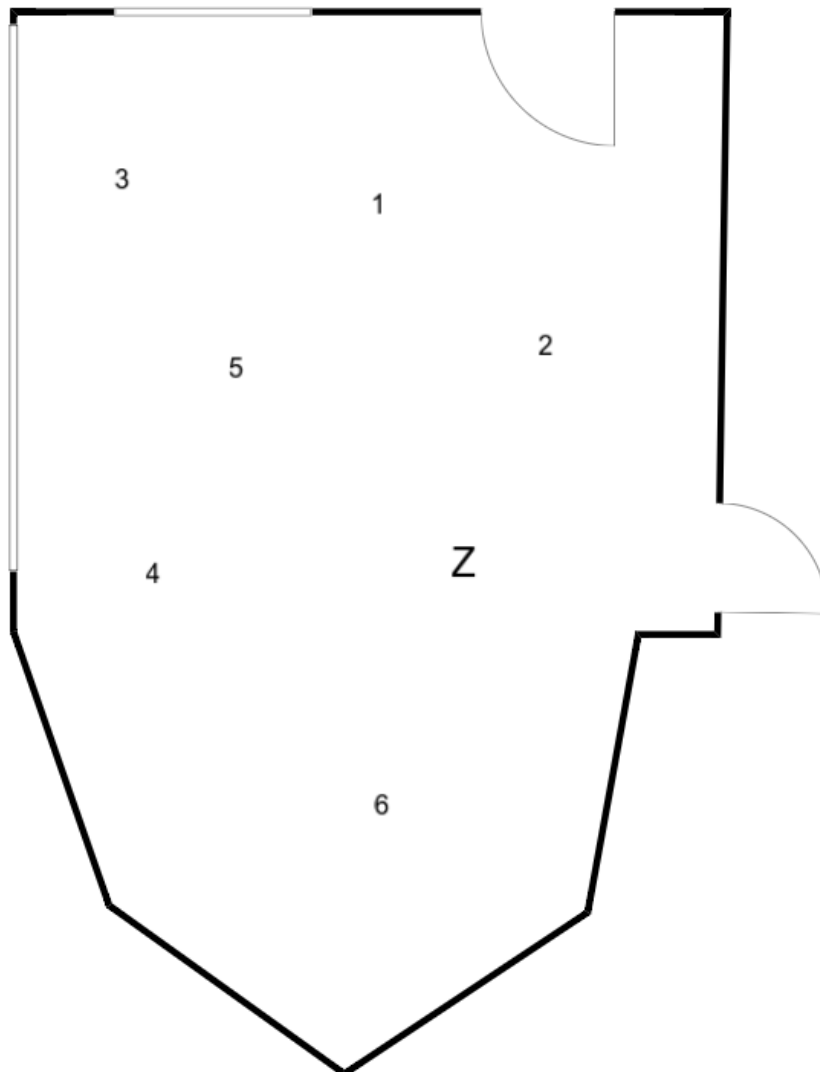
Měření vychází ze standardního způsobu měření popsaného výše (kap. 4.1) s některými modifikacemi. Byl použit profesionální software EASERA, který sám generuje měřicí signál, v tomto případě MLS (kap. 4.1.1) a následně zaznamenává veškerá potřebná data, jako je například impulsní odezva, která je potřebná pro určení doby dozvuku.

K počítači s měřícím softwarem byla připojena zvuková karta. Na výstup zvukové karty byl napojen audio zesilovač SONY TA-FB920R, ke kterému byl připojen všesměrový reproduktor SinusLive. Do vstupu zvukové karty byl přes měřicí zesilovač Brüel & Kjær 2525 zapojen všesměrový měřicí mikrofón Brüel & Kjær 2671. Pozice zdroje a mikrofónu jsou znázorněny na příslušných plánech. Reproduktor se nacházel ve výšce 150 cm od podlahy, mikrofón 140 cm od podlahy. Měření bylo prováděno pro každou místnost s jednou pozicí zdroje a několika pozicemi mikrofónu.

Je nutné zmínit, že ve studiu nebylo do výpočtů zahrnuto vybavení a nábytek, takže naměřené hodnoty se mohou silně lišit od teoretických i z tohoto důvodu. Podobné je to i u učebny 554, kde se ve výpočtech neuvažovala plocha lavic (v horizontální rovině).

Pro obě místnosti budou uvedeny plány z přibližnými pozicemi zdroje (Z) a mikrofónu (čísla), výsledky a grafy pro vybrané měření (ostatní výsledky jsou přiloženy v elektronické příloze na CD).

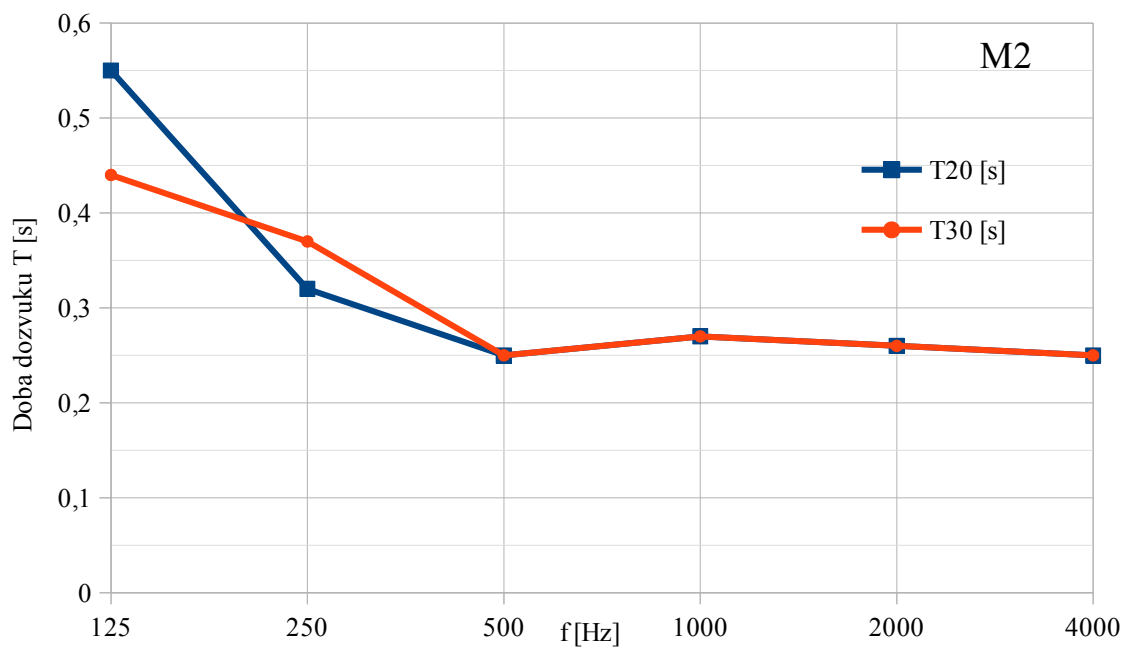
Studio



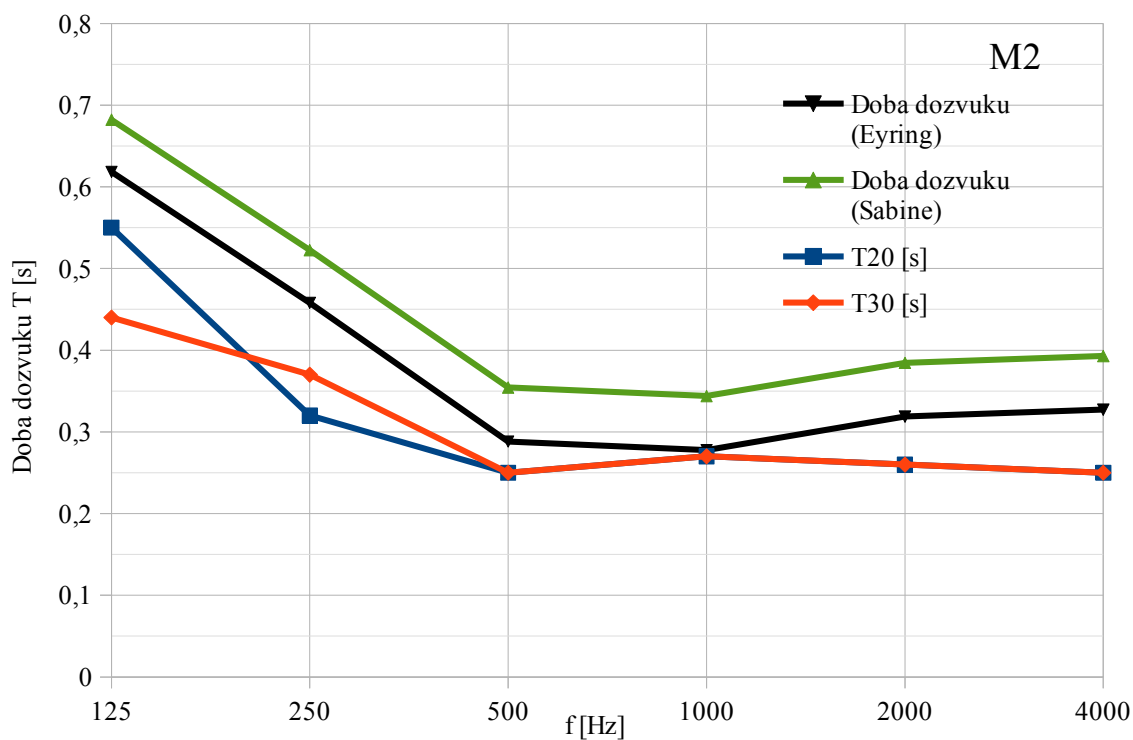
Obr. 46: Měření Studia - pozice zdroje zvuku a mikrofónu (čísla)

Tabulka 5: Měření studio - naměřené doby dozvuku (měření č. 2)

M2	frekvence f [Hz]						průměr	
	125	250	500	1000	2000	4000	250Hz-2kHz	500Hz-4kHz
EDT [s]	0,24	0,26	0,23	0,28	0,25	0,25	0,25	0,25
T10 [s]	0,37	0,23	0,35	0,27	0,29	0,26	0,29	0,29
T20 [s]	0,55	0,32	0,25	0,27	0,26	0,25	0,27	0,26
T30 [s]	0,44	0,37	0,25	0,27	0,26	0,25	0,29	0,26

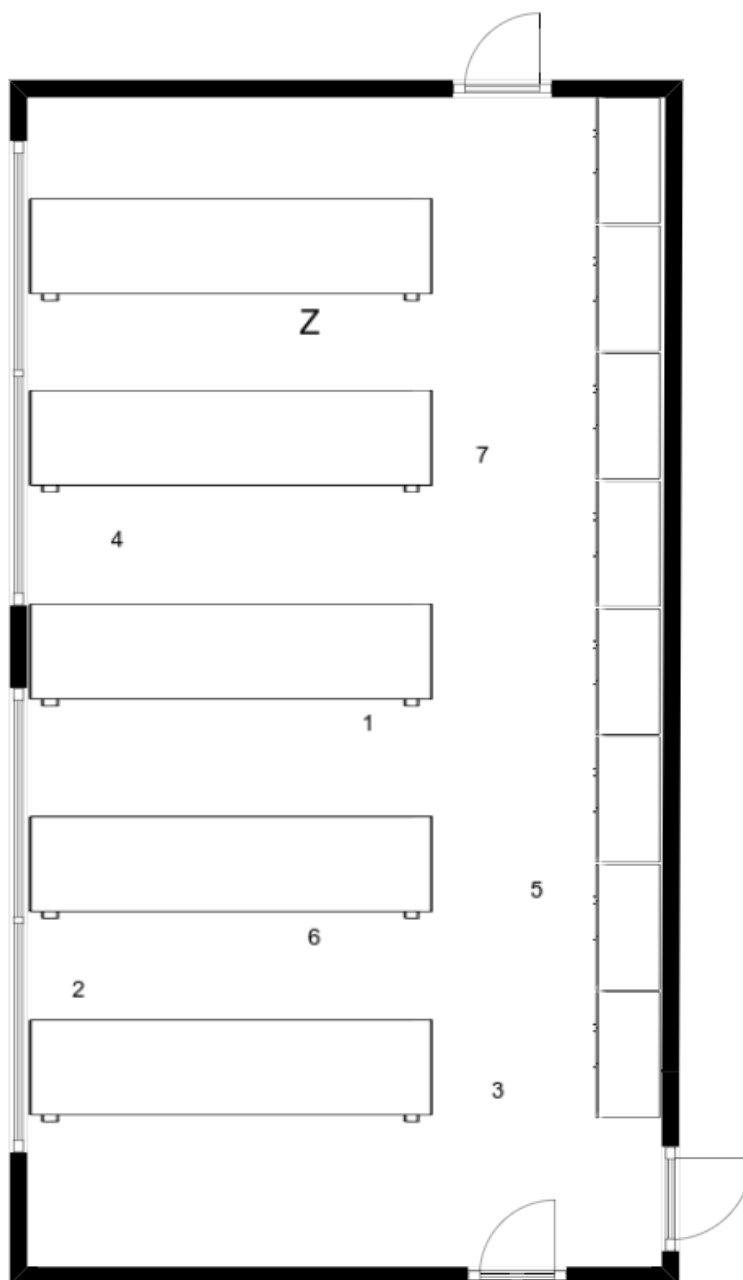


Obr. 47: Graf - Změřené doby dozvuku ve studiu (T20, T30)



Obr. 48: Graf - srovnání teoretických a naměřených hodnot doby dozvuku (STUDIO)

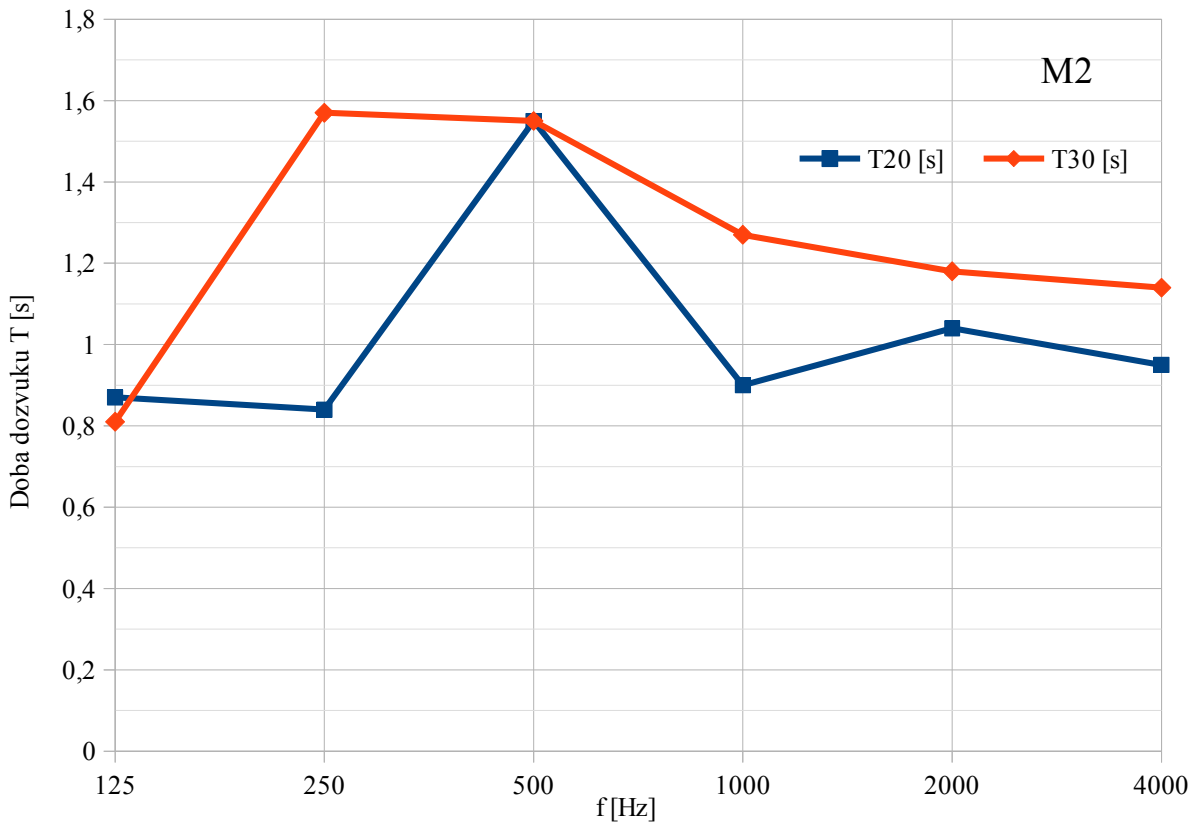
Učebna 554



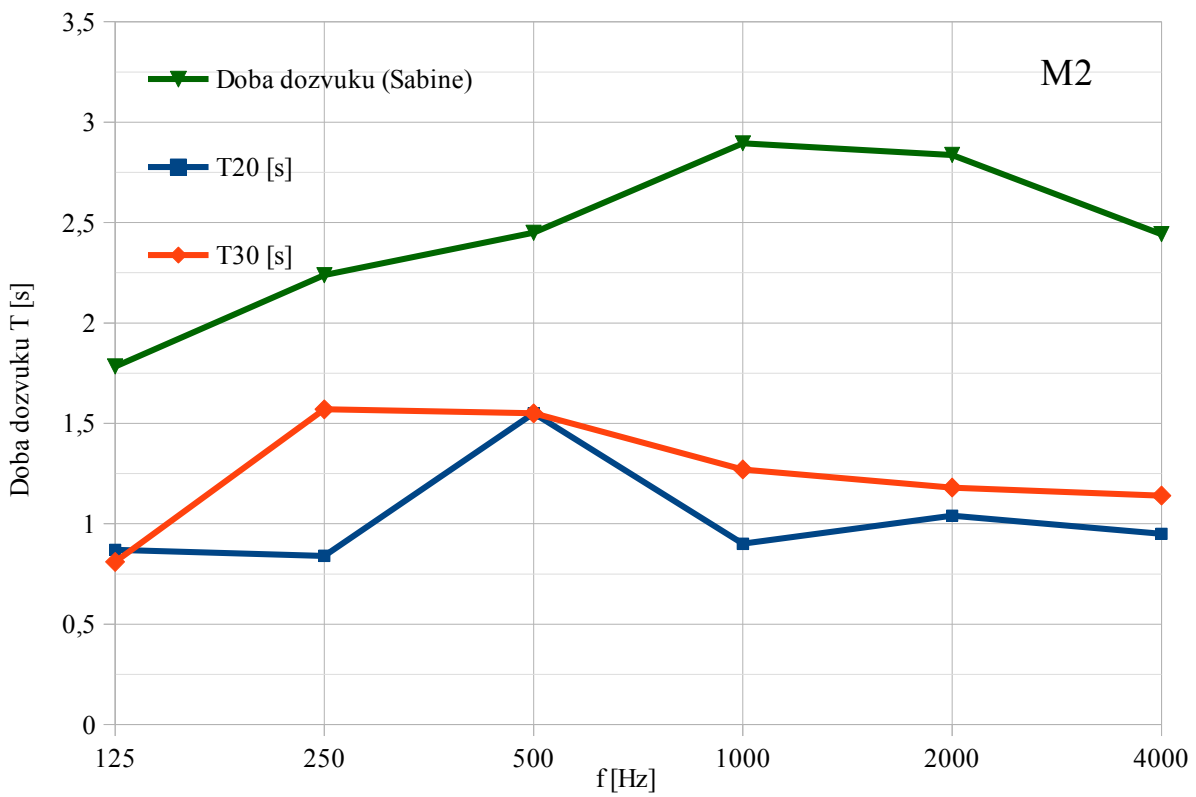
Obr. 49: Měření Učebna 554 - pozice zdroje zvuku a mikrofonu (čísla)

Tabulka 6: Měření Učebna 554 - naměřené doby dozvuku (měření č.2)

M2	frekvence f [Hz]						průměr	
	125	250	500	1000	2000	4000	250Hz-2kHz	500Hz-4kHz
EDT [s]	0,79	0,95	1,15	1,08	1,11	1,07	0,66	1,07
T10 [s]	1,11	0,96	0,79	0,85	1,09	0,97	0,66	0,92
T20 [s]	0,87	0,84	1,55	0,9	1,04	0,95	0,62	1,08
T30 [s]	0,81	1,57	1,55	1,27	1,18	1,14	0,56	1,4



Obr. 50: Graf - naměřené doby dozvuku Učebna 554 (T20, T30)



Obr. 51: Graf - srovnání teoretických a naměřených hodnot doby dozvuku (Učebna 554)

Některá měření bohužel ukazují nepřesné výsledky, kdy je na určité frekvenci doba dozvuku až několik vteřin. Jedním z důvodů by mohla být skutečnost, že umístění mikrofону bylo voleno náhodně a v daných měření byl umístěn do místa stojatého vlnění, tedy do módu místnosti.

Graf na obrázku 48 jasně ukazuje, že skutečná doba dozvuku ve studiu je dokonce kratší než teoreticky vypočítaná. Může to být způsobeno například nepřesným určením činitele pohltivosti daných materiálů, kdy byly zvoleny hodnoty uváděny pro běžné materiály a nebyly k dispozici konkrétní údaje pro materiály konkrétně v této místnosti. Navíc, do výpočtů nebylo zahrnuto žádné vybavení studia ani nábytek v něm umístěný, což pravděpodobně též ovlivnilo dobu dozvuku.

V případě učebny nastal podobný případ. Napočítaná doba dozvuku je delší než naměřená (Obr. 51). Důvodem by mohlo opět být mj. nepřesné určení koeficientu pohltivosti daných materiálů. Také je důležité zmínit, že nemalý vliv mohou mít i prostory „pod lavicemi“, jelikož tvoří další malý prostor, ve kterých dochází k odrazům na určitých kmitočtech. Je zřejmé, že výsledek bude jiný, než v případě docela prázdné místnosti. Navíc jsou místnosti poměrně malé, takže nastává problém u větších vlnových délek, tedy nižších kmitočtů. Přesto ale tato místnost vyžaduje úpravy pro zkrácení doby dozvuku. Především na středních a nízkých kmitočtech.

4.2.1.3 Návrh úpravy učebny 554

Optimální doba dozvuku pro posluchárny a učebny o objemu do 250 m³ je okolo 0,7 s (dle ČSN-73-0527 [44]). Objem dané místnosti je menší než tato hodnota. Úprava tedy bude snahou přiblížit se co nejvíce této hodnotě.

Návrh čerpá z teoretických hodnot a výpočtu a spočívá ve změně pohltivých ploch a tím pádem i průměrného činitele pohltivosti, který je pro zkrácení doby dozvuku potřeba zvýšit. Při zjištění konkrétního řešení se v tabulkovém procesoru do předem připravené tabulky pro teoretický výpočet doby dozvuku (dle Sabinova (5) nebo Eyringova (7) vzorce) dosazuje konkrétní akustický prvek se známým činitelem pohltivosti a zároveň se navrhuje plocha, kterou takový obklad zabere. Změnou obou proměnných se změní i průměrný koeficient pohltivosti a tedy i doba dozvuku.

Plochy v místnosti 554 jsou všechny silně odrazivé a tedy střední činitel pohltivosti je velmi malý, je tedy zřejmý jeden z důvodů, proč se zde zvuk bude silně odrážet a doba dozvuku nebude ideální. Z výsledků měření i z teoretického výpočtu je patrné, že je potřeba upravit dobu dozvuku jak na nízkých kmitočtech, tak i pro kmitočty 2000 – 4000 Hz (velká část řečového spektra).

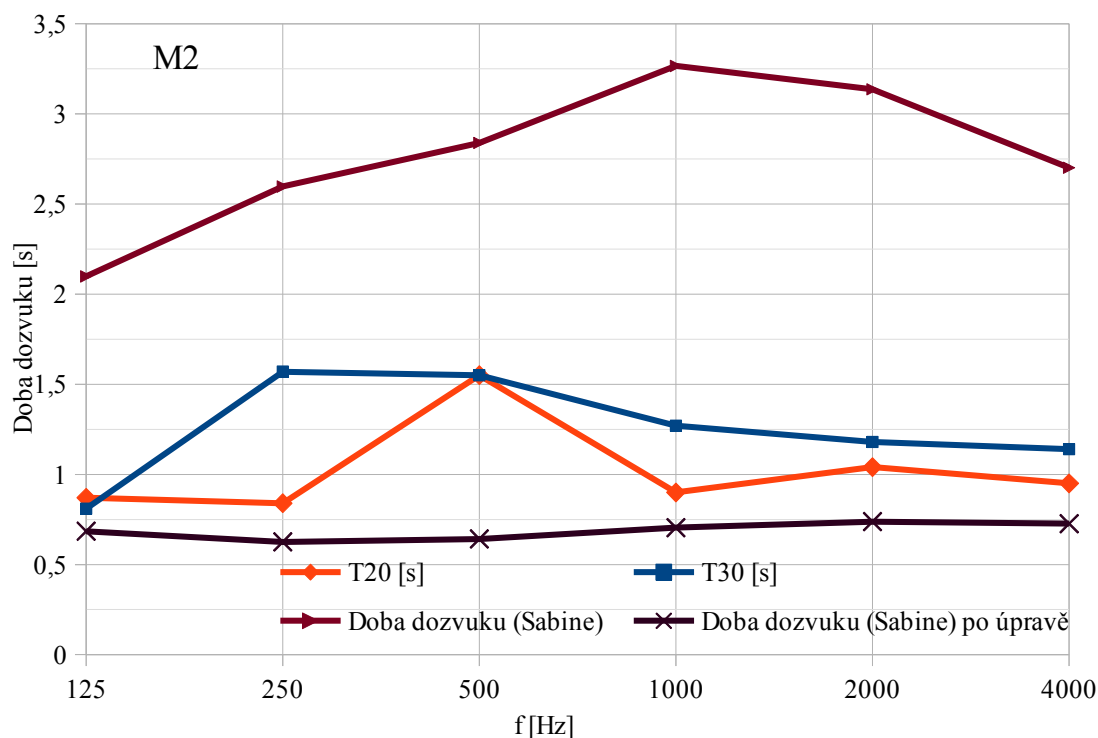
Je zřejmé, že největší plochy podílející se na odrazu zvuku jsou holé stěny, podlaha a strop. Z toho plyne, že je vhodné použít úpravy právě těchto ploch. Podlaha se pochopitelně v běžných učebnách a posluchárnách z estetických i praktických důvodů více upravit nedá. Proto při úpravě připadají v úvahu především stěny (zde konkrétně přední a zadní) a strop.

Z akustických obkladů uvedených v kapitole o akustických prvcích bylo zvoleno jako jedno z řešení kombinace obkladů BF-SON1 (str. 28) od firmy Soning a Akusto Wall A (str. 22) od firmy Ecophon. Obklady BF-SON1 zajistí ošetření především na nízkých frekvencích. V porovnání s ostatními uvedenými obklady má tento prvek relativně dobrou míru pohltivosti na nízkých kmitočtech. Jedna z možností je použít tento obklad jako stropový podhled a zakrýt tím značnou část stropu, zde zhruba tři pětiny povrchu stropu, konkrétně 30 m² (vyššího účinku můžeme docílit přidáním pěnového absorbéru do mezery mezi podhledem a stropem). Na kmitočtech důležitých pro řečový signál (tedy 500-4000 Hz) dle katalogu spolehlivě tlumí obklad Akusto Wall A. V tomto případě bylo zvoleno obložení celé zadní stěny učebny, zde tedy cca 16,5 m². Dalším místem pro aplikaci tohoto obkladu by mohla být přední stěna, kde pokryjeme 9m², nejlépe v místech za nejčastějším výskytem mluvčího.

Po této úpravě se teoretická doba dozvuku značně zkrátila, což můžeme pozorovat v tabulce 7 i v grafu na obrázku 52. Nutné ale podotknout, že návrh vychází z teoretického výpočtu doby dozvuku, která se například kvůli nepřesnému určení koeficientu pohltivosti značně liší od naměřené. Navíc je nemálo důležité, v jakém místě se bude nacházet zdroj zvuku, tedy mluvčí, a do jaké míry bude místnost obsazena posluchači. Skutečný účinek tohoto návrhu by bylo vhodné otestovat po jeho provedení.

Tabulka 7: Použité materiály a aktivní plochy - úpravy učebny 554 (návrh č.1)

Materiál	plocha [m ²]	kmitočet f [Hz]					
		125	250	500	1000	2000	4000
		činitel pohltivosti α [-]					
okna	23	0,3	0,2	0,15	0,1	0,06	0,04
linoleum	48	0,02	0,025	0,03	0,035	0,04	0,04
Stěna (beton)	56	0,01	0,016	0,019	0,023	0,035	0,05
Dřevěné dveře (3x)	5	0,15	0,11	0,09	0,07	0,06	0,06
Skříně (dřevo)	24	0,15	0,11	0,1	0,07	0,06	0,07
Ecophon Akusto Wall A	25	0,25	0,75	1	1	1	1
Podhled BF SON1 (Soning)	30	0,73	0,54	0,33	0,25	0,2	0,2
celková plocha	211	střední činitel pohltivosti α [-]					
		0,1938	0,2122	0,2069	0,1884	0,1798	0,1827
Doba dozvuku (Sabine) po úpravě	T_s [s]	0,685	0,625	0,642	0,705	0,738	0,726

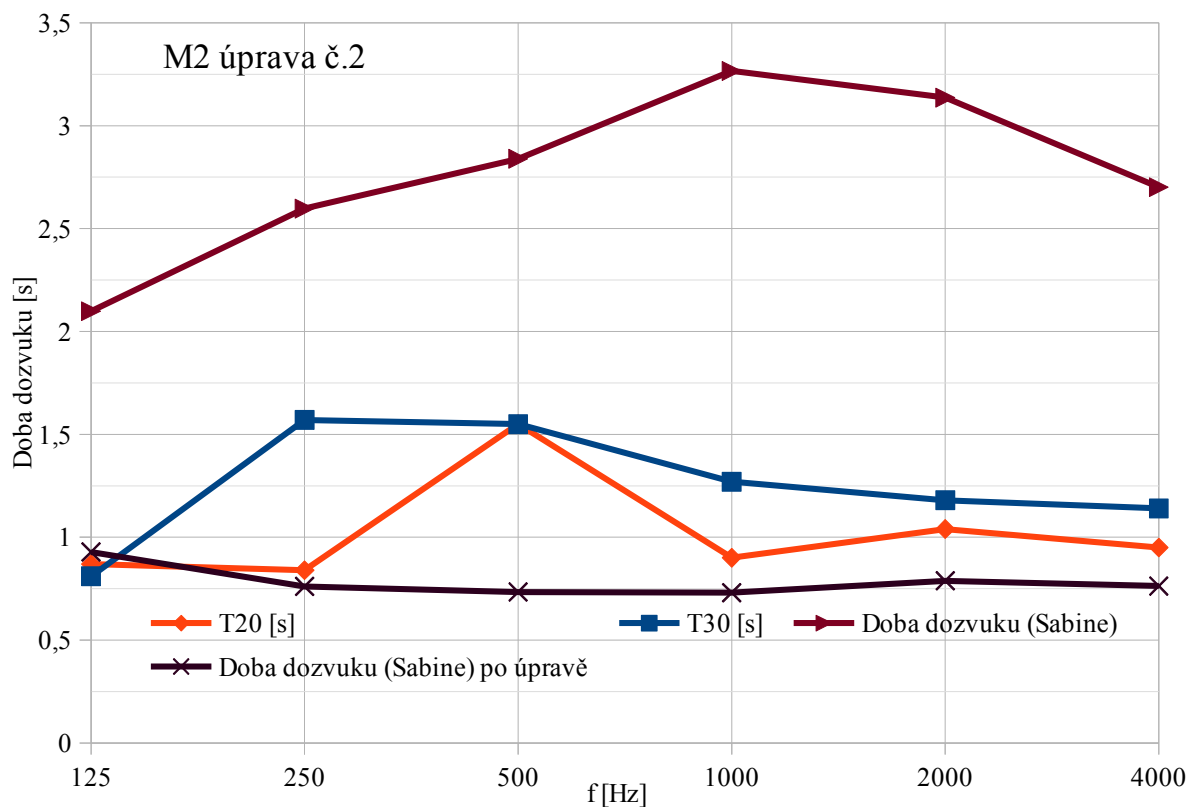


Obr. 52: Graf - Srovnání teoretické, naměřené a teoretické doby dozvuku po úpravě (učebna 554 – návrh č.1)

Další návrh zahrnuje v sobě i použití prvků jako basové pasti a difuzory. Tento návrh předpokládá použití této místnosti i jako multimediální, neboť je v učebně nainstalován promítací i zvukový systém. Lze tedy předvídat, že při audio reprodukci (např. hudba) nastane potíž především v nízkých frekvencích. Proto bylo zvoleno použití basových pastí (str. 31). Jak již bylo uvedeno, velký problém způsobuje zvuk na nízkých kmitočtech v rozích prostor. Proto tento návrh využije basových pastí podél všech čtyř vertikálních rohů místnosti po celou délku. Aktivní plocha takto nainstalovaných basových pastí bude 6,5m². Pro ještě lepší pokrytí basového spektra je aplikován do podhledové kostry obklad BF SON1 (str. 28) firmy Soning, konkrétně 10m². Taková plocha odpovídá 10 kusům takového panelu o ploše 1m². Osm panelů umístíme na strop vedle každého ze čtyř rohů, na každý roh dva panely z obou stran. Další dva panely umístíme doprostřed delších hran stropu vedle bočních zdí. Dalším obkladem, který je pro tento návrh použit, je difuzor Multifuser DC 2 (str. 29). Tento prvek sice má relativně nízký činitel pohltivosti, jeho funkce je ale především v rozptylu zvukových vln, což by mělo napomoci k lepší difúznosti zvukového pole v místnosti a tedy i lepší srozumitelnosti. Celková navrhovaná plocha pokrytá takovým obkladem je zde 8,5 m². Vzhledem k malým rozměrům jednotlivých kusů je pro tuto plochu použito 24 kusů. Po šesti panelech se aplikuje na přední i zadní stěnu. Ostatní panely umístíme na strop: čtyři panely spojíme to čtverce a takto tři vzniklé větší panely umístíme do třetin delšího rozměru stropu (do poloviny kratšího rozměru). Poslední obklad použitý v tomto návrhu je panel Ecophon Akusto Wall A (celkem 20m²) (str. 22). Ten zajistí silný útlum středních a vysokých frekvencí. Tímto obkladem pokryjeme celou dosud nepokrytou plochu zadní stěny (cca 14m²). Zbytek (6m²) pokryjeme část přední stěny, především prostor uprostřed stěny.

Tabulka 8: Použité materiály a aktivní plochy - úpravy učebny 554 (návrh č.2)

Materiál	plocha [m ²]	kmitočet f [Hz]					
		125	250	500	1000	2000	4000
		činitel pohltivosti α [-]					
okna	23	0,3	0,2	0,15	0,1	0,06	0,04
linoleum	48	0,02	0,025	0,03	0,035	0,04	0,04
Stěna (beton)	62	0,01	0,016	0,019	0,023	0,035	0,05
Dřevěné dveře (3x)	5	0,15	0,11	0,09	0,07	0,06	0,06
Skříně (dřevo)	24	0,15	0,11	0,1	0,07	0,06	0,07
Ecophon Akusto Wall A	20	0,25	0,75	1	1	1	1
Podhled BF SON1 (Soning)	10	0,73	0,54	0,33	0,25	0,2	0,2
Basstrap	6,6	0,7	0,91	0,65	0,7	0,64	0,78
Multifuser DC 2	8,5	0,05	0,05	0,2	0,45	0,25	0,2
celková plocha	207	střední činitel pohltivosti α [-]					
		0,1457	0,1776	0,1843	0,1851	0,1715	0,1773
Doba dozvuku (Sabine) po úpravě	T_s [s]	0,928	0,761	0,734	0,731	0,789	0,763

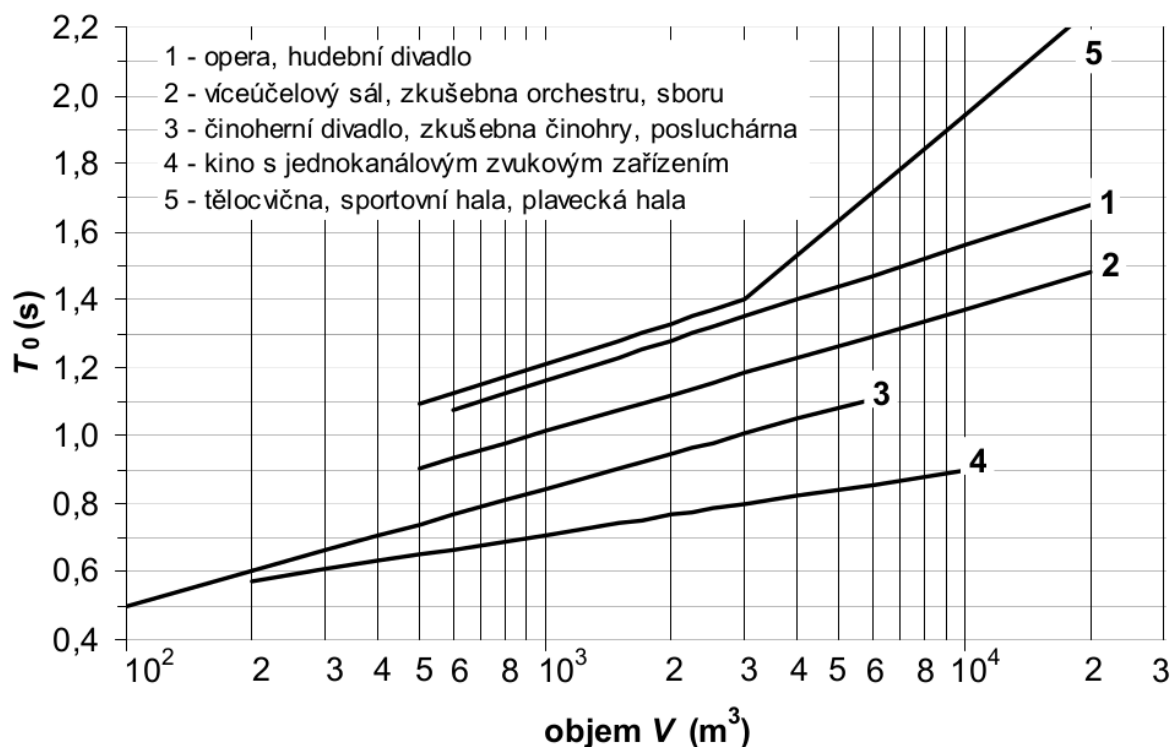


Obr. 53: Srovnání teoretické, naměřené a teoretické doby dozvuku po úpravě (učebna 554 – návrh č.2)

Oproti předešlému návrhu je zde delší doba dozvuku na nízkých frekvencích, především okolo 125 Hz. Basové pasti by však měli teoreticky tuto dobu ještě více zkrátit. Zbytek spektra je ošetřeno podobně, jako v návrhu předešlém. Vypočtená teoretická doba dozvuku je znázorněna v tabulce č. 8. Navíc je dle tohoto návrhu pokryto méně plochy akustickými obklady a místnost takto upravena může být využita nejen jako posluchárna, ale i jako multimediální učebna.

4.2.2 Učebna C3-438

Učebna 438 v bloku C3, která se používala jako laboratoř, má v budoucnu sloužit jako posluchárna. Požadavek pro tuto místnost je tedy přizpůsobit akustiku pro tyto účely. Z toho vyplývá, že je nutné zohlednit vysoké nároky na akustiku při mluveném slovu a optimalizovat dobu dozvuku především v řečovém pásmu. Je zřejmé, že kvalitně akusticky ošetřená místnost, v daném případě posluchárna, je důležitá pro dobrou srozumitelnost při poslechu a mj. redukuje míru únavy řečníka v důsledku nadměrného namáhání kvůli špatným akustickým podmínkám. K těmto faktorům přihlíží norma ČSN 73-0527 [44], která stanovuje především optimální dobu dozvuku vzhledem k účelu daného prostoru.

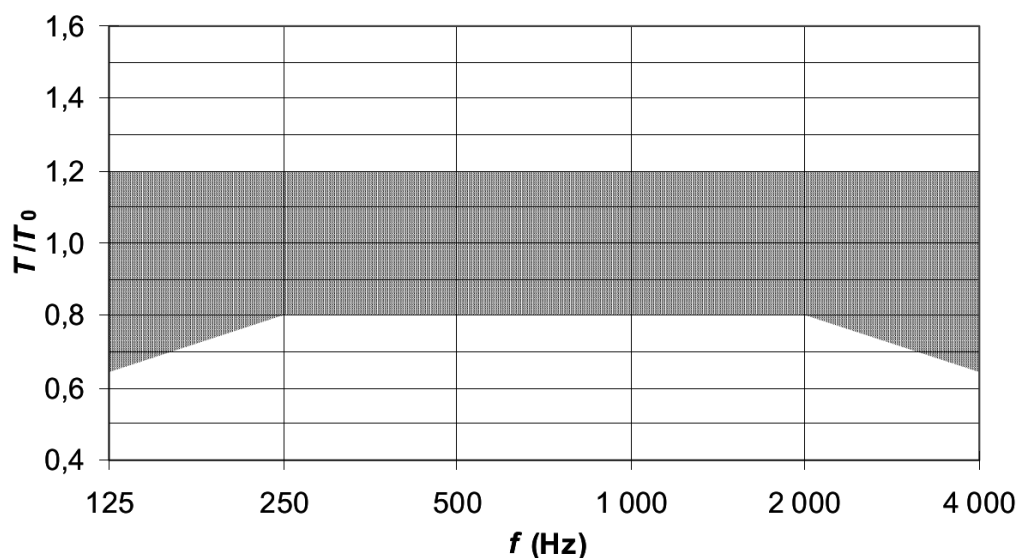


Obr. 54: Závislost optimální doby dozvuku T_0 (s) pro kmitočty 1000 Hz na objemu V (m³) uzavřeného prostoru v obsazeném stavu [ČSN 73-0527 (44)]

Tato závislost na objemu V je definována vztahem:

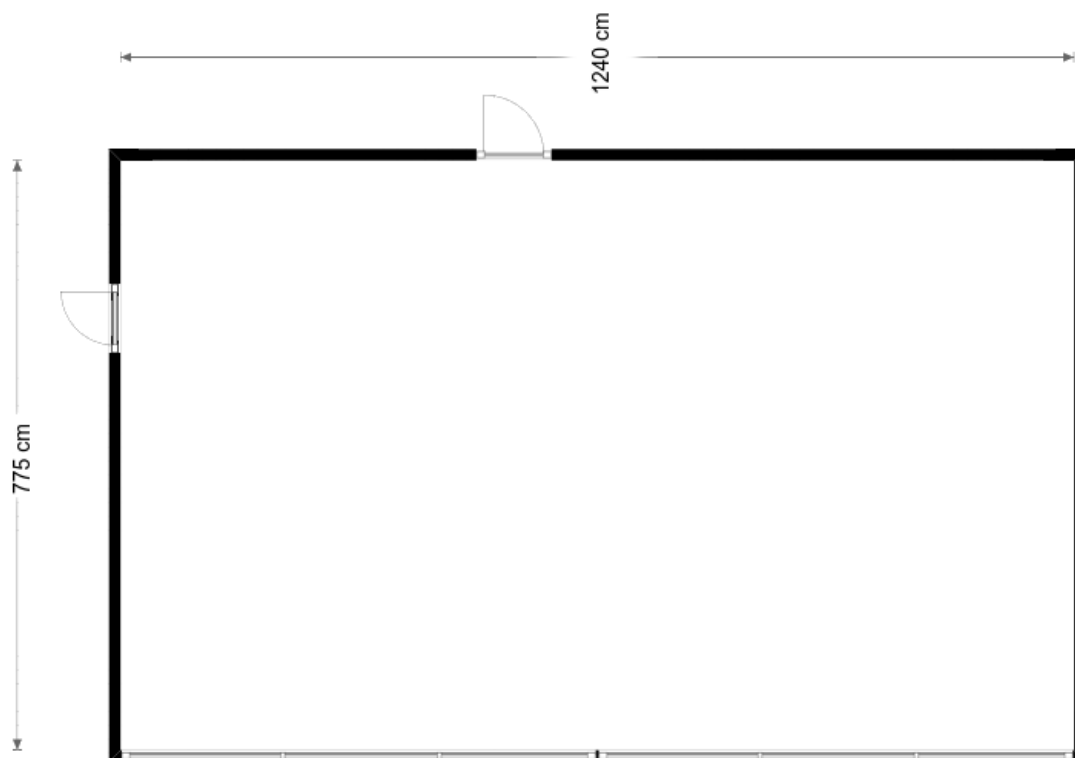
$$T_0 = 0,3424 \cdot \log V - 0,185 \quad (\text{s}) \quad (17)$$

Norma taky uvádí vztah T/T_0 , tedy poměr vypočítané doby dozvuku a optimální doby dozvuku. Z toho vychází i přípustné rozmezí poměru T/T_0 (obr. 55). Objem místnosti 438 je po zaokrouhlení 356 m³ a ze závislosti je vidět, že optimální doba dozvuku pro tento objem je kolem 0,7 s (pro 1 kHz). Návrh by měl teoretickou dobu dozvuku co nejvíce přiblížit k této hodnotě. Měl by také splnit toleranční pásmo znázorněné na obrázku 55.



Obr. 55: Přípustné rozmezí poměru dob dozvuku T/T_0 obsazeného prostoru určeného k přednesu řeči v závislosti na středním kmitočtu oktávového pásma [ČSN 73-0527 (44)]

Místnost 438 má půdorys obdélníkového tvaru s rozměry 12,40 m x 7,75 m. Výška je 3,70 m. Jedna z bočních stěn je osazena velkými okny po celé délce a v protější stěně jsou vestavěny dřevěné skříně. Zadní stěna je opatřena úložnými policemi pro místní laboratorní vybavení, podlaha je pokryta linoleem. Přední stěna a strop jsou holé. V přední a boční stěně proti oknům jsou vsazeny dveře. Všechny materiály na stěnách mají nízkou hodnotu činitele pohltivosti a tak i střední činitel pohltivosti bude malý a zvuk se zde bude silně odrážet (kromě vybavení uskladněného na policích na zadní stěně, které mohlo v nemalé míře tlumit zvuk a tím i zkrátit dobu dozvuku). Společně s objemem místnosti to povede k delší době dozvuku než je přijatelné. V místnosti se také nachází školní nábytek jako lavice a židle.



Obr. 56: Hrubý náčrt půdorysu učebny C3-438

V tabulce 9 jsou uvedeny rozměry stěn (plochy), objem a použité materiály. Rozměry byly opět změřeny obyčejným svinovacím metrem a výsledné plochy byly zaokrouhleny na celá čísla.

Tabulka 9: Rozměry a plochy učebny 438

Materiál	plocha [m ²]
okna	25
linoleum	96
Stěny (beton)	173
Dveře (2x)	4
Skříně dřevěné + lavice	74
celková plocha [m²]	371
Objem [m³]	356

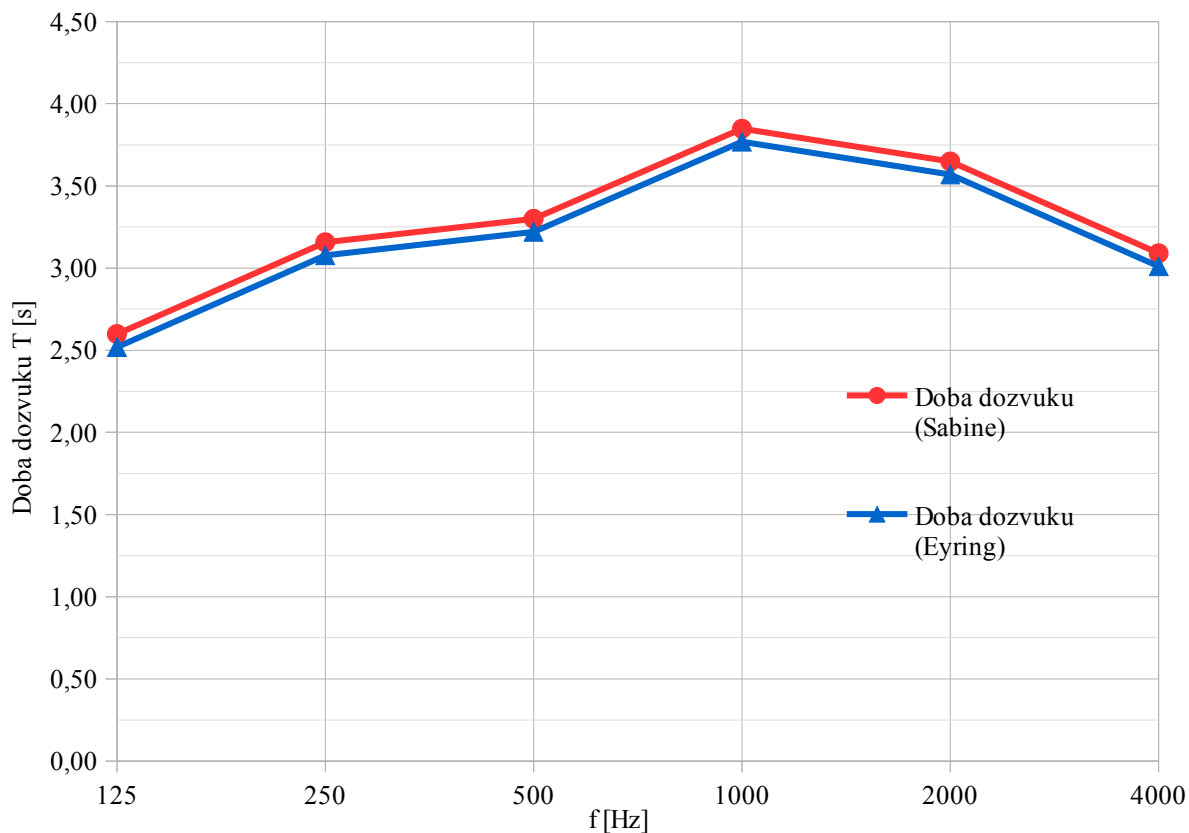
4.2.2.1 Teoretická a naměřená doba dozvuku učebny 438

Rozměry a hodnoty činitele pohltivosti, čerpány z [5][39][41], umožní výpočet teoretické doby dozvuku dle vztahu podle normy 73-0525 [45]. Výpočet, podobně jako pro učebnu 554 a studio, byl proveden podle Sabina a Eyringa (5, 7).

Tabulka 10: Rozměry ploch, materiály a činitele pohltivosti a vypočtená hodnota doby dozvuku (místnost 438)

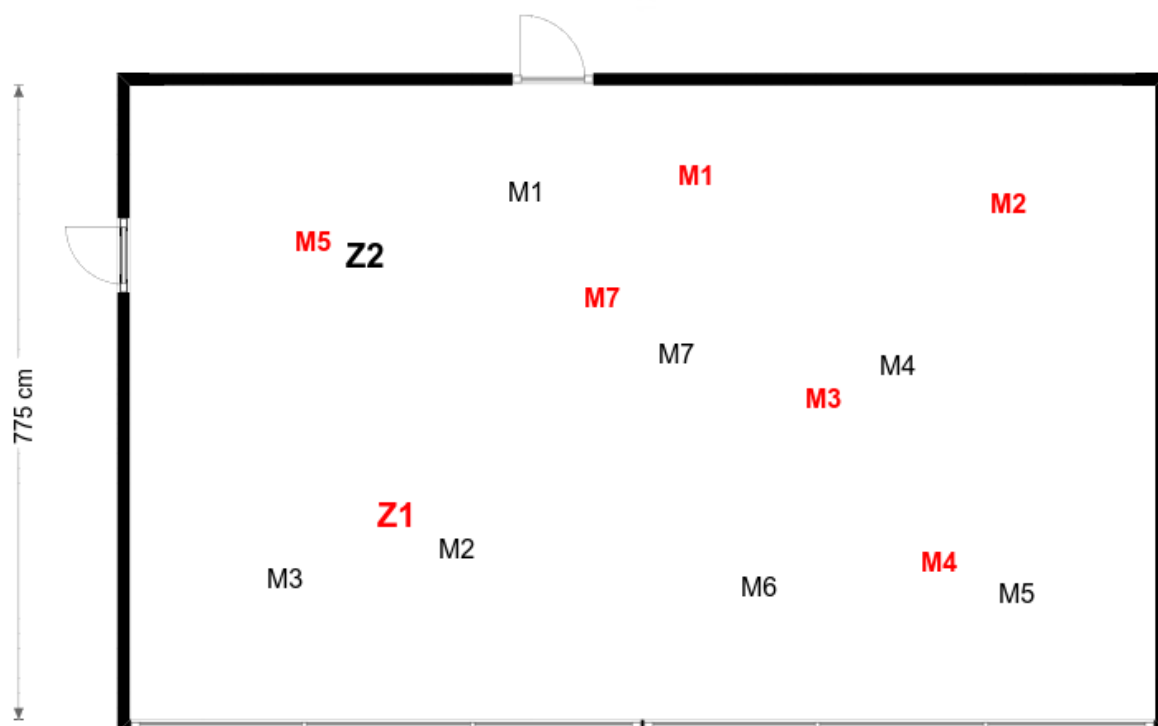
Materiál	plocha [m ²]	kmitočet f [Hz]					
		125	250	500	1000	2000	4000
činitel pohltivosti α [-]							
Okna	24	0,300	0,200	0,150	0,100	0,060	0,040
Linoleum	96	0,020	0,025	0,030	0,035	0,040	0,040
Zed'	173	0,010	0,016	0,020	0,023	0,035	0,050
Dveře (dřevěné) (2x)	4	0,15	0,11	0,1	0,07	0,06	0,07
Skříně + lavice	74	0,15	0,11	0,1	0,07	0,06	0,07
celková plocha	371	střední činitel pohltivosti α [-]					
		0,061	0,050	0,048	0,041	0,043	0,051
Doba dozvuku (Sabine)	T_S [s]	2,60	3,16	3,30	3,85	3,65	3,09
Doba dozvuku (Eyring)	T_E [s]	2,52	3,08	3,22	3,77	3,57	3,01

Průměrná (teoretická) doba dozvuku pro místnost 438 je $T_S = 3,27$ s, $T_E = 3,19$ s.
 Optimální doba dozvuku pro tuto místnost (dle vztahu 17) $T_0 = 0,69$ s.
 Schroederův kritický kmitočet $f_{rS} = 192$ Hz, $f_{rE} = 190$ Hz.



Obr. 57: Graf teoretické doby dozvuku (místnost 438)

1240 cm

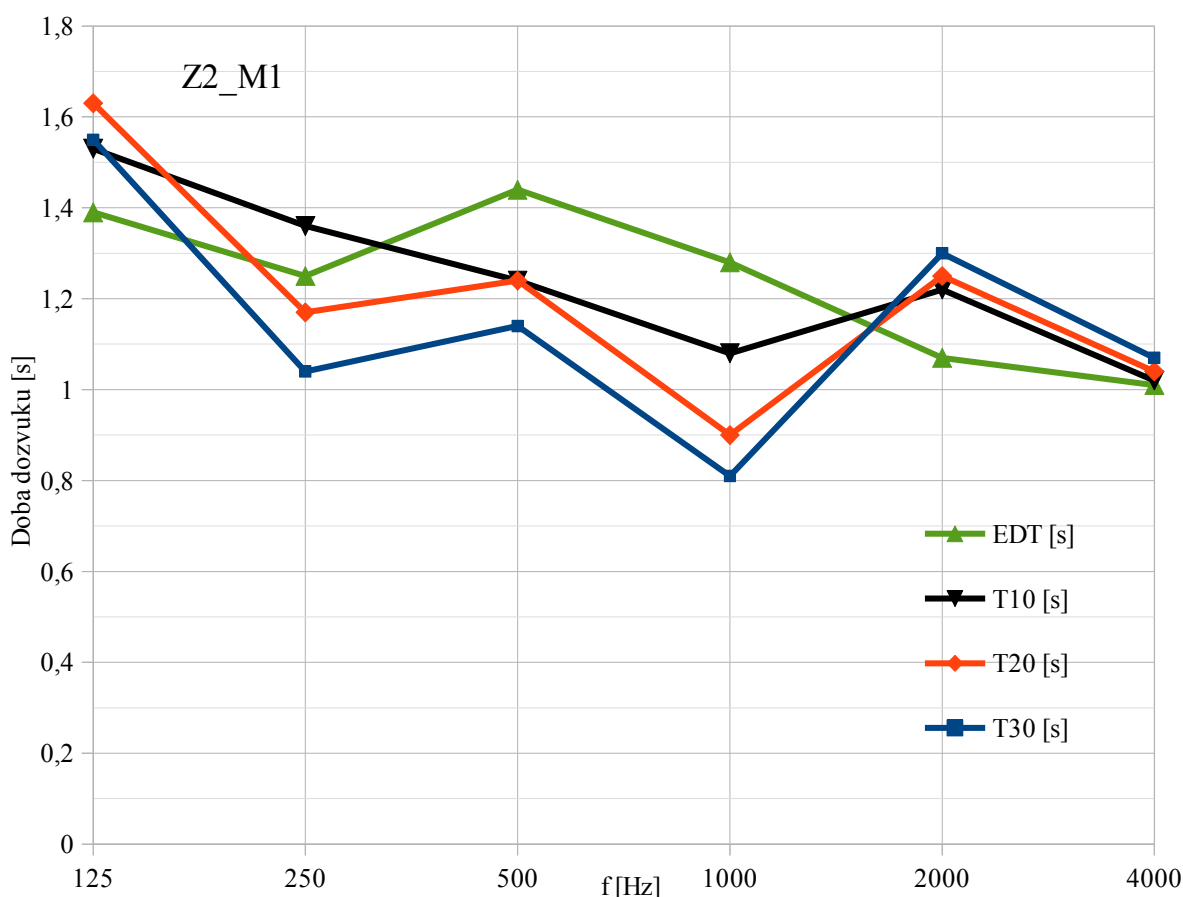


Obr. 58: Pozice zdroje (Z) a mikrofonu (M) při měření v místnosti 438.

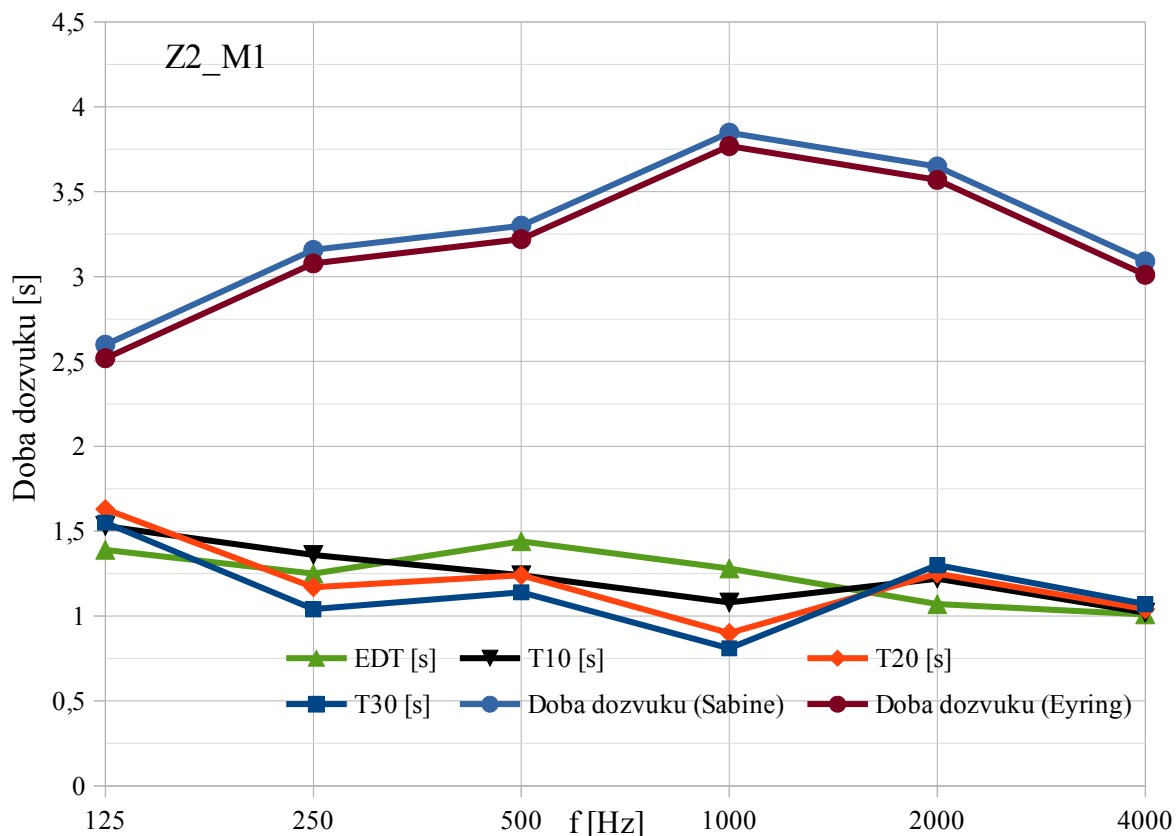
Samotné měření proběhlo stejným způsobem jako v předešlém případě, tedy se stejným vybavením a stejnou metodou. Tentokrát se však měřilo několikrát pro dvě pozice zdroje. Opět je uveden hrubý plánec (obr. 58) s přibližnými pozicemi zdroje a mikrofonu, naměřené hodnoty (Tab. 11) a grafy (59, 60) pro vybrané měření. Uvedené výsledky se týkají jednoho konkrétního měření, ostatní tabulky a grafy jsou přiložené v elektronické příloze. (Nutno zmínit, že při úplně prázdné místnosti, kdy všechny stěny budou holé a nebude přítomen žádný nábytek, se dá očekávat delší doba dozvuku, což se odrazilo i v teoretickém výpočtu. V následujících výpočtech pro návrh ale většinu nábytku ponecháme).

Tabulka 11: Naměřené doby dozvuku - učebna 438 (měření Z2_M1)

Z2_M1	frekvence f [Hz]						průměr	
	125	250	500	1000	2000	4000	250Hz-2kHz	500Hz-4kHz
EDT [s]	1,39	1,25	1,44	1,28	1,07	1,01	1,26	1,2
T10 [s]	1,53	1,36	1,24	1,08	1,22	1,02	1,22	1,14
T20 [s]	1,63	1,17	1,24	0,9	1,25	1,04	1,14	1,11
T30 [s]	1,55	1,04	1,14	0,81	1,3	1,07	1,07	1,08



Obr. 59: Graf - naměřené doby dozvuku - učebna 438 (měření Z2_M1)



Obr. 60: Graf - srovnání teoretických a naměřených hodnot doby dozvuku (Učebna 438)

Z průběhů naměřené a teoretické doby dozvuku pozorujeme, že vypočtená doba dozvuku je poměrně delší než reálná. Opět tu bude hrát roli jak zanedbané prvky v místnosti (nábytek, výklenky), tak i ne zcela přesné určení činitele pohltivosti, kdy reálná absorpce se může lišit od tabulkových hodnot. S určitostí ale můžeme říci, že pro dosažení optimální doby dozvuku je úprava akustiky v této místnosti nezbytná.

Velký problém mohou způsobit třepotavé ozvěny vznikající mezi dvěma protilehlými stěnami. Stěny s okny a skříněmi můžeme v daném případě akusticky ošetřit jen v malé míře. Zbylé dvě dvojice stěn ale můžeme použít pro akustické obložení větších ploch za účelem zamezení vzniku třepotavé ozvěny.

Podlaha především z praktických důvodů v takových učebnách neumožňuje úpravy (kromě např. koberce). Proto pro obsazení akustickými obklady připadají v úvahu především zadní a přední stěna a strop.

Plocha, která se silně a bezprostředně podílí na odrazu zvuku, je zadní stěna, tedy stěna naproti řečnickovi. Odraz od této plochy způsobí problém i pro samotného řečníka. Pokrytí této plochy je tedy nutností. Obklad Sonit (str. 19) je pro tento účel dobrou volbou. Společně s přidavným absorbérem ve vzduchové kapse účinně zvýší absorpci. Tímto obkladem pokryjeme celou plochu zadní stěny, tedy přibližně 29 m². (Sonit je navíc dostupný v mnoha barevných provedeních, takže je možné přizpůsobit obklad i dle tohoto kritéria). To však nezkrátí dozvuk dostatečně, proto použijeme další obklad na stropní plochu. Zde je vhodné použít obklad Soning BF SON1 (str. 28), který se nainstaluje do podhledů. Těmito panely pokryjeme zhruba polovinu plochy stropu, konkrétně 40 m². Výhodou jsou rozměry panelu, jehož plocha jednoho panelu je 1 m², můžeme tedy rovnoměrně pokrýt požadovanou plochu, kdy uspořádáme panely do jakési mřížové struktury 4 x 10 (čtyři panely podél kratších zdí a deset podél delších zdí). Všechny hodnoty znázorňuje tabulka 12.

Tabulka 12: Úprava učebny 438 - použité materiály a aktivní plochy

Materiál	plocha [m ²]	kmitočet f [Hz]					
		125	250	500	1000	2000	4000
		činitel pohltivosti α [-]					
Okna	23,6	0,3	0,2	0,15	0,1	0,06	0,04
Linoleum	96,1	0,02	0,025	0,03	0,035	0,04	0,04
Zed' - beton	127,8	0,01	0,016	0,019	0,023	0,035	0,05
Dveře (dřevěné) (2x)	3,6	0,15	0,11	0,09	0,07	0,06	0,06
Skříně + lavice	73,7	0,15	0,11	0,1	0,07	0,06	0,07
Podhled BF SON1 (Soning)	40,0	0,73	0,54	0,33	0,25	0,2	0,2
Sonit (s přídatným absorbérem)	28,7	0,32	0,68	0,97	0,78	0,68	0,68
celková plocha	393,5	střední činitel pohltivosti α [-]					
		0,153	0,149	0,146	0,118	0,106	0,112
Doba dozvuku (Sabine)	T_S [s]	0,97	0,99	1,01	1,26	1,39	1,32
Doba dozvuku (Eyring)	T_E [s]	0,89	0,92	0,94	1,18	1,32	1,25
Poměr T_S/T_0 ($T_0 = 0,69$)		1,41	1,44	1,47	1,82	2,02	1,92

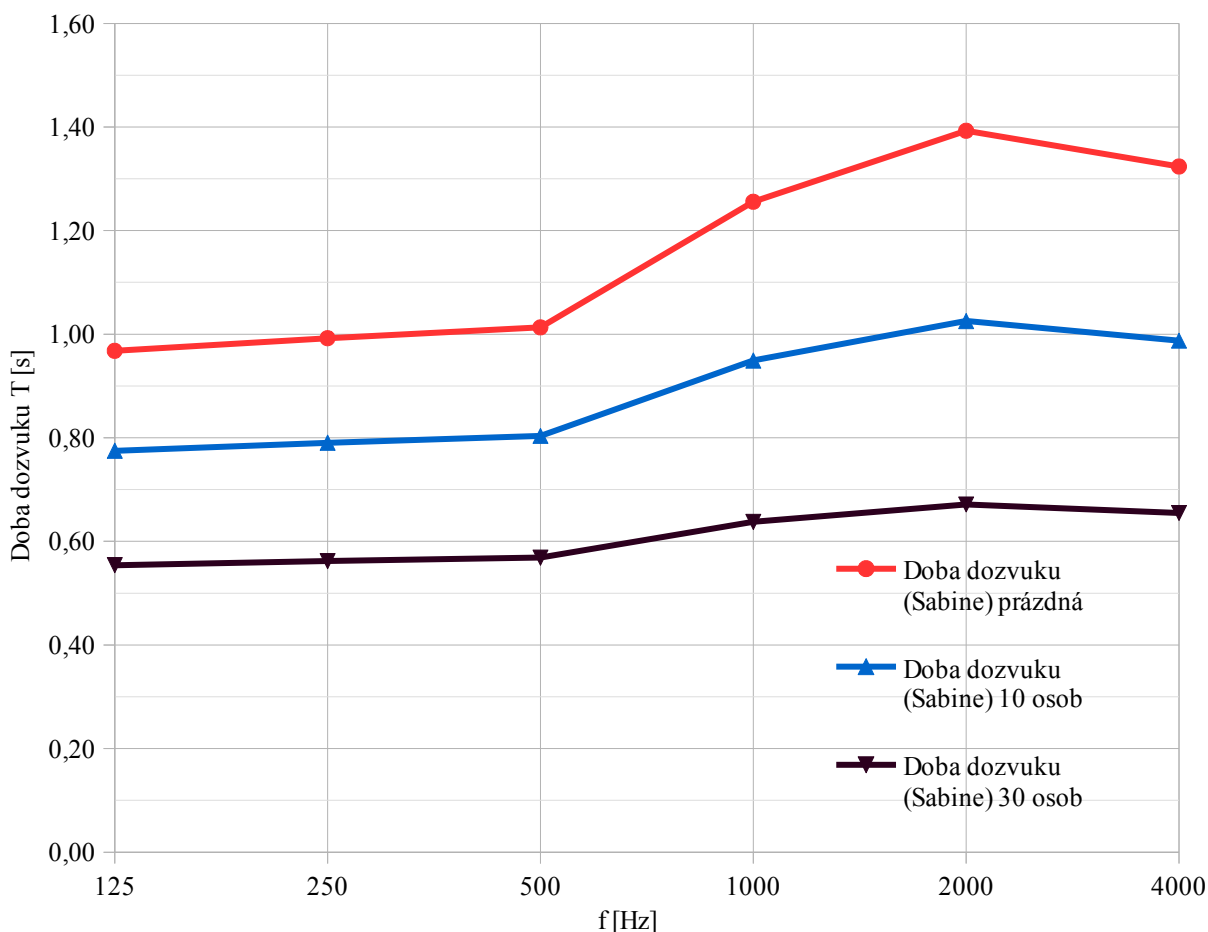
Po takové úpravě je vypočtena dozvuku stále delší, než se požaduje, takže na první pohled je takové řešení nedostatečné. Musíme ale mít na paměti, že optimální doba dozvuku a toleranční pásmo se podle ČSN 73-0527 vztahuje na obsazenou místnost. Proto do výpočtu zahrneme i tento faktor, kdy do konečného výpočtu připočítáme i absorpci přítomných posluchačů (za použití $A = 1,5 \text{ m}^2$ na jednu osobu). Výpočet provádíme pro deset a třicet lidí.

$$T_S = 0,164 \cdot \frac{V}{\alpha \cdot S + A_{\text{posluchač}}} \quad (\text{s}) \quad (18)$$

Tabulka 13: Teoretická doba dozvuku T upravené učebny 438 a poměr vůči optimální době dozvuku T_0 .

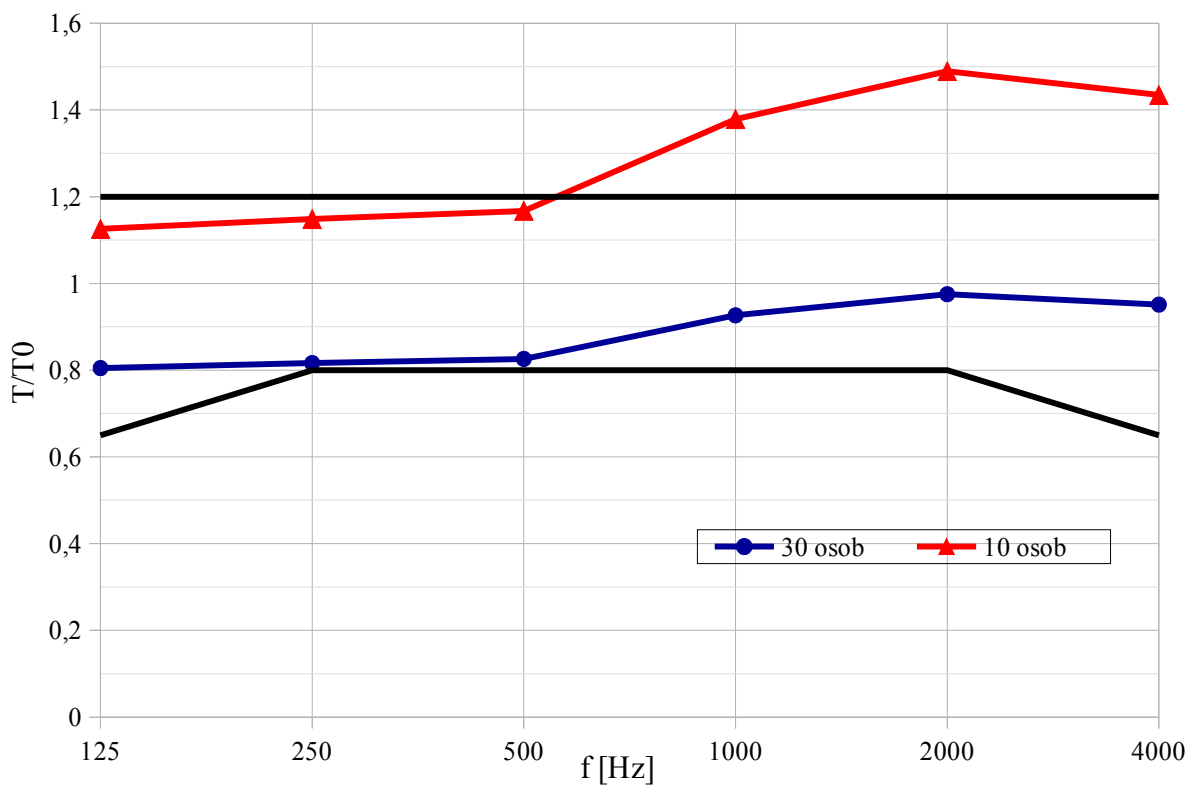
Doba dozvuku (Sabine) 10 osob	T_{S10}/s	0,77	0,79	0,80	0,95	1,03	0,99
$T_{S10}/T_0 (T_0 = 0,69)$		1,13	1,15	1,17	1,38	1,49	1,43
Doba dozvuku (Sabine) 30 osob	T_{S30}/s	0,55	0,56	0,57	0,64	0,67	0,65
$T_{S30}/T_0 (T_0 = 0,69)$		0,80	0,82	0,83	0,93	0,98	0,95

Z výsledků pozorujeme, že pro téměř plně obsazenou místnost se doba dozvuku silně zkrátí a zároveň je splněn požadavek dle normy, která určuje toleranční pásmo právě pro obsazenou místnost. Tuto skutečnost jasně znázorňují následující grafy.



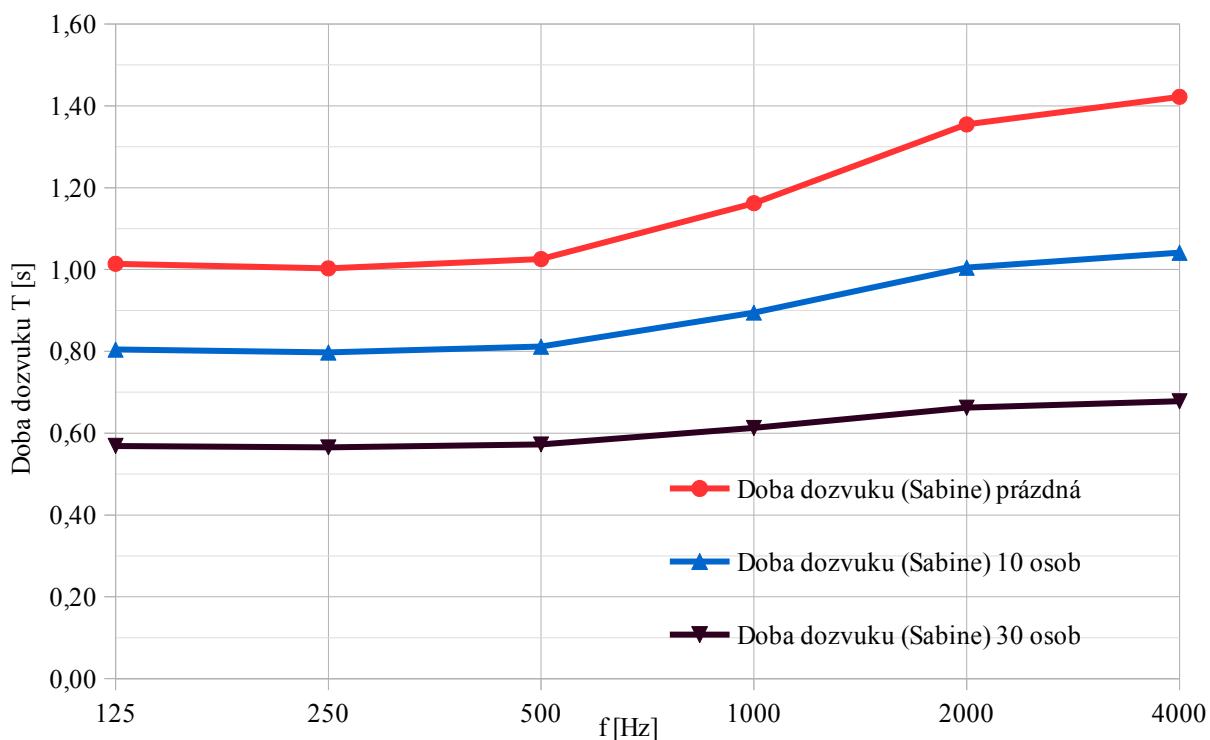
Obr. 61: Teoretická doba dozvuku T upravené učebny 438 pro různé obsazení – návrh s obkladem Sonit D30 na zadní stěně

Doba dozvuku pro obsazení třiceti osobami je v mezích tolerance (obr. 62) a navíc se pro řečové pásmo dokonce blíží definované optimální hodnotě. V tomto smyslu je tedy taková úprava místnosti dle teoretických propočtů akusticky dostatečně kvalitní.



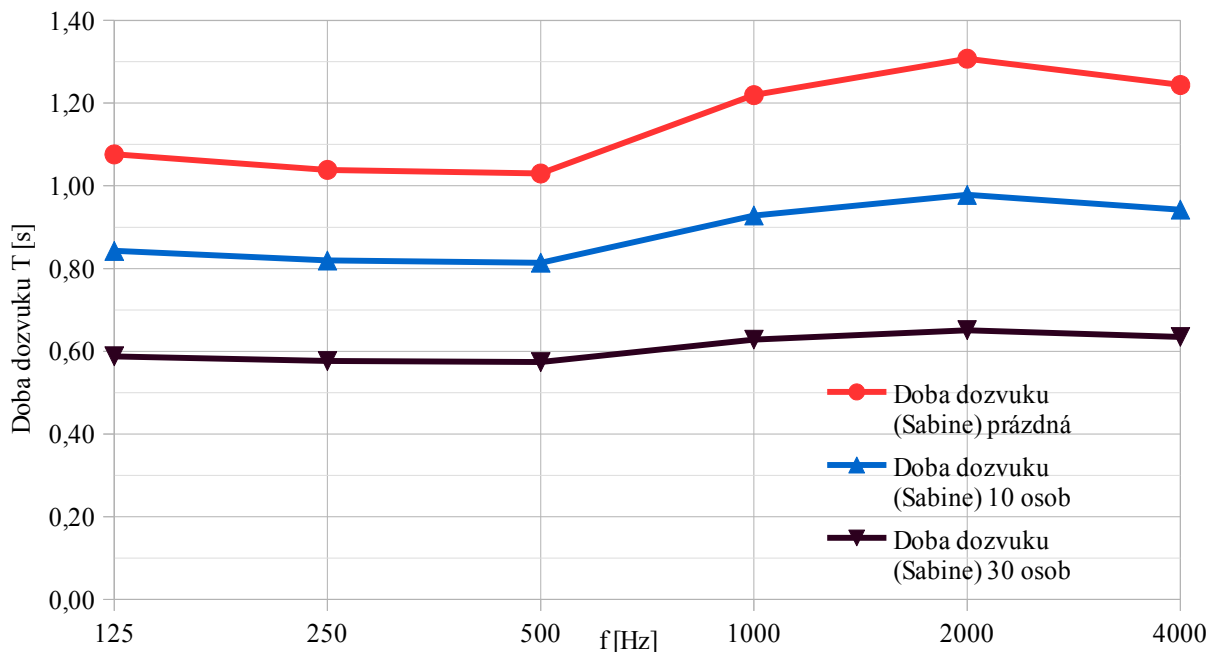
Obr. 62: Toleranční pásmo poměru T/T_0 + hodnoty pro různé obsazení

Další z návrhů je podobný jako předešlý, ale využívá pro pokrytí zadní stěny jiný obklad, a to obklad Glasio (str. 23), který je vhodnou alternativou k obkladu SONIT (str. 19). Při stejném pokrytí zadní stěny vykazuje podobné výsledky, výhodou ale je, že použijeme o pět kusů pohledových obkladů na strop méně než v minulém návrhu.



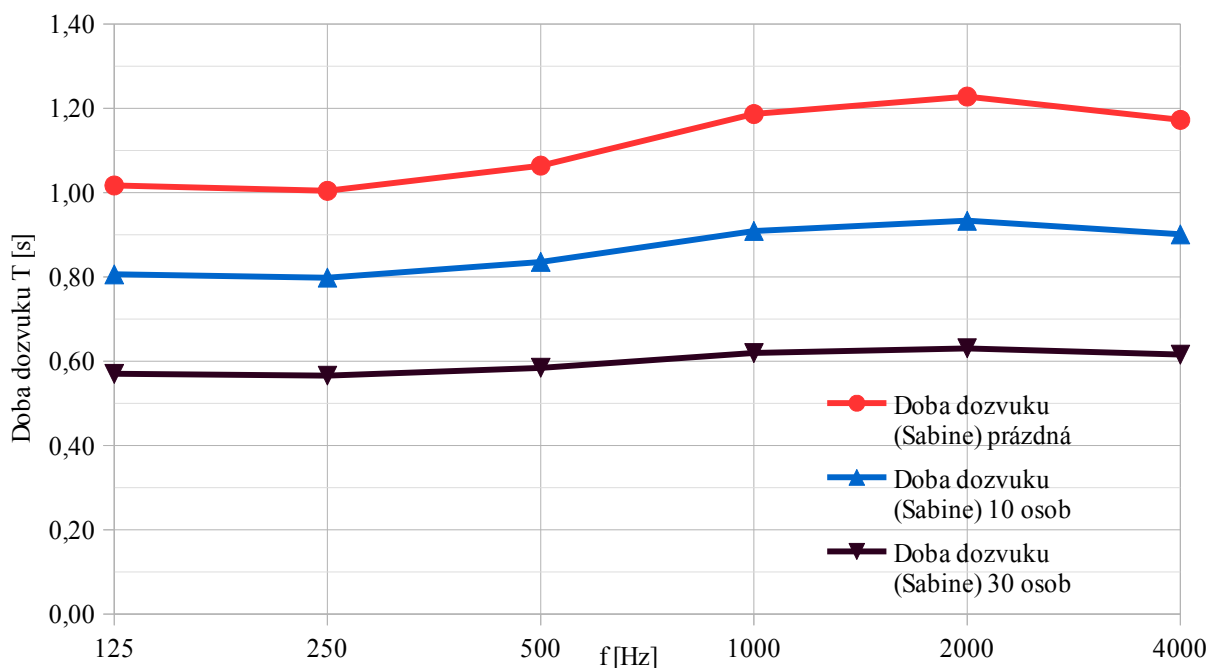
Obr. 63: Teoretická doba dozvuku T upravené učebny 438 pro různé obsazení – návrh s obkladem Glasio na zadní stěně

Z teoretických propočtů a grafů pozorujeme, že pro co nejvyrovnanější dozvukovou křivku je potřeba více ošetřit místnost hlavně v řečovém pásmu. Jedno z řešení by mohla být kombinace obkladů Sonit (str. 19) a Ecophon Akusto Wall (str. 22) na zadní stěně společně se stejnými podhledy jako v předchozích návrzích. Obklad Akusto Wall se na stěnu aplikuje na spodní část o ploše zhruba 10 m², zbytek zdi se obloží Sonitem. Na strop se opět nainstalují podhledy s obkladem BF SON1 (str. 28), tentokrát do „mřížky“ 4x8, tedy rovnoměrně čtyři podhledy podél kratší stěny a osm podél delší.



Obr. 64: Teoretická doba dozvuku T upravené učebny 438 pro různé obsazení – návrh pro kombinaci Sonit a Akusto Wall na zadní stěně

Taková úprava lehce vyrovná křivku dozvuku v řečovém spektru, především v obsazené místnosti. Většího zploštění této křivky by se dalo docílit tím, že se na zadní stěnu aplikuje pouze obklad Akusto Wall (str. 22) na celou plochu zdi.



Obr. 65: Teoretická doba dozvuku T upravené učebny 438 pro různé obsazení – návrh s obkladem Akusto Wall na zadní stěně

Rozdíl oproti kombinaci se Sonitem můžeme pozorovat hlavně pro vyšší kmitočty pro prázdnou místnost.

Všechny tyto návrhy by měly teoreticky silně zkrátit dobu dozvuku, čemuž nasvědčují i grafy. Obložení zadní stěny se postará především o řečové pásmo a stropní podhledy navíc o nízké frekvence. Nutno ale poznamenat, že v praxi může být doba dozvuku po úpravě odlišná od teoreticky vypočtené. To může být způsobené například jinou reálnou hodnotou absorpčního koeficientu materiálů než se uvažuje ve výpočtech včetně absorpce přítomných osob. Nábytek v místnosti také může ovlivnit dobu dozvuku a v neposlední řadě velikost samotné posluchárny, neboť tato místnost pořád není dost velká na bezproblémové řešení akustiky v ní. Bohužel se ani nepodařilo obsadit všechny tři dozvukové křivky (pro prázdnou a obsazenou místnost) do tolerančního pásma z hlediska optimální doby dozvuku. To je pravděpodobně způsobeno právě nevelkými rozměry této místnosti, kdy přítomné osoby v obsazené posluchárně pokrývají značnou část plochy a objemu místnosti a tím silně mění absorpci v ní. Rozdíly v době dozvuku mezi prázdným a obsazeným prostorem jsou tedy nemalé. Lepší řešení by se dalo navrhnout i s větší znalostí obkladů dostupných na trhu. Obecně je ale dobré se držet základu, a tedy pokrýt zadní stěnu naproti řečníkovi pro zlepšení srozumitelnosti a při potřebě aplikovat (nejlépe širokopásmový) obklad na strop pro větší zkrácení doby dozvuku.

5 Závěr

Jeden z hlavních parametrů charakterizující akustiku uzavřeného prostoru je doba dozvuku, která objektivně popisuje místnost z hlediska akustických vlastností. Tato práce byla zacílena právě na dobu dozvuku dané místnosti a na způsob, jakým se dá zkrátit. Účelem bylo objektivně změřit dobu dozvuku v konkrétních místnostech, kdy jedna funguje jako multifunkční učebna a druhá je určena k přeměně z laboratoře na posluchárnu, a navrhnout řešení, které by zlepšilo podmínky pro poslech přednesu. Úpravy se realizují pomocí akustických prvků.

První místností pro měření doby dozvuku byla zvolena učebna T2:B3-554. Toto měření mělo především ukázat odlišnosti mezi akusticky upravenou a neupravenou místností. Pro toto srovnání bylo provedeno měření v multimediálním studiu, které již je akusticky upraveno. Byly odečteny rozměry místností společně s rozměry hlavních ploch podílejících se na odrazu či absorpci zvuku. Tyto údaje společně s použitými materiály (a tedy jejich koeficientem pohltivosti) jsou potřebné pro teoretický výpočet doby dozvuku. Měření se provádělo pro jednu polohu zdroje a několik poloh mikrofonů v oktávovém pásmu. Pro místnost 554 se naměřené hodnoty značně lišily od teoretických. Důvodem mohlo být například nepřesná volba činitele pohltivosti daného materiálu. Při některých měřeních pro některé frekvence byla doba dozvuku neobvykle dlouhá, což mohly způsobit vlastní módy místnosti. Výsledky z každého měření byly vyhodnoceny a zapsány do tabulek a pro přehled vyneseny do grafů. Pro návrh úpravy místnosti se vycházelo z předpokladu, že pro místnost sloužící jako posluchárna nebo učebna je vhodná doba dozvuku kolem 0,7 s. Pro úpravu byly zvoleny akustické panely Ecophon Akusto Wall A a Soning BF-SON1. Použití těchto panelů by podle návrhu mělo znatelně zkrátit dobu dozvuku v učebně. Tato úprava však nebere v úvahu obsazenost místnosti. Doba dozvuku by se výrazně lišila při prázdné nebo plně obsazené místnosti.

Další měřená místnost byla učebna C3-438. Byla použita stejná metoda a postup jako pro učebnu 554. I tentokrát se teoretické hodnoty lišily od vypočtených. Opět to bylo s největší pravděpodobností způsobeno nepřesným určením koeficientu absorpce, ale i skutečností, že teorie počítá prakticky s prázdnou místností. Jelikož tuto učebnu čeká přestavba z laboratoře na posluchárnu, požadavek pro tuto místnost bylo navrhnout úpravu tak, aby doba dozvuku odpovídala účelu místnosti, tedy posluchárně. Optimální hodnotu doby dozvuku stanovuje norma ČSN 73-0527, která navíc obsahuje i rozsah povolených odchylek skutečné doby dozvuku od optimální ve formě tolerančního pásma T/T_0 . V návrhu byly zvoleny obklady jako Sonit, BF-SON1, Ecophon Akusto Wall či novinka na trhu Glasio. Bylo navrženo několik různých řešení za použití různých obkladů či jejich kombinací, a to jak pro prázdnou, tak i pro obsazenou místnost. Vzhledem k nevelké velikosti místnosti má obsazení posluchači na dobu dozvuku značný vliv, i proto se nepodařilo pro malé a žádné obsazení dosáhnout hodnot doby dozvuku v rámci tolerančního pásma, přesto se doba dozvuku pro většinové obsazení blíží optimální, což odpovídá normě. Všechny návrhy však mohou v praxi dát jiné výsledky, proto je nutné každý z návrhů ověřit následným měřením a případně návrh upravit pro dosažení požadovaného efektu. K tomu, ne všechny obklady v návrzích mají v katalozích uvedené ceny, takže se nedají přesně odhadnout celkové náklady těchto řešení.

Úprava uzavřeného prostoru z hlediska jeho akustických vlastností je zřejmě nedílnou součástí jak architektonického, tak i designového návrhu samotné místnosti. Jak již bylo v této práci zmíněno, doba dozvuku je klíčovou akustickou vlastností jakékoli místnosti a pokud chceme dosáhnout akustické pohody při pobytu v dané místnosti, nelze tento parametr opomíjet. Přestože existuje norma, která jasně definuje optimální dobu dozvuku podle účelu místnosti, dosažení těchto hodnot v teoretických výpočtech ještě nemusí odpovídat hodnotám reálným. Každý návrh je proto dobré analyzovat i prakticky a tedy ověřit účinek návrhu změřením příslušných parametrů. Zde se teprve projeví letitá praxe v oboru a zkušenosti

odborníka, které jsou pro úspěšný, profesionální a kvalitní návrh nesmírně cenné. Také celkové výsledky analýzy a měření místností v rámci této bakalářské práce ukazují, že otázka kvalitní akustiky v uzavřeném prostoru je poměrně komplexní záležitostí a tak vyžaduje stejně komplexní přístup při řešení a návrhu. Pro důležitost kvality akustiky v místnosti a náročnost mnoha řešení je na místě prokázat lidem v oboru a profesionálům v prostorové akustice náležitý respekt.

6 Literatura a zdroje

- [1] KOLMER, Felix – Kyncl, Jaroslav. *Prostorová akustika*. 2. nezm. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1982, 244 s., ISBN 04-526-82
- [2] KAŇKA, Jan. *Šíření zvuku v uzavřeném prostoru – difúzní zvukové pole*. Stavba.TZB-info.cz [Online]. Dostupné z URL: [<http://stavba.tzb-info.cz/akustika-staveb/227-sireni-zvuku-v-uzavrenem-prostoru-difuzni-zvukove-pole>]. [vid. 10. 1. 2017].
- [3] GEIST, Bohumil. *Akustika – Jevy a souvislosti v hudební teorii a praxi*. Praha: nakladatelství MUZIKUS, 2005. ISBN 80-86253-31-7
- [4] SYROVÝ, Václav. *Hudební akustika*. 3. doplněné vydání, Praha: Akademie múzických umění v Praze, 2013. ISBN 978-80-7331-297-8
- [5] KAŇKA, Jan. *Konstrukce na pohlcování zvuku* Stavba.TZB-info.cz [Online]. Dostupné z URL: <http://stavba.tzb-info.cz/akustika-staveb/228-konstrukce-na-pohlcovani-zvuku>. [vid. 8.2. 2017].
- [6] Anon. *Основы акустики помещений*. [online] Dostupné z URL: http://msk.edu.ua/s-k/downloads/bud_fiz/tema_3_2.pdf [vid. 10. 1. 2017].
- [7] KUTTRUFF, Heinrich. *Room Acoustics, Fifth Edition*. Spon Press, 2009, 374 s
ISBN 0-203-87637-7
- [8] PEŠTA, Jan. *Požadavky na prostorovou akustiku* Atelier DEK [online]. Dostupné z URL: <https://atelier-dek.cz/prostorova-akustika-192> [vid. 10. 1. 2017].
- [9] TheFreeDictionary. *Geometric Acoustics*. thefreedictionary.com [online]. Dostupné z URL: <http://encyclopedia2.thefreedictionary.com/Geometric+Acoustics> [vid. 11.1. 2017].
- [10] NOVÁČEK, Filip. *Úprava akustiky učebny*. Bakalářská práce. [online] Praha 2016. České vysoké učení technické v Praze. Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Dr. Ing. Libor Husník. Dostupné z URL: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/64698/F3-BP-2016-Novacek-Filip-uprava_akustiky_ucebny.pdf?sequence=-1
[vid. 10.1.2017]
- [11] HUSNÍK, Libor. *Prostorová akustika – přednáška*. 2016. Dostupné z URL: [vid.. 10. 1. 2017].
- [12] REICHL, Jaroslav – VŠETIČKA, Martin. *Vlnová akustika*. Encyklopedie fyziky [online] © 2006 – 2017. Dostupné z URL: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/1202-vlnova-akustika> [vid. 11.1.2017]
- [13] MARTIN, Martin. *Akustika malých prostorů*. Bakalářská práce. [online] Brno 2016. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Energetický ústav. Vedoucí práce Ing. Jiří Schimmel, Ph.D.. Dostupné z URL: https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/60599/MartinMartin165029!Akustika_malych_prostor.pdf?sequence=1

- [14] RYŠAVÝ, Marek. *Modelování akustiky uzavřených prostorů paprskovou metodou*. Bakalářská práce. [online] Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav telekomunikací. Vedoucí práce Ing. Michal Trzos. Dostupné z URL: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=69013 [vid. 10.1.2017]
- [15] HOŘÁK, Pavel. *Měření doby dozvuku*. Bakalářská práce. [online] Brno 2015. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Energetický ústav. Vedoucí práce doc. Ing. Jan Jedelský, Ph.D. Dostupné z URL: <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/40835/y152600.pdf?sequence=1> [vid. 10.1.2017]
- [16] SCHIMMEL, Jiří. *Objektivní vlastnosti poslechových prostorů a jejich měření – přednáška* [online]. 2015. Dostupné z URL: <http://slideslive.com/38892802/objektivni-vlastnosti-poslechovych-prostoru-a-jejich-mereni> [vid.. 10. 1. 2017].
- [17] ŠŤASTNÍK, Stanislav. *Ízolační materiály*. [online]. Brno. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební. Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Dostupné z URL: http://ps1.fce.vutbr.cz/stastnik/pdf/BJ07_04.pdf [vid.. 3. 2. 2017].
- [18] REICHL, Jaroslav – VŠETIČKA, Martin. *Odráz zvuku, pohlcování zvuku*. Encyklopedie fyziky [online] © 2006 – 2017. Dostupné z URL: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/197-odraz-zvuku-pohlcovani-zvuku> [vid. 8.2.2017]
- [19] REICHL, Jaroslav – VŠETIČKA, Martin. *Kmitající membrány a desky*. Encyklopedie fyziky [online] © 2006 – 2017. Dostupné z URL: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/print/1197-kmitajici-membrany-a-desky> [8.2.2017]
- [20] Wikipedia. Divadlo. *Wikipedia.org* [online] (CC-BY-SA) [vid. 10.1.2017]. Dostupné z URL: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Divadlo>
- [21] KAŇKA, Jan. *Kmitající membrány a desky* Stavba.TZB-info.cz [Online]. Dostupné z URL: <http://stavba.tzb-info.cz/akustika-staveb/230-kmitajici-membrany-a-desky> [vid. 8.2. 2017].
- [22] MAŘÍK, Martin *Návrh akustických úprav hudebního klubu*. Diplomová práce. [online] Plzeň 2012. Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta elektrotechnická. Katedra elektroenergetiky a ekologie. Vedoucí práce Ing. Jan Altman. Dostupné z URL: <https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/3950/1/DP.pdf> [vid 8.2.2017]
- [23] Anon. *Akustika“*. Prezentace [online] Dostupné z URL: <http://slideplayer.cz/slide/7038299/>
- [24] Wikipedia. Helmholtz resonance. *Wikipedia.org* [online] (CC-BY-SA). Dostupné z URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Helmholtz_resonance [vid. 6.2.2017]
- [25] Wikipedia. Diffusion. *Wikipedia.org* [online] (CC-BY-SA). Dostupné z URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Diffusion_\(acoustics\)#Diffusors](https://en.wikipedia.org/wiki/Diffusion_(acoustics)#Diffusors) [vid. 6.2.2017]

- [26] KADLEC, František. *Zpracování akustických signálů*. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2005, 189 s., ISBN 80-01-02588-8
- [27] ČSN EN ISO 3382-1, Akustika – Měření parametrů prostorové akustiky – Část 1: Prostory pro přednes hudby a řeči, 2009
- [28] ČSN EN ISO 3382-2, Akustika – Měření parametrů prostorové akustiky – Část 2: Doba dozvuku v běžných prostorech, 2009
- [29] Everest, F. Alton. *The Master Handbook of ACOUSTICS* 4. vydání. USA, The McGraw-Hill Companies Inc, 2001, 641 s., ISBN 0-07-139974-7
- [30] Anon. *Elektronika – online skripta*. Realizace systémů a rozprostřeným spektrem [online]. Dostupné z URL: <http://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/elektronika/cdm/cdm2.html> [vid. 15.11.2016]
- [31] Wikipedia. Maximum length sequence. *Wikipedia.org* [online] (CC-BY-SA). Dostupné z URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Maximum_length_sequence [vid. 15.11.2016]
- [32] SONING. Katalogové listy akustických prvků. [online]. Dostupné z URL: <http://www.soning.cz/> [vid. 20.1.2017]
- [33] SONING. Katalogové listy akustických prvků. [online]. Dostupné z URL: <http://www.znizovaniehuku.sk/akusticke-materialy/> [vid. 20.1.2017]
- [34] VICOUSTIC, Katalogové listy akustických prvků. [online]. Dostupné z URL: <https://www.vicoustic.com/page/acoustic-principles> [vid. 20.1.2017]
- [35] NOVATOP, Katalogové listy akustických prvků. [online]. Dostupné z URL: <http://www.novatop-system.cz/produkty/acoustic-pro-prostorovou-akustiku/> [vid. 20.1.2017]
- [36] GEAR4MUSIC. Katalogový list Multifuser DC2 [online]. Dostupné z URL: <http://www.gear4music.cz/cs/Nahravani-a-poitate/DISK-Vicoustic-Multifuser-DC2-akusticke-panely-bila-Box-6/158Y> [vid. 20.1.2017]
- [37] AKUSTING, Katalogový list AK- 100 [online]. Dostupné z URL: <http://www.akusting.cz/cs/akusticky-panel-kmitajici-ak-100-55.html> [vid. 5.2.2017]
- [38] SONSAT, Katalogové listy akustických obklad [online]. Dostupné z URL: <http://sonsat.sk/> [vid. 5.2.2017]
- [39] Acoustical Society of America. *Classroom Acoustics*. [online] Dostupné z URL: <http://asa.aip.org/classroom/booklet.html> [vid. 7.2.2017]
- [40] Anon. *Расчет времени реверберации помещения*. [online]. Dostupné z URL: <http://poznayka.org/s2358t1.html> [vid. 8.2.2017]
- [41] KORINASH, K. *An Interactive eBook on the Physics of Sound – Reverberation* [online]. Dostupné z URL: https://soundphysics.ius.edu/?page_id=1262 [vid. 5.2.2017]
- [42] EON. *Optimální akustická řešení*. Produktový katalog Ecophone Saint-Gobain [online] Dostupné z URL: <https://www.eon.cz/-a5869?field=data> [vid. 8.2.2017]

- [43] KAŇKA, Jan. *Prostorová akustika – prezentace*. izolace.cz [online]. Dostupné z URL: http://www.izolace.cz/data/school_materials/26_9-prostorova-akustika.pdf [vid.8.2.2017]
- [44] ČSN 73 0527, *Akustika – Projektování v oboru prostorové akustiky – Prostory pro kulturní účely – Prostory ve školách – Prostory pro veřejné účely*, 2005
- [45] ČSN 73 0525, *Akustika – Projektování v oboru prostorové akustiky – Všeobecné zásady*, 1998
- [46] Anon. *Расчет времени реверберации*. [online]. © studopedia.ru. Dostupné z URL: http://studopedia.ru/8_74348_raschet-vremeni-reverberatsii.html [vid.8.2.2017]
- [47] Perry, Tim. *Bass Traps 101: Placement Guide*, Arqen Acoustics [online]. Dostupné z URL: <http://arqen.com/bass-traps-101/placement-guide/> [vid: 20.3.2017]
- [48] Wikipedia. *Bass trap*. *Wikipedia.org* [online] (CC-BY-SA). Dostupné z URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Bass_trap [vid. 20.3.2016]
- [49] AVETON, *Katalogový list GLASIO* [online]. Dostupné z URL: <http://www.glasio.cz/ke-stazeni/#katalog> [vid. 20.4.2017]

7 Přílohy

CD obsahuje:

- Naměřená data
- Tabulkový sešit s naměřenými daty a výpočty
- Grafy k měření a návrhům
- Text v elektronické podobě