



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta Elektrotechnická
Katedra radioelektroniky**

Úprava akustiky učebny

Room acoustics treatment

Bakalářská práce

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika

Studijní obor: Multimediální technika

Vedoucí práce: Dr. Libor Husník Ing.

Filip Nováček

Praha 2016

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.

V Praze dne

.....
(podpis autora)

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
katedra radioelektroniky

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Filip Nováček**

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika
Obor: Multimediální technika

Název tématu: **Úprava akustiky učebny**

Pokyny pro vypracování:

Nastudujte problematiku prostorové akustiky se zaměřením na přednáškové sítě menších rozměrů. Změňte akustické parametry konkrétní místnosti a navrhnete potřebné úpravy tak, aby akustické parametry vyhovovaly zadaným požadavkům.

Seznam odborné literatury:

- [1] Kolmer, F., Kyncl, J.: Prostorová akustika, SNTL/Alfa 1980
- [2] Kuttruff, H.: Room Acoustics, Spon Press, 2009
- [3] produktové listy akustických prvků a materiálů

Vedoucí: Dr. Libor Husník Ing.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2016/2017

L.S.

doc. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 19. 2. 2016

Poděkování

Tímto bych chtěl vyjádřit své poděkování Dr. LIBORU HUSNÍKOVÍ Ing. za navržení tohoto tématu, které mě přivedlo ke studiu prostorové akustiky, za cenné rady, trpělivost a ochotu vždy během realizace měření a psaní této práce pomoci.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá prostorovou akustikou přednáškových sál menších rozměrů a jejím cílem bylo navrhnout úpravy akustických vlastností zadaných místností. Práce popisuje základní přístupy k šíření zvuku v prostoru. Dále uvádí faktory, které ovlivňují akustiku místnosti, uvádí princip fungování různých akustických prvků (absorbéry, rezonátory a difuzory) spolu s příklady a jejich vlastnostmi. Popisuje princip měření srozumitelnosti řeči a měření doby dozvuku pomocí signálu MLS. Představuje naměřené a vypočtené akustické parametry prázdných místností, na základě kterých byly navrženy akustické úpravy pro snížení doby dozvuku a zlepšení srozumitelnosti v zadaných prostorách.

Klíčová slova: Prostorová akustika, doba dozvuku, akustické obklady, akustický, činitel zvukové pohltivosti, STI, MLS

Abstract

This bachelor thesis deals with room acoustics of classrooms or small lecture halls and its goal is to project modifications of acoustic parameters of given rooms. This thesis describes basic approaches to sound propagation in space. Then states main factors affecting room acoustic, describes principles of different acoustic elements (absorbers, resonators, diffusers) with real examples and their characteristics. Specifies measuring principle of speech intelligibility and using MLS signal for measuring reverberation time. It introduces gathered and calculated acoustic parameters of empty rooms and based on those values are proposed acoustics treatments to increase speech intelligibility and reduce reverberation time of assigned rooms.

Key words: Room acoustics, reverberation time, acoustic elements, sound absorption coefficient, STI, MLS

OBSAH

Úvod	7
1 Prostorová akustika.....	8
2 Řešení akustického prostoru	8
2.1 Geometrická akustika.....	8
2.2 Vlnová akustika	9
2.3 Statistická akustika	10
3 Určení akustických vlastností prostoru	11
3.1 Doba dozvuku.....	11
3.2 Měření doby dozvuku	13
3.3 Srozumitelnost řeči	14
4 Faktory ovlivňující akustický prostor.....	15
4.1 Rozměry a tvar místnosti	15
4.2 Akustické prvky a materiály	16
5 Měřené místnosti a požadavky na jejich akustické parametry	32
6 Teoretické parametry měřených místností.....	33
6.1 Místnost 364	33
6.2 Místnost 202a.....	35
6.3 Místnost 205	37
7 Změřené akustické parametry místností	38
7.1 Místnost 364	39
7.2 Místnost 202a.....	42
7.3 Místnost 205	45
8 Návrh akustických úprav místností	48
8.1 Místnost 364	48
8.2 Místnost 202a.....	50
8.3 Místnost 205	52
9 Porovnání návrhů s měřením	55
10 Studio	57
11 Závěr.....	59
12 Zdroje	61
13 Seznam elektronických příloh	62

Úvod

Práce se zabývá úpravou akustiky uzavřených prostorů, konkrétně přednáškových sál. Pro ty je správná akustika důležitá především z pohledu srozumitelnosti řeči. Prostorová akustika v sobě snoubí hned několik spolu na první pohled nesouvisejících oborů. Od architektury, o které již Řekové věděli, že má zásadní vliv na akustické podmínky prostoru, a z toho důvodu k ní přihlíželi při stavbě svých amfiteátrů, přes vědecký pohled na zvuk jako šíření vln v prostoru, který pomáhá obzvláště v současných akustických studiích a simulacích, až po psychoakustiku, tedy působení zvuků na člověka.

Názory na to, jak správně prostorovou akustiku uchopit, se v průběhu let různily. Ať už to byly zmiňované antické amfiteátry či novodobé koncertní sály tvaru kvádru, známého především jako „krabice od bot“, vždy byl kladen důraz na co nejlepší akustiku daného prostoru, a tedy co nejlepší zážitek pro diváky a posluchače. K tomuto účelu bylo vždy využíváno nejlepších poznatků a vědomostí, proto se již ve starověku používaly například vázy naplněné slámou jako rezonátory ve stavbách. V moderní době se pro změnu využívá obrovského výpočetního výkonu, který máme nyní běžně k dispozici pro tvorbu detailních modelů a simulací při návrhu koncertních sálů a také nových materiálů pro výrobu akusticky účinných prvků.

Od koncertních sálů a nahrávacích studií, které byly donedávna primární zájmovou oblastí prostorové akustiky, se však v dnešní době tento obor rozšiřuje mnohem dál. Se zvyšující se životní úrovní moderních zemí se rovněž zvyšují požadavky na životní standardy. Z toho důvodu je dnes již daleko větší zřetel brán například na hygienické normy na pracovištích, a tak vznikají požadavky na akustické úpravy prostorů, jakými jsou kupříkladu call centra, nebo školní učebny. Stále dostupnější moderní technologie a snaha výrobců audio video techniky poskytnout zákazníkům plnohodnotnou aparaturu pro užití v domácnostech zároveň otevírá problematiku prostorové akustiky v těchto prostorách. To zároveň nutně znamená potřebu různých akustických řešení nejen po funkční stránce, ale především estetické, která do té doby musela do jisté míry ustupovat praktičnosti a účelnosti. Dále s moderním vývojem souvisejí také nově vyvíjené materiály, stále větší naděje se například vkládají do nanotechnologií, které ač jsou dnes stále velice nákladné, mají velký potenciál uplatnit se jako velmi účinný pohltivý materiál.

Na závěr je třeba říci, že ačkoli zavádí prostorová akustika jistá pravidla, kterými je vhodné se řídit při návrzích akustických úprav, je nutné si uvědomit, že ke každému novému problému je nutné přistupovat vždy od základu, protože málokdy existuje jedno univerzální řešení, a že nikdy nelze označit dané řešení za jediné správné, jelikož co se zvuku týče, platí, že co se líbí uchu jednoho, nemusí vůbec lahodit uchu druhého.

1 Prostorová akustika

Prostorová akustika je vědní obor, který se zabývá šířením zvuku v uzavřených nebo částečně uzavřených prostorech. Správně navržená prostorová akustika místnosti by měla zajistit příjemný a čistý zvuk při poslechu a vysokou srozumitelnost mluveného slova. Zvuk v těchto prostorech by měl být kmitočtově vyrovnaný, zároveň je však důležité rozlišit, k jakému účelu bude daný prostor sloužit, jelikož jiné požadavky budou kladeny na akustiku přednáškových sálů (zde především srozumitelnost mluveného slova) a jiné u nahrávacích studií (kvalita poslechu hudby, tedy vyrovnaná kmitočtová charakteristika ve slyšitelném spektru a dostatečná difuzita zvukového pole). Existuje ovšem mnoho dalších prostorů, u kterých na první pohled není možná zřejmé, jak důležité je zde řešení prostorové akustiky. Jako příklad uveďme výrobní haly, kde je důležité snížit hluk pracovních strojů a podobně.

Prostorovou akustiku lze ovlivnit několika způsoby a vždy je třeba myslet na všechny již při návrhu zamýšlených prostorů. Zaprvé jde o samotný rozměr a tvar místnosti. Zadruhé je nutné zvážit materiály použité k obložení místnosti a v neposlední řadě také vybavení prostoru, použitý nábytek a jeho rozmístění.

2 Řešení akustického prostoru

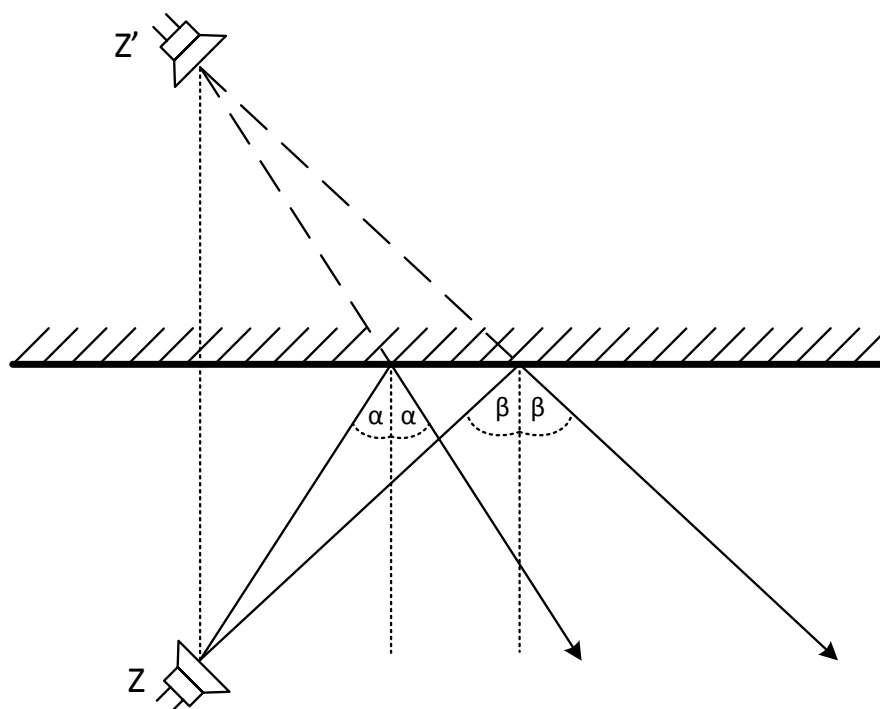
Existuje mnoho způsobů, jak teoreticky přistupovat k řešení problematiky akustického prostoru. Níže jsou představeny tři hlavní, kterými jsou geometrická, vlnová a statistická akustika. Zvuk popisujeme pomocí fyzikálních zákonů, a každý ze zmíněných způsobů se zaměřuje na jiný.

Obecně lze říci, že zvuková vlna se šíří médiiem ve volném prostoru od svého zdroje, a pokud narazí na překážku, dojde buďto k odrazu (energie vlny bude odražena jiným směrem) nebo lomu vlny (většina energie se bude šířit ohybem dál za překážku).

2.1 Geometrická akustika

Geometrická akustika zjednodušuje mechanismy šíření zvuku pouze na případy odrazu vln od překážek. Za tohoto předpokladu počítáme se zvukovou vlnou, jako s paprskem, pro který platí podobně jako v optice: „Úhel odrazu je roven úhlu dopadu, přičemž odražené vlnění zůstává v rovině dopadu. Odražený paprsek zůstává v rovině dopadu (v rovině dané dopadajícím paprskům a kolmicí dopadu) a svírá s kolmicí dopadu úhel odrazu, který je stejně velký jako úhel dopadu.“ Toto zjednodušení je možné především pro zvuk o vyšších kmitočtech a zároveň také platí, že čím větší jsou rozměry překážky, tím více se blíží chování zvukových vln při odrazu chování světelných paprsků [1]. Geometrická akustika poté sleduje dráhy paprsků od zdroje k přijímači. Při každém odrazu od překážky vznikne nový virtuální (obrázek 1 – původní zdroj Z a jeho obraz Z' pro určení odrazu) zdroj vysílající nižší energii, než byla energie dopadajícího paprsku.

Konstrukce paprsků se provádí mnoha způsoby, například obrazovou metodou či metodou Ray-Tracing.



Obrázek 1 – Využití geometrické akustiky pro zobrazení reálného zdroje Z do zdroje Z' za překážku

2.2 Vlnová akustika

Vlnová akustika modeluje zvukové pole pro nízké kmitočty pomocí vlnové rovnice a jejími okrajovými podmínkami. Řešení vlnové rovnice je výpočetně velice náročné i pro jednoduché a pravoúhle tvarované prostory. Vlnová akustika zkoumá fázový rozdíl dopadající a odražené vlny, ten závisí na vlnové délce a rozměrech místnosti, kterým se vlna šíří [2]. Energie dopadající a odražené vlny se sečte. Tím vznikne stojaté vlnění (obrázek 2), které má v některých místech maximální (kmitny) a jinde minimální množství energie (uzly). Tento jev vytváří nevyrovnané akustické pole v místnosti.

2.2.1 Vlastní módy místnosti

Řešením vlnové rovnice pro triviální prostor s rovnoběžnými protějšími stěnami, které jsou uvažovány jako tuhé, nepružné lze získat rovnici pro stanovení vlastních módů místnosti.

$$f_N = \frac{c_0}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2} \quad (\text{Hz}) \quad (1)$$

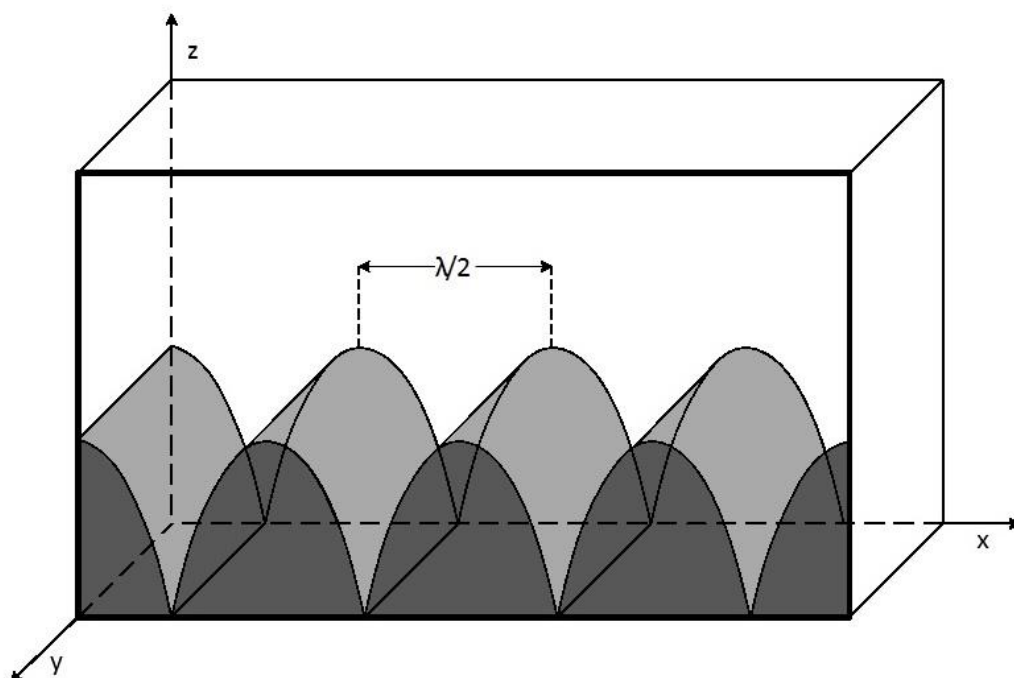
Kde c_0 rychlost šíření zvuku ve vzduchu (ms^{-1})

l_x, l_y, l_z rozměry prostoru (m)

n_x, n_y, n_z celá nezáporná čísla

Vlastní módy místnosti jsou dány jejími rozměry a určují rezonanční kmitočty místnosti. Tyto vlastní módy (kmitočty) jsou nežádoucí, protože zvyšují amplitudu zvuku o této frekvenci proti ostatním frekvencím v prostoru. Cílem návrhu správného rozměru prostoru je vytvořit co nejvyšší počet vlastních kmitů v celém slyšitelném spektru, aby nedocházelo k zesilování jen některých a vytvořilo se tak homogenní zvukové pole.

V oblasti nízkých kmitočtů je zvukové pole nevyrovnané a frekvence vlastních módů jsou od sebe ve spektrální oblasti hodně vzdálené, je vhodné nalézt takzvaný kritický neboli Schroederův kmitočet.



Obrázek 2 - Zobrazení stojatého vlnění v místnosti – ve směru osy Z je vyjádřena hladina akustického tlaku v daném bodu prostoru x, y

2.2.2 Schroederův kritický kmitočet

Tento kmitočet určuje frekvenci, do které je zvukové pole nevyrovnané, a tedy vlastní módy místnosti jsou od sebe ve spektru vzdálené. Od tohoto kmitočtu dále je možné považovat zvukové pole v prostoru za difuzní, což je základním bodem pro akustiku statistickou. Kritický kmitočet lze určit pomocí objemu zkoumaného prostoru V a známé doby dozvuku T (o době dozvuku více v kapitole 3.1) pomocí vztahu

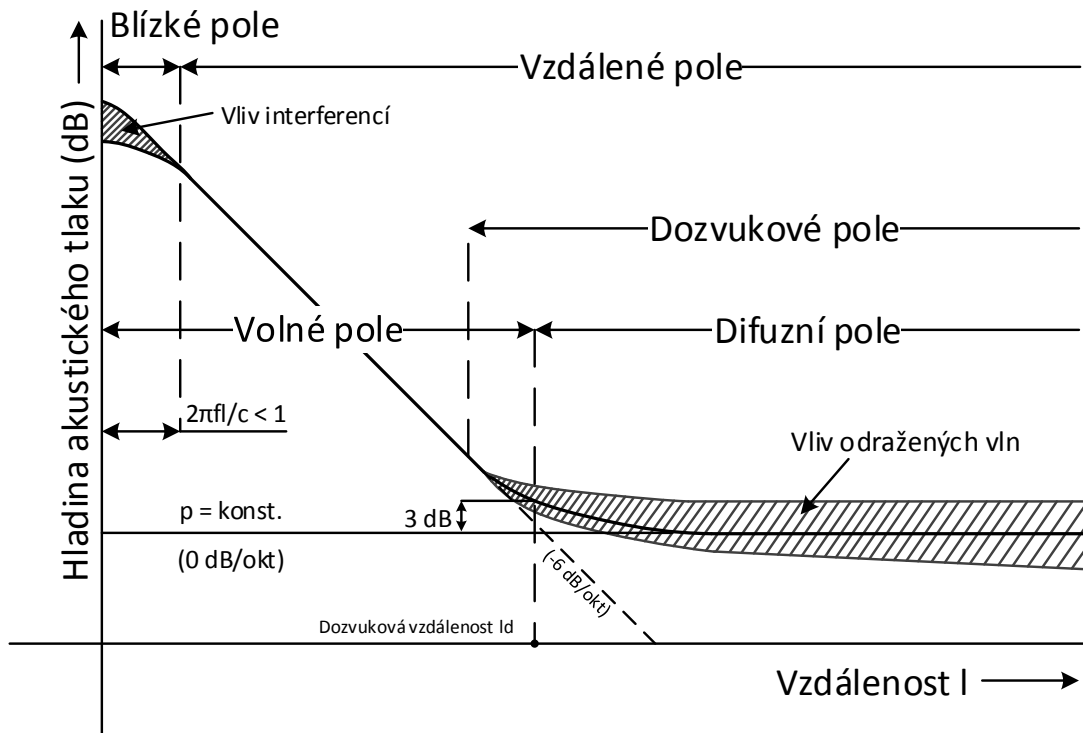
$$f_k = 2000 \sqrt{\frac{T}{V}} \quad (\text{Hz}) \quad (2)$$

2.3 Statistická akustika

Statistická akustika platí nad kritickým kmitočtem (2) a je základem praxe v prostorové akustice. Klíčové u tohoto přístupu je zprůměrování všech akustických veličin. Poté je možné se zabývat hustotou energie v daném prostoru. Celý tento princip je založen na předpokladu existence takzvaného difuzního pole, které vzniká pouze v uzavřených prostorech. Difuzní pole je částí zvukového pole, ve kterém převládá energie odražených vln nad energií vln přímých (Více v popisu obrázku 3). V otevřených prostorech nikdy nenastane případ, kdy by v nějakém místě byla větší hustota odražených vln než těch přímých. V difuzním poli je energie zvuku rozložena rovnoměrně.

Statistická akustika předpokládá tyto důležitá zjednodušující pravidla [1], která zároveň definují vlastnosti difuzního pole.

1. Velikost energie v jakémkoli bodě je dána součtem středních hodnot energie, která do tohoto bodu dorazila po odrazu
2. Hustota zvukové energie je ve všech bodech stejně velká – předpoklad difuzního pole
3. Úhly příchodu zvukové energie do daného bodu jsou všechny stejně pravděpodobné
4. Vyzařování a pohlcování je kontinuální



Obrázek 3 – Rozložení akustického pole v uzavřeném prostoru jako funkce vzdálenosti od zdroje. Nejbližší zdroji je blízké pole, na které mají zásadní vliv interference - dochází ke skládání různých fází akustického tlaku - a proto je vyjádření okamžitého akustického tlaku poměrně složité. S větší vzdáleností dochází ke zmenšení vlivu různých fází a blízké pole přechází do pole volného. Ve volném poli platí pokles hladiny akustického tlaku o 6 dB s dvojnásobkem vzdálenosti až do dozvukové vzdálenosti l_d , kde již převládne vliv odražených vln nad vlnami přímými a vzniká difuzní pole

3 Určení akustických vlastností prostoru

3.1 Doba dozvuku

Dozvuk je zvuk, který se šíří místností po utichnutí prvotního zdroje zvuku. Doba dozvuku je klíčovým parametrem pro návrhy akustických úprav. Lze podle ní objektivně hodnotit akustické vlastnosti místnosti a jejich vliv na poslech hudby či srozumitelnost. Obecně je doba dozvuku definována jako doba, za kterou po vypnutí zdroje poklesne hustota energie v prostoru o 60 dB. Energie zdroje je pohlcena především materiály v místnosti, zvláště u větších prostorů se projeví také útlum zvuku ve vzduchu.

Níže jsou uvedeny jednotlivé metody teoretického výpočtu doby dozvuku, každá se hodí pro různé hodnoty celkové pohltivosti materiálů v místnosti.

3.1.1 Doba dozvuku podle Sabina

Sabine předpokládal, že zvuková energie je stěnami obklopujícími uzavřený prostor pohlcována plynule [1].

$$T_S = 0,164 \frac{V}{\alpha S} \quad (\text{s}) \quad (3)$$

Kde V objem místnosti (m^3),
 α celkový činitel pohltivosti (-),
 S celkový obsah ploch materiálů (m^2)

Pokud je v měřené místnosti více ploch s různým činitelem pohltivosti, je celkový činitel pohltivosti α definován pomocí rovnice

$$\alpha = \frac{\sum_i \alpha_i S_i}{S} \quad (\text{s}) \quad (4)$$

Kde α_i je pohltivost stěny o obsahu plochy S_i .

Vztah (3) se používá pro prostory s malým koeficientem pohltivosti α , s vyšším koeficientem α roste chyba. Teoreticky pro $\alpha = 1$ by měla být doba dozvuku nulová, což ovšem podle Sabinova vztahu neplatí. Z toho důvodu byl zaveden nový vztah, známý jako doba dozvuku podle Eyringa.

3.1.2 Doba dozvuku podle Eyringa

Protože předpoklad, že zvuková energie je pohlcována postupně pro vyšší hodnoty α již neplatí, přichází Eyring s předpokladem, že se dopadající vlna oslabí skokově. Poté je doba dozvuku podle Eyringa definována jako

$$T_E = 0,164 \frac{V}{-S \ln(1 - \alpha)} \quad (\text{s}) \quad (5)$$

Kde V objem místnosti (m^3),
 α celkový činitel pohltivosti (-),
 S celkový obsah ploch materiálů (m^2)

V praxi se ukázalo, že ani Eyringův vzorec nedává uspokojivé informace v těch případech, kdy jsou hodnoty činitele zvukové pohltivosti větší než 0,8, a proto je vhodnější použít vzorec Millingtonův [1].

3.1.3 Doba dozvuku podle Millingtona

$$T_M = 0,164 \frac{V}{-\sum_1^n S_i \ln(1 - \alpha_i)} \quad (\text{s}) \quad (6)$$

Kde V objem místnosti (m^3),
 α_i jednotlivé příspěvky činitelů pohltivosti (-),
 S_i obsah ploch materiálů pro odpovídající α_i (m^2)

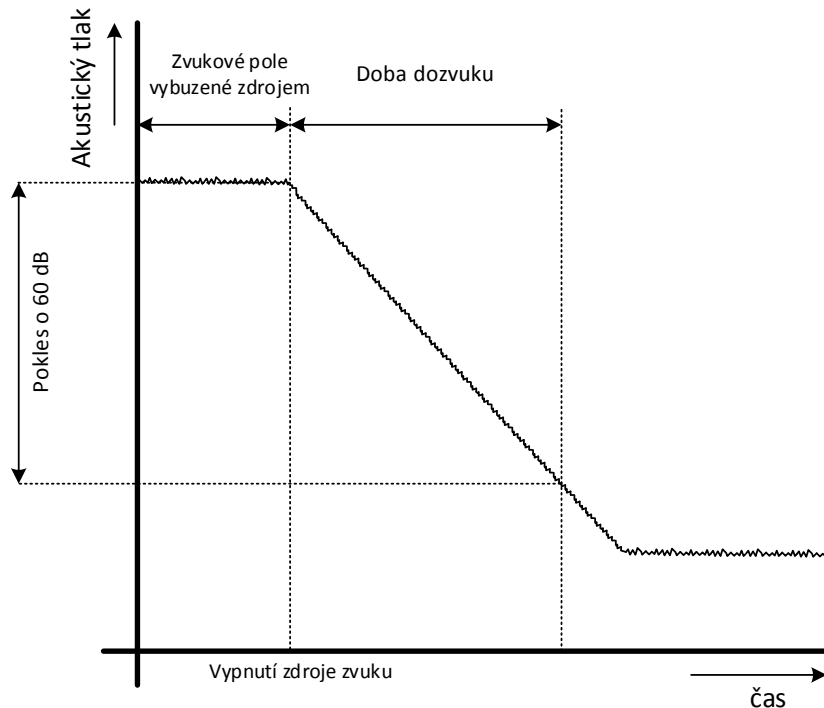
Ve výsledku se pak v praxi ještě u všech vzorců přičítá ke jmenovateli člen $4mV$, který vyjadřuje vliv útlumu zvuku při šíření prostředím. Činitel útlumu m je závislý na relativní vlhkosti, teplotě a kmitočtu, V je objem místnosti.

Výsledný vztah pro výpočet doby dozvuku podle Sabina je poté uváděn jako (7).

$$T_S = 0,164 \frac{V}{\alpha S + 4mV} \quad (s) \quad (7)$$

3.2 Měření doby dozvuku

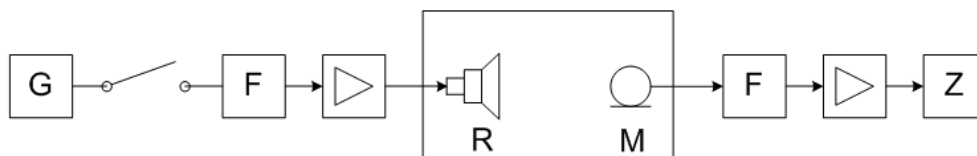
Jak již bylo výše zmíněno (kapitola 4.1) doba dozvuku je jedním z klíčových parametrů pro určení poslechových podmínek ve zkoumaném prostoru. Výsledky různých studií i subjektivních testů ukazují, že doba dozvuku je nejvýznamnějším faktorem ovlivňujícím kvalitu poslechu v uzavřeném prostoru [1]. Standardní definice doby dozvuku hovoří o poklesu energie o 60 dB (viz 4.1). Při reálném měření je však poměrně těžké dosáhnout na všech frekvencích odstupů užitečného signálu od šumu pozadí o 60 dB, proto se častěji používá doba dozvuku T_{30} , viz kapitola 3.2.3 níže.



Obrázek 4 – Zobrazení určení doby dozvuku z poklesu akustického tlaku o 60 dB po vypnutí budícího zdroje

3.2.1 Standardní měření doby dozvuku

Měření doby dozvuku vychází z její definice. Měřicí zařízení se skládá podle obrázku 5 z generátoru signálu G (často šum, někdy též frekvenčně modulovaný sinusový signál s modulačním kmitočtem okolo 10 Hz [1]), třetinooktávového filtru F, zesilovače a všesměrového zdroje (reproduktoru) R. Na přijímací straně se nachází mikrofon M, třetinooktávový filtr F, zesilovač a zapisovač Z [1].



Obrázek 5 – Náskres standardní sestavy pro měření doby dozvuku podle [1]

Generátor vybudí místnost daným signálem tak, aby hladina akustického tlaku byla alespoň o 45 dB vyšší (pro T_{30}), než v nevybuzeném prostoru a poté se vypne. Mikrofonem se doznívající signál zaznamená a poté analyzuje pokles hladiny akustického tlaku v čase.

3.2.2 Měření MLS

V dnešní době se pro měření doby dozvuku využívá počítačů a různých softwarů. Ty jsou schopné rovnou určit rozličné akustické parametry měřené místnosti. Pro tato měření se také často nevyužívá náhodného signálu (šumu), pro který je nutné tiché prostředí, ale kupříkladu pseudonáhodného signálu MLS. MLS je periodická, dvoustavová posloupnost generovaná na základě zpětnovazebního posuvného registru, která má vlastnosti podobné šumu – především rovné frekvenční spektrum. Impulzní odezva je poté určena pomocí konvoluce vstupního signálu reproduktoru s časově převráceným signálem zaznamenaným měřícím mikrofonem. To lze matematicky vyjádřit jako

$$y[n] = h[n] * x[n] \quad (8)$$

kde výstup lineárního, časově nezávislého (LTI) systému $y[n]$, kterým je v tomto případě zaznamenaný signál, je roven konvoluci impulzní odezvy $h[n]$ se známým vstupním signálem MLS $x[n]$. Po převedení signálů do spektrální oblasti přechází konvoluce v prosté násobení, odkud lze jednoduše vyjádřit neznámou impulzní odezvu systému. Mezi další často používané měřící metody patří například Sine Sweep.

3.2.3 Určení doby dozvuku z impulzní odezvy

Dnes se doba dozvuku získává nejjednodušeji z impulzní odezvy místnosti (získané například pomocí měření MLS signálem), použitím Schroederovy metody. Ta je podle [3] založena na reverzní časové integraci kvadrátu hodnot impulzní odezvy $p(\tau)$. Vztah pro průběh doby dozvuku $E(t)$ je pak daný jako

$$E(t) = \int_t^{\infty} p^2(\tau) d\tau = \int_0^{\infty} p^2(\tau) d\tau - \int_0^t p^2(\tau) d\tau \quad (9)$$

Z dozvukové křivky se poté určí doba dozvuku a to nejčastěji jako T_{30} , tedy čas odpovídající poklesu o 30 dB (od -5 dB do -35 dB). Tato hodnota je poté lineárně aproximována, aby odpovídala poklesu o 60 dB. Další používaný parametr vycházející z doby dozvuku je Early Decay Time. EDT je čas dozvuku pro pokles hustoty energie o prvních 10 dB (od 0 dB do -10 dB). Tento prvotní pokles má největší vliv na subjektivní vnímání dozvuku a s tím spojenou srozumitelnost mluveného slova. Hodnota pro pokles o 10 dB je poté podobně jako u T_{30} lineárně aproximována aby odpovídala poklesu o 60 dB dle definice.

3.3 Srozumitelnost řeči

Přednáškové sály jsou určeny především pro řečový signál. Srozumitelnost řeči je tedy jedním z určujících parametrů pro správnou akustiku tohoto typu prostorů. Odvíjí se od doby dozvuku v místnosti. Na rozdíl od prostorů určených k poslechu není však třeba klást důraz na její vyrovnanost ve frekvenční oblasti.

3.3.1 STI a RASTI

Pro porovnání srozumitelnosti řeči je možné použít subjektivní poslechové testy, mnohem jednodušší je ale využít měření akustických vlastností prostoru (mimo jiné např. dobu dozvuku místnosti), ze kterých je možné určit některý z používaných parametrů hodnotících srozumitelnost mluveného slova. Jedním z nejpoužívanějších je STI, neboli Speech Transmission Index. Řečový signál je amplitudově modulován – takzvané formanty vzniklé rezonancí v hlasovém ústrojí. STI zkoumá, jak se změní obálka signálu po přidání šumu a dozvuku v místnosti a tím posuzuje kvalitu přenosu řeči od přednášejícího k posluchači. Dalo by se tedy říct, že metoda STI hodnotí vliv přenosového kanálu na přenášený signál.

Hodnota STI může být rozdílná pro hlubší mužský hlas proti vyššímu ženskému hlasu, proto se někdy udávají dvě hodnoty STI_{male} a STI_{female} . STI může nabývat hodnot od 0 do 1, v tabulce 1 je popsáno hodnocení srozumitelnosti podle tohoto indexu. Numericky je možné STI určit ze změřené doby dozvuku místnosti pomocí modulační přenosové funkce.

Alternativou k STI je RASTI (Rapid Speech Transmission Index), která se měří jen ve 2 oktávových pásmech (500 a 2000 Hz), na rozdíl od 7 třetinooktávových pásem u STI (125 až 8000 Hz) a je tak méně výpočetně náročná.

STI	0 až 0,30	0,30 až 0,45	0,45 až 0,60	0,60 až 0,75	0,75 až 1
Srozumitelnost	Nesrozumitelné	Špatné	Dostačující	Dobré	vynikající

Tabulka 1 - Tabulka hodnocení STI - Převzato z [4]

Matematicky lze k RASTI dojít dle [5] nejprve pomocí vyjádření modulační funkce $m(f)$ přes 9 modulačních frekvencí v rozsahu od 0,7 do 11,2 Hz – 4 frekvence v okolí pásma 500 Hz a 5 v okolí pásma 2000 Hz (u STI 14 modulačních frekvencí).

$$m(f) = \frac{1}{\sqrt{\left(1 + \left(2\pi f \frac{T}{13,8}\right)^2\right)}} \quad (10)$$

Každá z 9 hodnot modulačního indexu m je převedena na „zdánlivý poměr signálu k šumu“ - (SNR_z)

$$SNR_z = 10 \log_{10} \left(\frac{m}{1 - m} \right) \quad (11)$$

A odtud po určení průměrného $\overline{SNR_z}$ určit RASTI

$$RASTI = \frac{1}{30} (\overline{SNR_z} + 15) \quad (12)$$

4 Faktory ovlivňující akustický prostor

4.1 Rozměry a tvar místnosti

Rozměr a tvar má především na nízkých kmitočtech velký vliv na akustické vlastnosti místnosti. Jsou to klíčové parametry, které je nutné zohlednit již při stavebním návrhu místnosti, především proto, že je poté velmi náročné a také nákladné dohánět stavební nedostatky různými obklady a podhledy. Základním pravidlem pro návrh místnosti je stanovení nesoudělného poměru jejích stran z důvodu rovnoměrného rozložení vlastních módů místnosti. To znamená například 2:3:5. V opačném případě (nejhorší možnost je tvar krychle), bude daný rezonanční kmitočet módem místnosti pro všechny 3 směry. Takto zesílený rezonanční kmitočet je pak velmi obtížné zatlumit.

Tvarem místnosti lze ovlivnit směr odrazů. Toho je možné využít například v prostorech, kde je jasně dáno, v jaké části prostoru bude posluchač sedět a kde bude zdroj zvuku a podle toho jsou směřovány odrazy (typicky kina, koncertní sály a haly).

4.2 Akustické prvky a materiály

Akustické prvky se používají pro zlepšení akustických vlastností různých prostorů. Jedná se především, nikoli však výhradně, o prostory, u kterých jsou vyžadovány určité nadstandardní akustické parametry (vyrovnaná doba dozvuku nahrávacího studia a podobně), nesplnitelné pouhým správným návrhem dispozic, nebo které jsou již postavené a nesplňují dané parametry.

Akustické prvky lze rozdělit do tří hlavních kategorií podle jejich funkce. Nejběžněji používané jsou akusticky pohltivé materiály, které najdou uplatnění téměř v jakémkoli prostoru a používají se ke snížení celkové doby dozvuku především na středních a vyšších kmitočtech. Další skupinu tvoří rezonátory, které se používají především pro utlumení nižších kmitočtů a najdou tak uplatnění v místech, kde je kladen důraz na vyrovnanou dobu dozvuku. Poslední skupinu tvoří difuzory, které se uplatní především v hudebních a nahrávacích studiích.

V poslední době se trh s akustickými prvky velmi rozšířil a při úpravě akustiky se již lidé nezabývají čistě funkční stránkou celkové úpravy, ale také estetickou. Mnohdy tak o různých akustických úpravách rozhodují nejen vlastnosti materiálu, ale i jeho vzhled. Různé akustické materiály a prvky jsou popsány níže a jsou k nim vždy přiloženy příklady daného materiálu dostupného na trhu.

Akustické prvky a materiály mají různé tvary, velikosti a především akustické vlastnosti. Při jejich výběru a určení jejich kvalit, co se akustických úprav týče, je základním a často také nejdůležitějším faktorem činitel zvukové pohltivosti. Další parametry, ke kterým bývá možné u materiálů přihlídnout, je jejich hmotnost, způsob uchycení k podkladu, vzhled a v neposlední řadě také cena.

V této kapitole jsou uvedeny a krátce popsány některé používané akustické prvky a jejich vlastnosti. Je však nutné zmínit, že uvedené hodnoty v této části - především pohltivosti materiálů - jsou čerpány převážně ze stránek výrobců. Metody měření pohltivosti se mohou u jednotlivých výrobců lišit, takže porovnatelnost jednotlivých materiálů je poměrně obtížná a údaje je nutné brát s rezervou. Zároveň platí, že při realizaci akustických úprav není nikdy možné dosáhnout laboratorních podmínek, jako při testování vlastností materiálů.

4.2.1 Činitel zvukové pohltivosti

Činitel zvukové pohltivosti α definujeme jako poměr pohlcené energie dopadající vlny W_p k celkové energii dopadající vlny W_d . Tento poměr charakterizuje základní akustickou vlastnost materiálu a nabývá hodnot 0 až 1. Z toho plyne, že úplně odrazivý akustický prvek bude mít $\alpha = 0$, jako například holé betonové zdi s činitelem zvukové pohltivosti v řádu setin. Naopak u naprosto pohltivého materiálu je $\alpha = 1$, to je často zmiňované jako pohltivost otevřeného okna (např. [6]) – toto tvrzení však také není zcela pravdivé, i otevřené okno nebude při reálném měření vykazovat vlivem difrakce zvuku na okrajích naprosto pohltivé vlastnosti.

$$\alpha = \frac{W_p}{W_d} \quad (-) \quad (13)$$

Činitel zvukové pohltivosti α je kmitočtově závislý a nejčastěji se udává v oktávních pásmech od 125 do 4000 Hz.

4.2.2 Porézní materiály

Porézní materiály lze rozdělit dle struktury na materiály vláknité nebo pěnové. Tyto materiály mají v sobě malé dutinky vyplněné vzduchem, které musí být vzájemně propojené, aby se zvuk mohl materiálem šířit a postupně tlumit. Vzduch v těchto dutinkách tvoří 80 až 99 % celkového objemu materiálu [1] i [6]. Pohltivé vlastnosti těchto materiálů jsou dány právě hustotou a velikostí dutinek v něm. Energie dopadající zvukové vlny se v porézním materiálu přeměňuje na energii tepelnou vlivem tření a viskózních sil [1] – kmitající částičky vzduchu jsou bržděny viskozitou vzduchu na stěnách jednotlivých pórů, či na povrchu vláken [6].

Tyto materiály se používají zvláště pro pohlcování středních a vyšších kmitočtů a to především proto, že kmitočty, na kterém jsou schopné tyto materiály pohlcovat, je přímo závislý na jeho tloušťce – čím nižší kmitočty chceme tlumit, tím je potřeba silnější materiál. Z tohoto důvodu se tak velké množství pohltivých materiálů doporučuje umístit s odstupem několika centimetrů od stěny, čímž se mnohonásobně zvětší účinnost materiálu a zároveň zvětší frekvenční šířka pásma, na které pracují.

Následují příklady různých dostupných porézních materiálů.

Polyson

Pórovitý materiál z měkkého lehčeného polyuretanu tvořený malými (50 x 70 x 70 mm) čtyřbokými jehlany na lícové straně. Polyson slouží jako základní, poměrně levné a snadno aplikovatelné řešení drobných akustických úprav. Je určený pro pohlcování zvuku na středních a především vyšších kmitočtech.

Výrobce: Soning

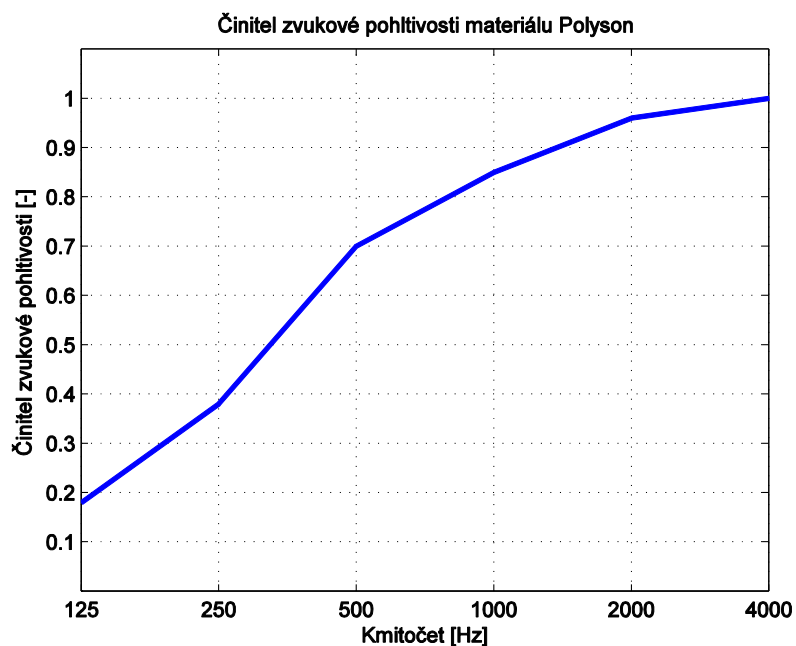
Hmotnost uváděná výrobcem: 1,4 kg/m²

Tloušťka obkladu: 75 mm

Průměrný koeficient akustické pohltivosti: $\alpha_s = 0,68$



Obrázek 6 – Polyson, převzato z [7]



Obrázek 7 - Průběh činitele zvukové pohltivosti materiálu Polyson

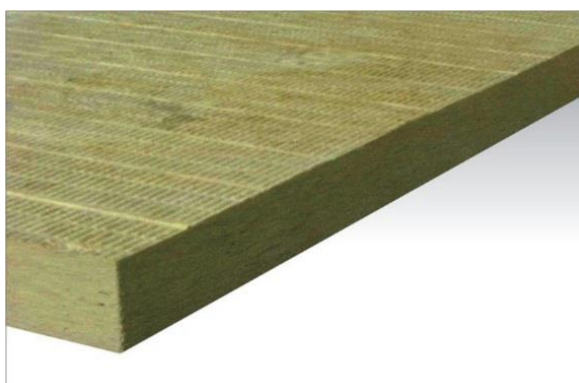
Airrock HD

Materiál z minerální vlny pojené organickou pryskyřicí, používaný především jako tepelná izolace, který funguje také jako akusticky pohltivý materiál. Lze použít jako přídatný tlumivý materiál do akustických podhledů a obkladů pro celkové snížení doby dozvuku především na nízkých kmitočtech.

Výrobce: Rockwool

Tloušťka obkladu: Možné objednat v různých tloušťkách

Hmotnost uváděná výrobcem: neuvedeno



Obrázek 8 – Rockwool Airrock HD, převzato z [8]

Basotect

Basotect je pružná a lehká pěna z otevřených buněk a bublinek vytvořená z melaminového polyuretanu – resinu. Je vysoce zvukově pohltivý velmi lehký. Hodí se pro umístění přímo na stěnu případně, díky nízké hmotnosti, jako závěsný prvek na strop. Dále je možné ho jednoduše upravit do různých tvarů, podobně jako Polyson.

Výrobce: BASF

Hmotnost uváděná výrobcem: 10 kg/m^3

Tloušťka obkladu: možno objednat v různých tloušťkách, udávané vlastnosti pro tloušťku 50 mm

Průměrný koeficient akustické pohltivosti: $\alpha_s = 0,78$



Obrázek 9 – Basotect, převzato z [9]

Sonit D30

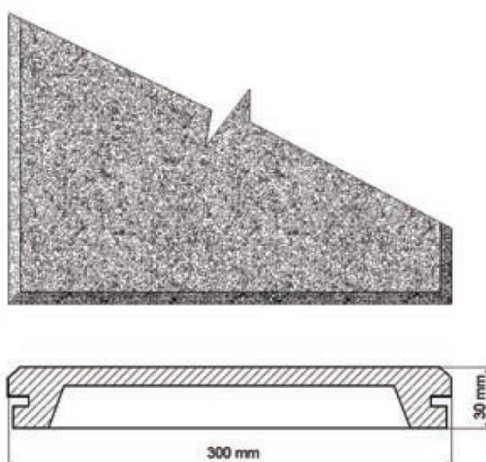
Rovné obkladové desky s dutinou na rubové straně, tvořené pískem pojeným epoxidovou kompozicí. Mají vysokou mechanickou i klimatickou odolnost a vysoký koeficient akustické pohltivosti především ve středních kmitočtech.

Výrobce: Soning

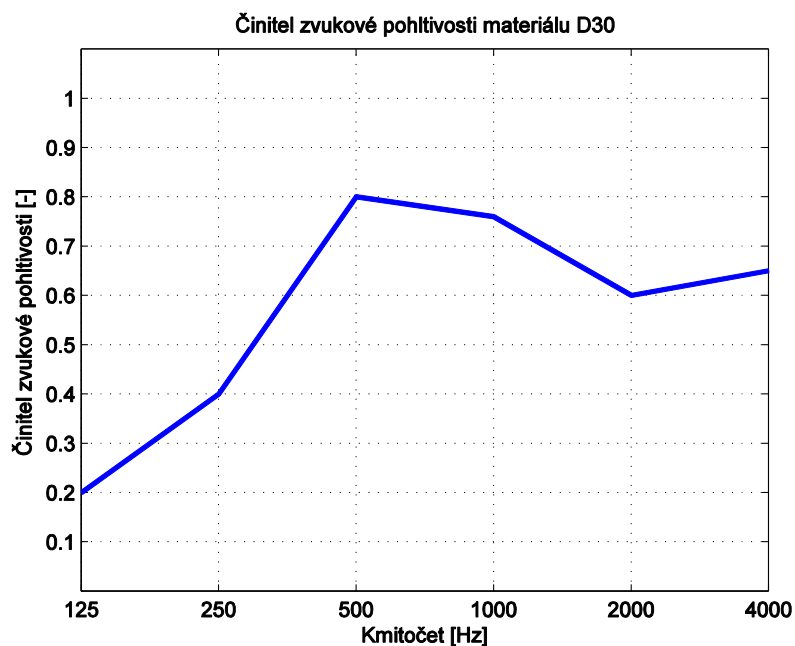
Hmotnost uváděná výrobcem: 30 kg/m^2

Tloušťka obkladu: 30 mm

Průměrný koeficient akustické pohltivosti: $\alpha_s = 0,65$



Obrázek 10 – Nákras materiálu Sonit D30, převzato z [7]



Obrázek 11 - Průběh činitele zvukové pohltivosti materiálu Sonit D30 při měření se vzduchovou mezerou 75 mm

TK-SON

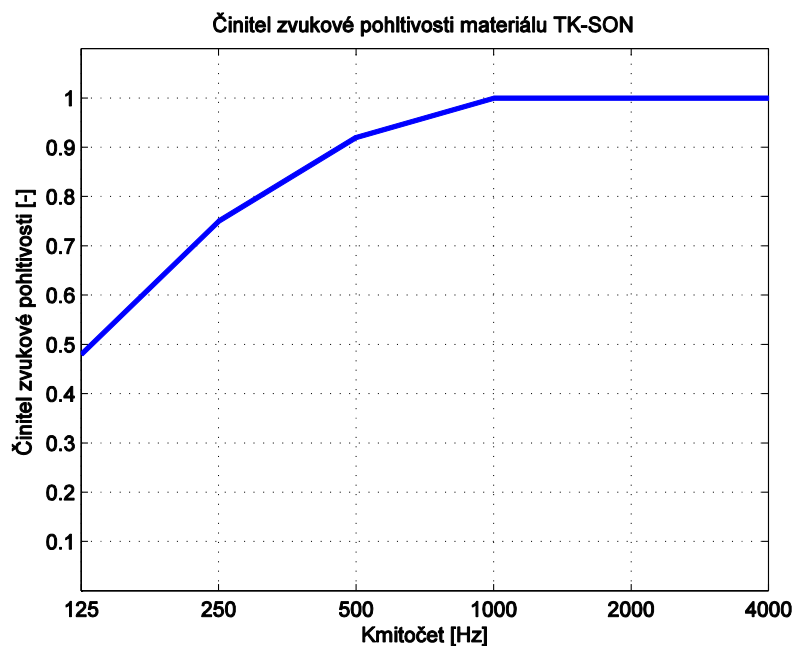
Podhledový prvek tvořený kovovým panelem s mřížkou, na které je umístěn absorber z pěnového či vláknitého materiálu. Určený pro širokopásmovou absorpci zvuku, především pak ve středních a vysokých kmitočtech. Tento akustický prvek je nehořlavý.

Výrobce: Soning

Hmotnost uváděná výrobcem: neuváděna

Tloušťka obkladu: neuváděna

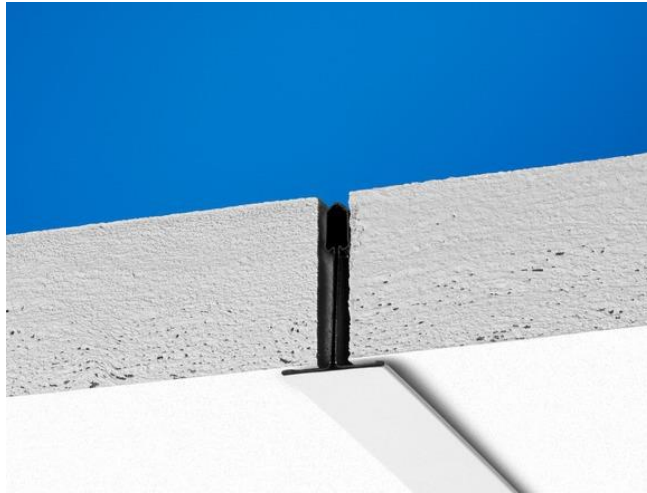
Průměrný koeficient akustické pohltivosti: $\alpha_s = 0,86$



Obrázek 12 - Průběh činitele zvukové pohltivosti materiálu TK-SON

Ecophon

Činitelé zvukové pohltivosti stanoveny na základě výsledků zkoušek v souladu s EN ISO 354.



Obrázek 13 – Ecophon, převzato z [10]

Akusto

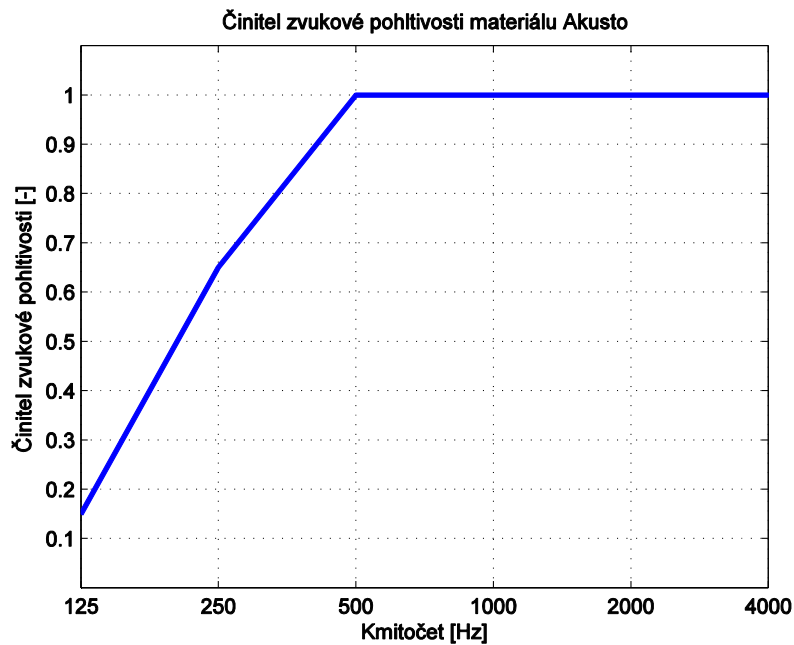
Vertikální vláknitý akustický obklad pro pohlcování zvuku ve středních a vysokých kmitočtech. Je tvořen ze skelné vlny s povrchovou úpravou ze sklovláknité tkaniny nebo s odrazivým povrchem.

Výrobce: Ecophon

Hmotnost uváděná výrobcem: 4 kg/m²

Tloušťka obkladu: 40 mm

Průměrný koeficient akustické pohltivosti: $\alpha_s = 0,8$



Obrázek 14 - Průběh činitele zvukové pohltivosti materiálu Akusto

Gedina

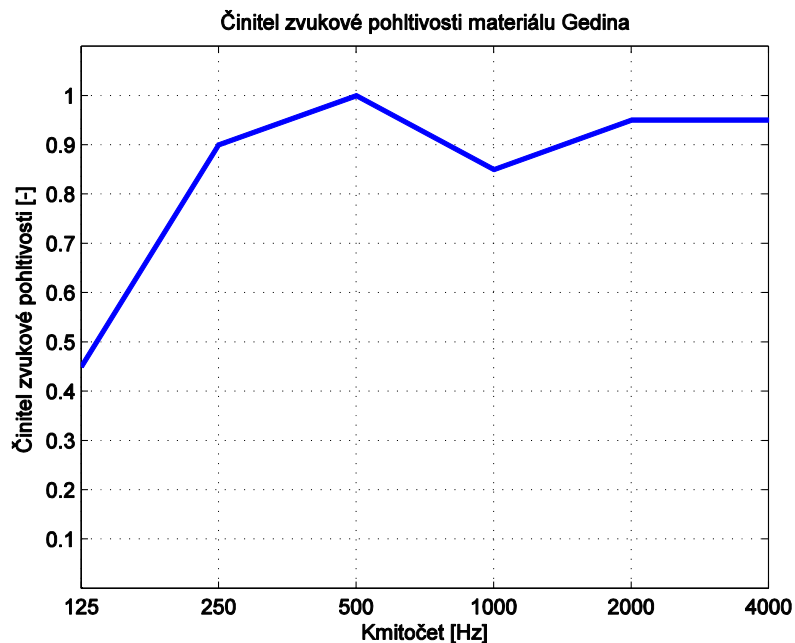
Akustický pohled ze skelné vlny o tloušťce 15 mm. Je určený pro širokopásmovou absorpci zvuku, především ve středních a vysokých kmitočtech.

Výrobce: Ecophon

Hmotnost uváděná výrobcem: cca 2,5 kg/m²

Tloušťka obkladu: 15 mm

Průměrný koeficient akustické pohltivosti: $\alpha_s = 0,85$



Obrázek 15 - Průběh činitele zvukové pohltivosti materiálu Gedina se vzduchovou mezerou 185 mm mezi obkladem a stěnou

Focus

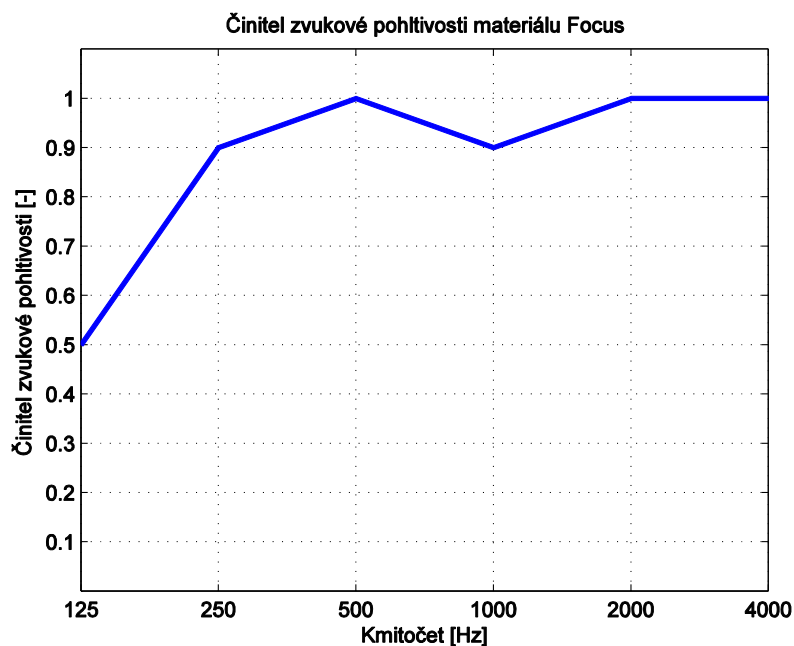
Akustický pohled ze skelné vlny o tloušťce 20 mm. Je určený pro širokopásmovou absorpci zvuku, především ve středních a vysokých kmitočtech.

Výrobce: Ecophon

Hmotnost uváděná výrobcem: cca 3 Kg/m²

Tloušťka obkladu: 20 mm

Průměrný koeficient akustické pohltivosti: $\alpha_s = 0,85$



Obrázek 16 - Průběh činitele zvukové pohltivosti materiálu Focus se vzduchovou mezerou 180 mm mezi obkladem a stěnou

Master

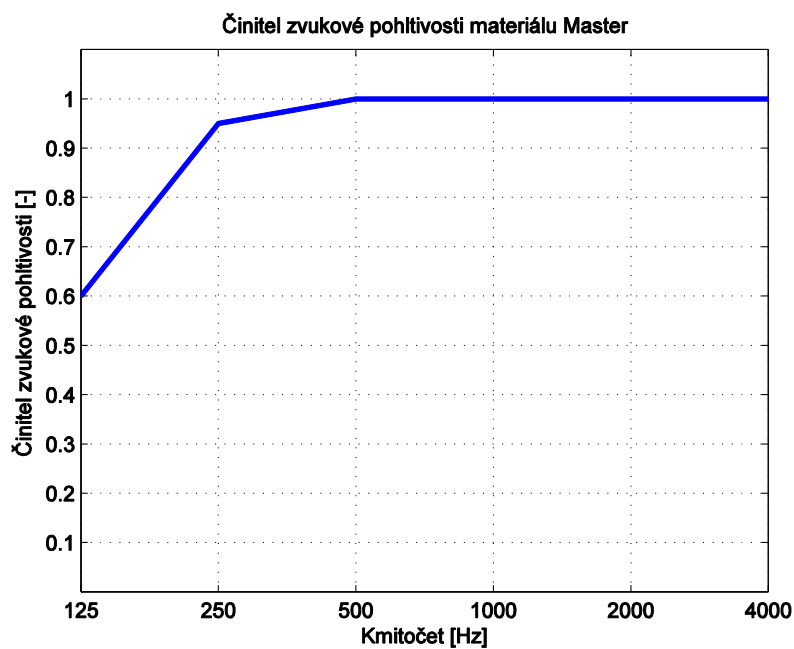
Akustický pohled ze skelného vlákna o tloušťce 40 mm. Je určený pro širokopásmovou absorpci zvuku, především pak ve středních a vysokých kmitočtech.

Výrobce: Ecophon

Hmotnost uváděná výrobcem: cca 5 Kg/m²

Tloušťka obkladu: 40 mm

Průměrný koeficient akustické pohltivosti: $\alpha_s = 0,93$



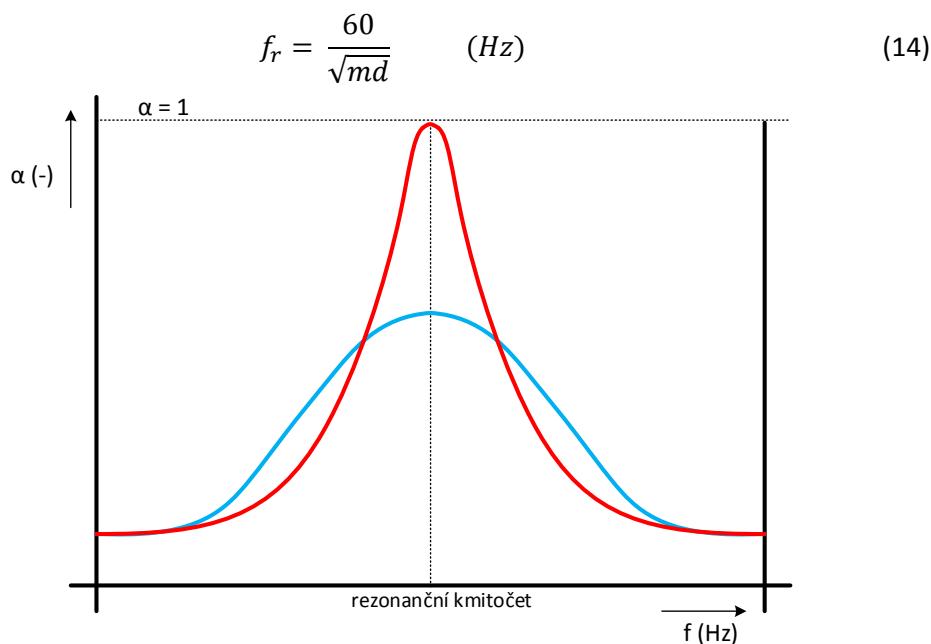
Obrázek 17 - Průběh činitele zvukové pohltivosti materiálu Master se vzduchovou mezerou 160 mm mezi obkladem a stěnou

4.2.3 Akustické prvky založené na rezonančním principu

Tyto prvky je možné rozdělit na rezonanční desky nebo membrány a Helmholtzovy rezonátory.

Kmitající desky a membrány

Jsou pružné desky převážně z překližky či sololitu nebo membrány, tvořící rezonanční soustavu. Desky či membrány jsou pružně ukotveny vždy v určité vzdálenosti ode zdi v pevně ohraničeném kazetování, čímž za rezonátorem vzniká vzduchový polštář sloužící k tlumení kmitů. Mezera může být také vyplněna jiným tlumícím materiálem pro lepší účinky a rovněž podle [6] také pro omezení vzniku vlastních kmitů v prostoru vzduchového polštáře. Při dopadu vlny se rozkmitáním desky energie vlny přeměňuje na mechanickou energii. Deska začne kmitat vlastní frekvencí a je postupně tlumena, dochází tedy ke konečné přeměně energie v teplo, zároveň také vyzařuje do prostoru za sebe, kde dochází k tlumení vyzářené energie. Tyto obklady fungují především pro nízké kmitočty a to vždy v okolí vlastního rezonančního kmitočtu f_r (14), který závisí na tloušťce vzduchové mezery d a na tuhosti, nebo také na plošné hmotnosti kmitajícího materiálu m . Platí, čím tužší materiál, tím větší frekvenční spektrum je rezonátor schopný tlumit, ale zároveň tento rozsah tlumí méně. Materiál méně tuhý, bude tlumit v užším frekvenčním spektru.



Obrázek 18 - Příklad rozdílných tuhostí rezonátorů, červeně nižší tuhost – vyšší tlumení na rezonančním kmitočtu, modře vyšší tuhost – nižší tlumení na širším frekvenčním rozsahu

Helmholtzovy rezonátory

Druhým rezonančním obkladem je takzvaný Helmholtzův rezonátor, který je tvořen dutinami s otvory. V každé dutině je sloupec vzduchu o určité hmotnosti fungující jako píst a tlumící materiál. K utlumení energie dopadající vlny a její přeměně na teplo dojde v důsledku mnohonásobného odražení vlny v dutině s tlumícím materiálem. Zjednodušený vztah, který zanedbává vliv odporu akustické hmotnosti pístu pro určení frekvence, na kterou je rezonátor naladěn, je dána dle vztahu

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{m_a c_a}} \quad (\text{Hz}) \quad (15)$$

Kde c_a akustická poddajnost závislá na objemu vzduchu a jeho hustotě
 m_a akustická hmotnost otvoru, která je určena hustotou vzduchu, délkou hrdla rezonátoru a jeho průřezem

Přesnější vztah pro určení rezonančního kmitočtu je pak podle [6] dán vztahem

$$f_r = \frac{c_0}{2\pi} \sqrt{\frac{S_0}{V(l + 2\Delta l)}} \quad (\text{Hz}) \quad (16)$$

Kde c_0 rychlost šíření zvuku ve vzduchu
 S_0 plocha dutiny rezonátoru
 V objem vzduchového polštáře v rezonátoru
 $2\Delta l$ korekce délky otvoru

Následují příklady různých dostupných prvků založených na rezonančním principu.

KPS30

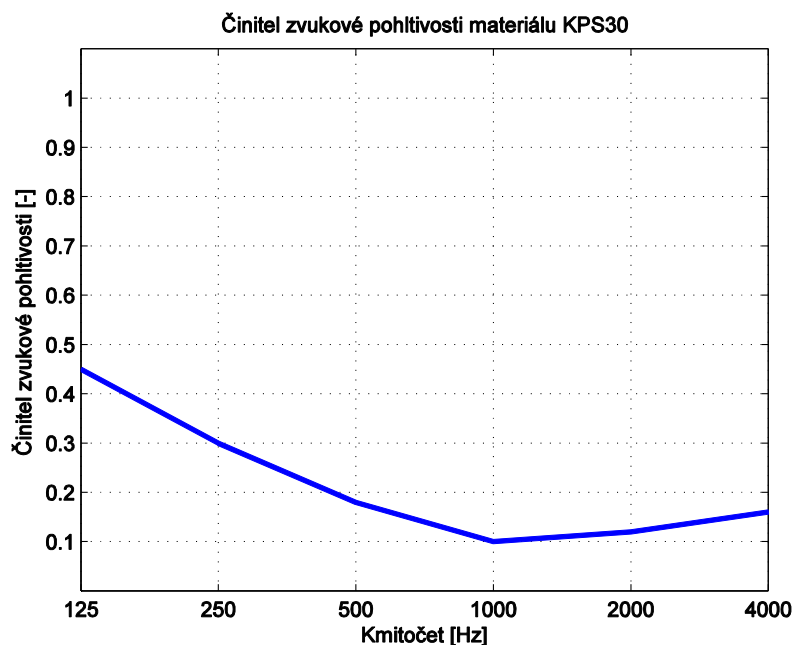
Jednoduché kmitající panely tvořené MDF deskou, překližkou a minerální plstí. Určené pro pohlcování především nízkých kmitočtů.

Výrobce: Soning

Hmotnost uváděná výrobcem: 35 kg/m²

Tloušťka obkladu: 80 mm

Průměrný koeficient akustické pohltivosti: $\alpha_s = 0,23$



Obrázek 19 - Průběh činitele zvukové pohltivosti materiálu KPS-30

Knauf - D12 Cleaneo

Akustické podhledové desky ze sádry s otvory nebo štěrbinami. Tato konstrukce pohlcuje účinně zvuk v celém slyšitelném frekvenčním spektru. Samotné desky jemně kmitají na vlastní frekvenci a fungují tak jako rezonátor pro pohlcení především nízkých kmitočtů. Ve štěrbinách desky dochází k rezonanci a jsou tak tlumeny střední kmitočty. Vyrábí se s různým rozložením a velikostí děr (D127) či štěrbin (D128). Činitel zvukové pohltivosti se pak liší v závislosti na tomto rozložení. Na rubové straně desky může být přidána tenká vrstva minerální vlny Paratex s plošnou hmotností 45 g/m² tloušťky 20 mm pro tlumení především vysokých kmitočtů.

D127 varianta 15/30

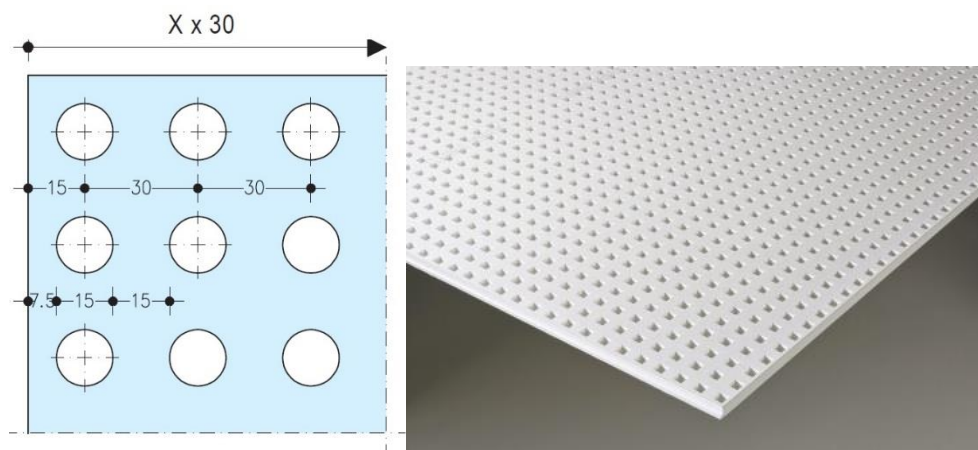
Materiál D127 je tvořen kruhovými dírami o poloměru 7,5 mm s rozestupy 30 mm mezi středy děr. Činitele zvukové pohltivosti na obrázku 22 je dosaženo při použití 20 mm silné izolace na rubové straně a se vzduchovou mezerou mezi obkladem a zdí velikosti 400 mm. S menší vzduchovou mezerou tlumí materiál méně na nízkých a zároveň výrazně méně na vysokých kmitočtech.

Výrobce: Knauf

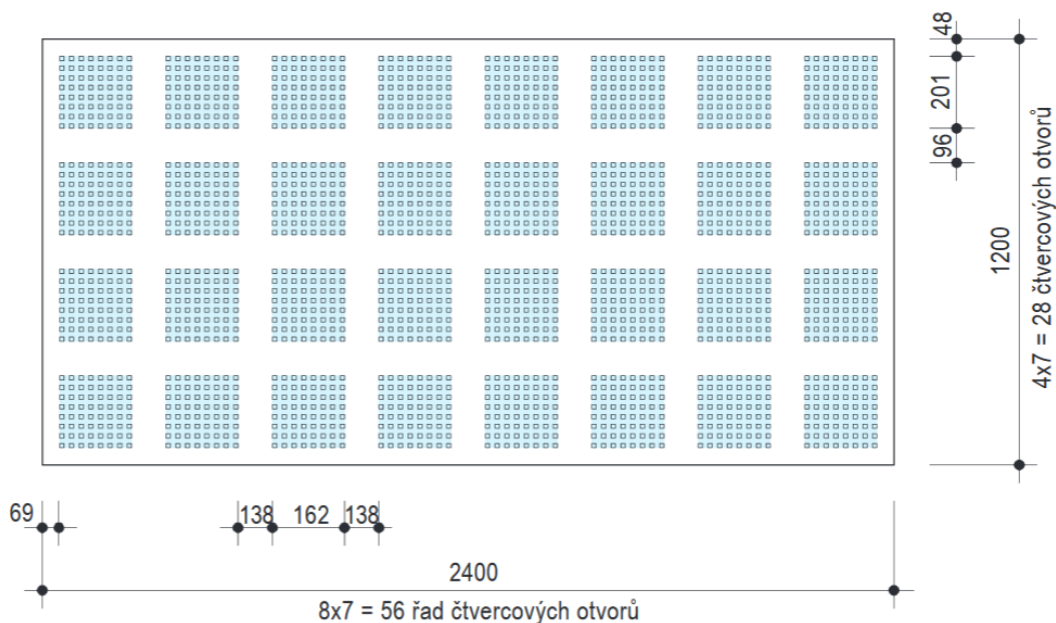
Hmotnost uváděná výrobcem: neuvedena

Tloušťka obkladu: 12,5 mm

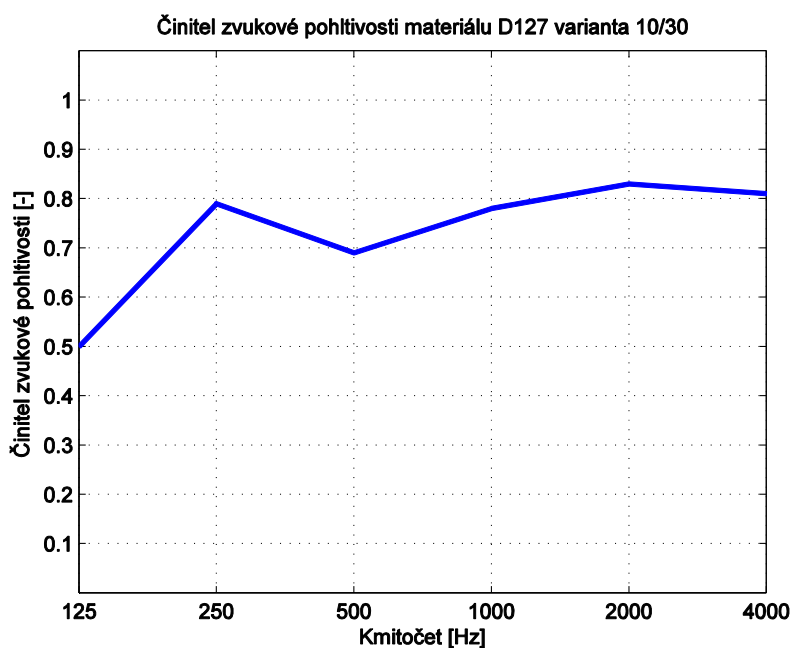
Průměrný koeficient akustické pohltivosti: $\alpha_s = 0,73$



Obrázek 20 – Děrování materiálu D127 Obrázek vpravo převzat z [11]



Obrázek 11 – Zobrazení rozložení děr desky D127



Obrázek 22 - Průběh činitele zvukové pohltivosti materiálu D127 ve variantě 15/30 se vzduchovou mezerou 400 mm mezi obkladem a stěnou

D128 varianta B6

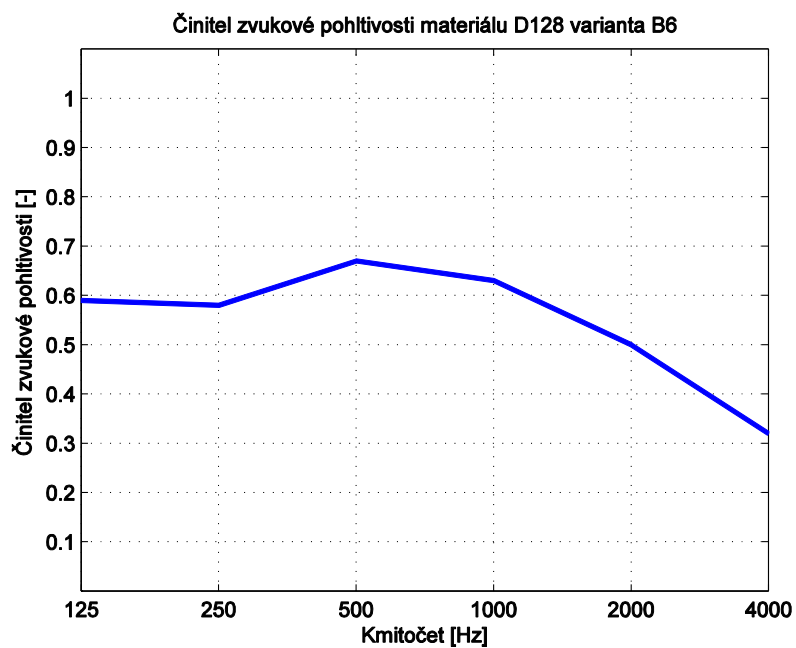
Materiál D128 je tvořen štěrbinami. U varianty B6 jsou štěrbiny horizontální ve čtyřech sloupcích. Činitele zvukové pohltivosti na obrázku 23 je dosaženo při použití 20 mm silné izolace na rubové straně a se vzduchovou mezerou mezi obkladem a zdí velikosti 400 mm. S menší vzduchovou mezerou tlumí materiál méně na nejnižších kmitočtech.

Výrobce: Knauf

Hmotnost uváděná výrobcem: neuváděna

Tloušťka obkladu: 12,5 mm

Průměrný koeficient akustické pohltivosti: $\alpha_s = 0,55$



Obrázek 23 - Průběh činitele zvukové pohltivosti materiálu D128 ve variantě B6 se vzduchovou mezerou 400 mm mezi obkladem a stěnou

DR-SON

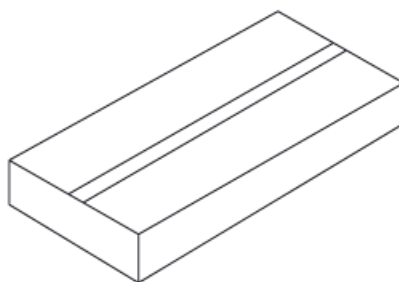
Rezonátor určený k absorpci vybraného kmitočtu a jeho okolí. Pohlcovaný kmitočet závisí na naladění podélné štěrby rezonátoru. Tvořeno dřevotřískou a minerální vlnou.

Výrobce: Soning

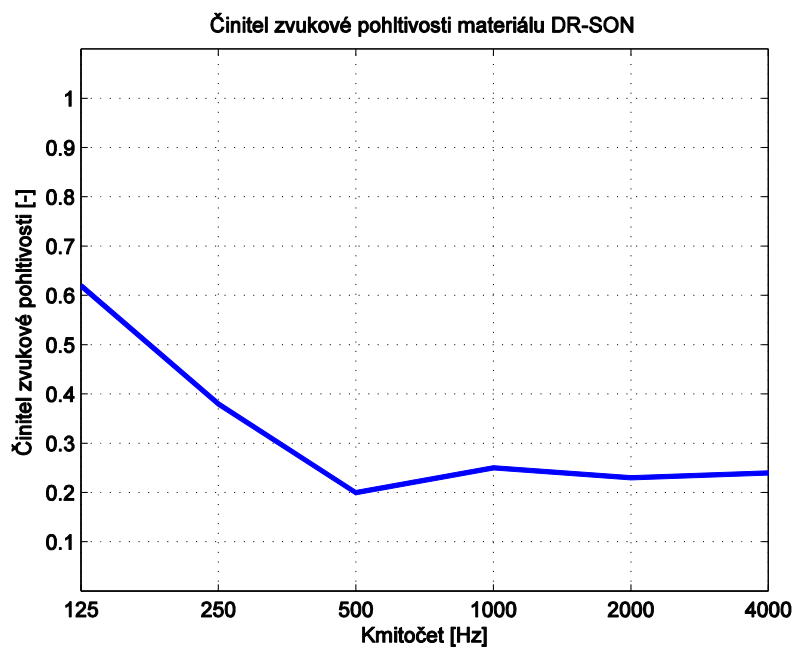
Hmotnost uváděná výrobcem: neuvedeno

Rozměr: 1200 x 600 x 180 mm

Průměrný koeficient akustické pohltivosti: $\alpha_s = 0,32$



Obrázek 24 – Náčres rezonátoru DR-SON, převzato z [7]



Obrázek 25 - Průběh činitele zvukové pohltivosti materiálu DR-SON

BF-SON

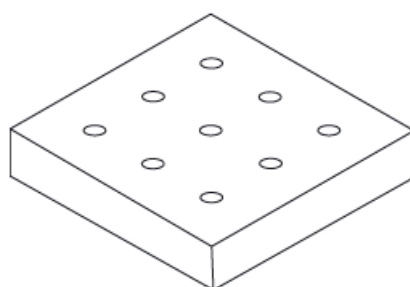
Rezonátor určený k absorpci vybraného kmitočtu. Pohlcovaný kmitočet závisí na nalažení otvorů rezonátoru. Tvořeno dřevotřískou, sololitem, vatelínem a minerální vlnou.

Výrobce: Soning

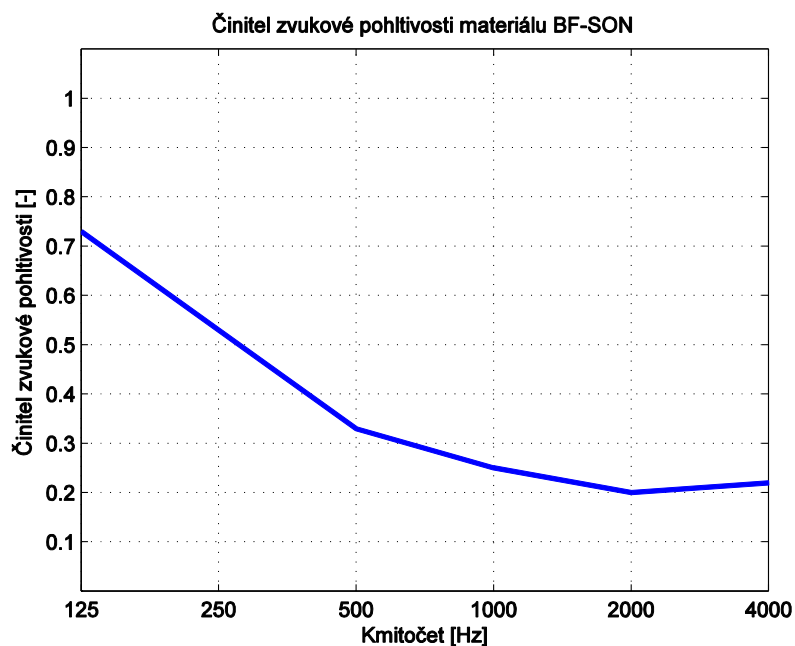
Hmotnost uváděná výrobcem:

Tloušťka obkladu: 200 mm

Průměrný koeficient akustické pohltivosti: $\alpha_s = 0,37$



Obrázek 26 – Náčrt rezonátoru BF-SON, převzato z [7]



Obrázek 27 - Průběh činitele zvukové pohltivosti materiálu BF-SON

Akustik & Raum AG

Činitelé zvukové pohltivosti stanoveny na základě výsledků zkoušek v souladu s EN ISO 354.

Linea

Obklad tvořený jádrem ze dřeva s dutinami. Lícová strana je tvořena povrchově upravenou dýhou s drážkami. Na rubové straně je netkaná textilie. Tento obklad pracuje jako rezonátor, který využívá k pohlcení zvuku na nízkých a středních kmitočtech rezonance v dutinách. Textilie na zadní straně slouží k pohlcení vyšších kmitočtů. Při instalaci obkladu s odstupem od zdi lze zvýšit jeho účinnost na nízkých kmitočtech, viz obrázek 29 a 30.

Výrobce: Akustik & Raum AG

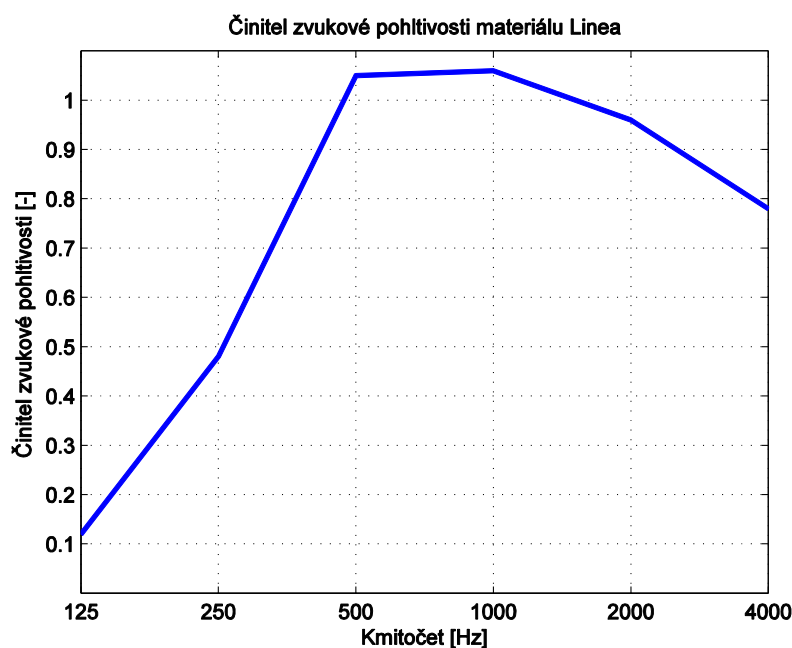
Hmotnost uváděná výrobcem: neuvedeno

Tloušťka obkladu: 46 mm

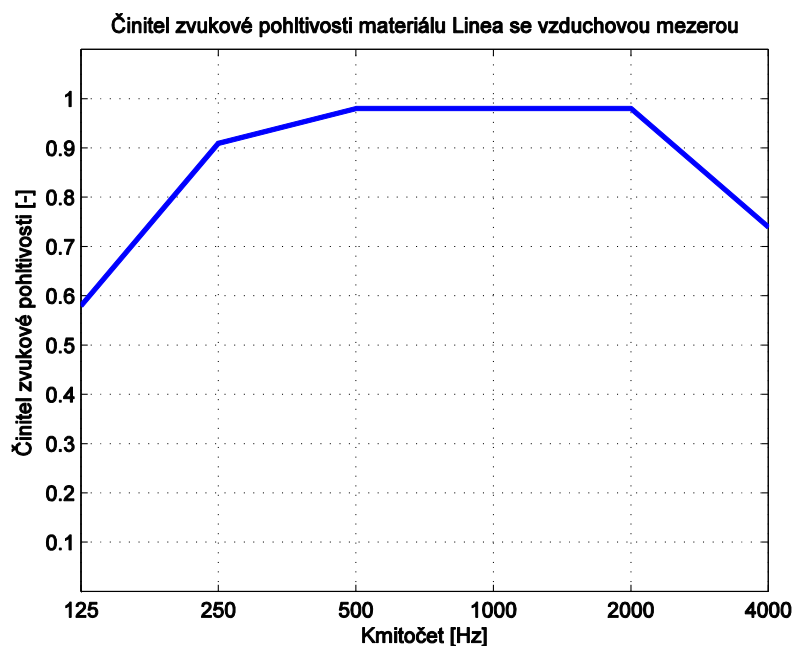
Průměrný koeficient akustické pohltivosti: $\alpha_s = 0,74$



Obrázek 28 – Náčres materiálu Linea, převzato z [12]



Obrázek 29 - Průběh činitele zvukové pohltivosti materiálu Linea ve verzi 6/2.0-1 bez vzduchové mezery mezi obkladem a stěnou



Obrázek 30 - Průběh činitele zvukové pohltivosti materiálu Linea ve verzi 6/2.0-1 se vzduchovou mezerou 170 mm mezi obkladem a stěnou

4.2.4 Difuzory

Jiným typem akusticky aktivních prvků jsou difuzory. Ty jsou konstruovány tak, aby dopadající energii neutlumily, ale naopak rozptýlily všemi směry v prostoru, vytvořily tak difuzní pole (viz kapitola 2.3) a tím snížily vliv rezonančních kmitočtů v místnosti. Vytvoření tohoto zvukového pole je jednou z podmínek pro příjemný poslech hudby.

K rozptýlení zvuku dochází pomocí mnoha akustických prvků s různými velikostmi tak, aby byl celkový povrch difuzoru co nejčlenitější. Zároveň je vždy snaha o to, aby použité materiály

nevykazovaly příliš pohltivé vlastnosti, a tak mohla být většina energie odražena do prostoru. Všechny vlny s vlnovou délkou menší než jednotlivé prvky difuzoru jsou pak náhodně odraženy do prostoru.

Difuzory se liší v typu konstrukce, a tím i v kmitočtovém rozmezí, ve kterém pracují. Nejčastěji používané jsou pravděpodobně 1D QRD a 2D QRD difuzory (obrázek 31). Vždy je nutné difuzor navrhovat podle konkrétní místnosti tak, aby pracoval v daném prostoru co nejlépe.



Obrázek 31 – Příklad QRD difuzoru, převzato z [13]

V následující části jsou popsány zadané místnosti, u kterých jsou následně vyhodnoceny jejich teoretické i prakticky změřené parametry. Na základě těchto parametrů byly vytvořeny jednotlivé návrhy úprav pro zlepšení akustiky prostorů.

5 Měřené místnosti a požadavky na jejich akustické parametry

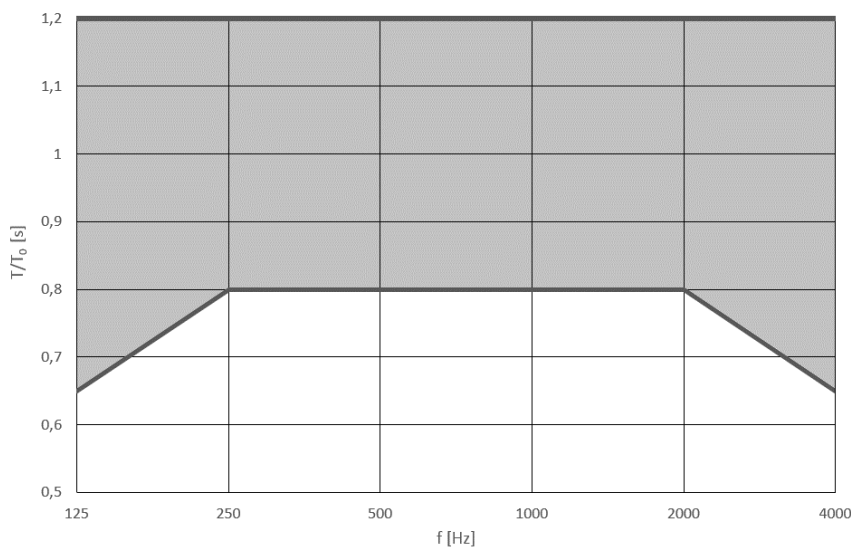
Měřené místnosti číslo 364, 202a a 205 se nacházejí v budově ČVUT, ulice Technická, Praha. Tyto místnosti slouží jako učebny a posluchárny pro menší počet lidí (cca 30). Základním problémem všech 3 měřených místností je jejich velmi dlouhá doba dozvuku v důsledku nízkého koeficientu pohltivosti použitých materiálů. V místnostech jsou všechny stěny holé, což vede k minimálnímu pohlcování zvuků. Dlouhá doba dozvuku nejenomže zhoršuje srozumitelnost pro posluchače, ale zároveň zvyšuje nároky na přednášejícího, který musí neustále „překřikovat sám sebe“. Toto vede ke snížené schopnosti koncentrace, zvýšení stresu a únavy.

Zkoumané učebny nejsou koncipovány jako multimediální, nevzniká tedy žádný požadavek na zlepšení kvality poslechu hudby nebo neprůzvučnosti. Primárním cílem pro úpravu akustiky těchto místností by měla být zlepšená srozumitelnost mluveného slova. Nejdůležitější část frekvenčního spektra pro srozumitelnost leží přibližně mezi 500 Hz a 3,5 kHz. V této části spektra by tak doba dozvuku měla být celkově nízká a alespoň mírně vyrovnaná – aby nedocházelo ke zvýraznění jen určitého typu slov či slabik (sykavky a podobně).

Místnost, která slouží jako učebna či posluchárna o objemu do 250 m³ má podle [14] optimální dobu dozvuku 0,7 s. Dále by dle [4] měl index STI pro učebnu dosahovat hodnoty minimálně 0,62.

Optimální doba dozvuku místnosti by měla být přesně dodržena, a to ve všech zkoumaných oktávových pásmech. To je reálně velmi obtížné, a proto [15] specifikuje přípustný poměr

skutečné a optimální doby dozvuku T/T_0 pro měřené oktávové pásmo od 125 Hz do 4 kHz. Pro místnost určenou především pro řeč, je pak tento poměr specifikován dle obrázku 32.



Obrázek 32 – Stanovení poměru T/T_0 pro učebny do objemu 250 m^3 podle [15]

6 Teoretické parametry měřených místností

6.1 Místnost 364

V místnosti jsou dvě třídílná okna (obrázek 36 vpravo), tabule (obrázek 36 dole) a na stropě ve směru od dveří k oknu nosníky. Stěny jsou holé, na podlaze je položeno linoleum.

6.1.1 Rozměry místnosti a plochy jednotlivých materiálů

	délka	šířka	výška
rozměry místnosti (m)	7,16	4,83	3,40
objem místnosti (m^3)	117,58		

Tabulka 2 – Rozměry místnosti

plocha materiálů (m^2)	
linoleum	34,583
tabule	4,800
okno	9,680
zeď	99,435
dveře	2,200
celkem	150,698

Tabulka 3 – Plocha materiálů

6.1.2 Činitel zvukové pohltivosti materiálů

V tabulce 4 jsou uvedeny jednotliví činitelé zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci a celkový činitel zvukové pohltivosti v závislosti na ploše daného materiálu. Čerpáno z [16] a [17].

materiál	frekvence (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
	činitel zvukové pohltivosti (-)					
linoleum	0,02	0,025	0,03	0,035	0,04	0,04
tabule	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
okno	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04
zeď	0,01	0,05	0,06	0,065	0,075	0,08
dveře	0,15	0,11	0,09	0,07	0,06	0,06
celkový činitel pohltivosti (-)	0,0340	0,0551	0,0584	0,0589	0,0638	0,0652

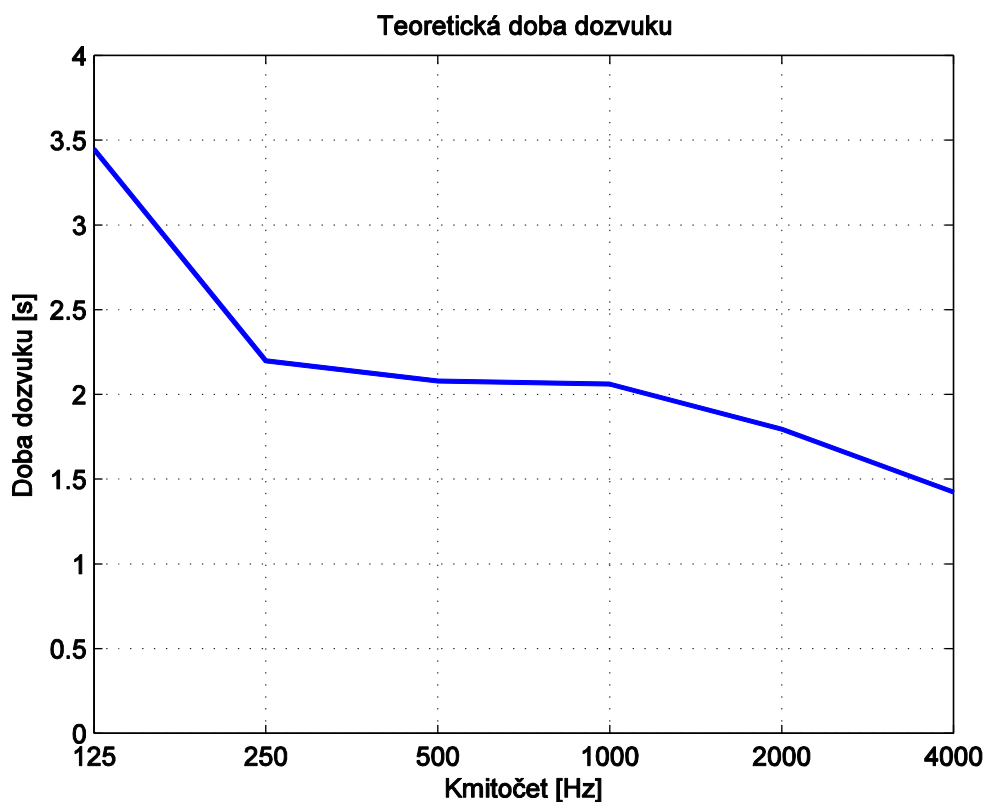
Tabulka 4 – Činitele pohltivosti materiálů

6.1.3 Teoretická doba dozvuku

Doba dozvuku byla vypočtena podle Sabinova vzorce (4), který je vhodný pro $\alpha < 0,2$. Do výpočtu byl také zahrnut člen $4mV$, který vyjadřuje vliv útlumu zvuku při šíření v prostředí.

frekvence (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
doba dozvuku (s)	3,448	2,198	2,081	2,062	1,795	1,425
průměrná doba dozvuku (s)			2,168			

Tabulka 5 – Teoretická doba dozvuku



Obrázek 33 – Graf vypočtené doby dozvuku pro místnost 364

6.1.4 Schroederův kmitočet

Kritický (Schroederův) kmitočet místnosti 364, od kterého již začíná být akustické pole vyrovnané, byl stanoven podle (2) na 271 Hz.

6.2 Místnost 202a

V místnosti (Obrázek 39) je proti dveřím jedno normální a jedno dvoudílné okno, mezi okny se nachází sloup. Na protější stěně se nachází téměř po celé délce stěny pás menších oken s průsvitnými skly, vedoucí do chodby. Stěna proti přednášejícímu je holá, stejně tak strop. Na podlaze je položené linoleum.

6.2.1 Rozměry místnosti a plochy jednotlivých materiálů

	délka	šířka	výška
rozměry místnosti (m)	7,40	5,40	3,30
objem místnosti (m ³)	131,868		

Tabulka 6 – Rozměry místnosti

plocha materiálů (m ²)	
linoleum	39,96
tabule	4,92
okna	13,068
pás oken	4,12
zeď	100,645
dveře	1,70
celkem	164,4

Tabulka 7 – Plocha materiálů

6.2.2 Činitelé zvukové pohltivosti materiálů

V tabulce jsou uvedeny jednotliví činitelé zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci a celkový činitel zvukové pohltivosti v závislosti na ploše daného materiálu. Čerpáno z [16] a [17].

materiál	frekvence (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
	činitel zvukové pohltivosti (-)					
linoleum	0,02	0,025	0,03	0,035	0,04	0,04
tabule	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
okno	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04
zeď	0,01	0,05	0,06	0,065	0,075	0,08
dveře	0,15	0,11	0,09	0,07	0,06	0,06
celkový činitel pohltivosti (-)	0,0547	0,0673	0,0658	0,0627	0,0640	0,0633

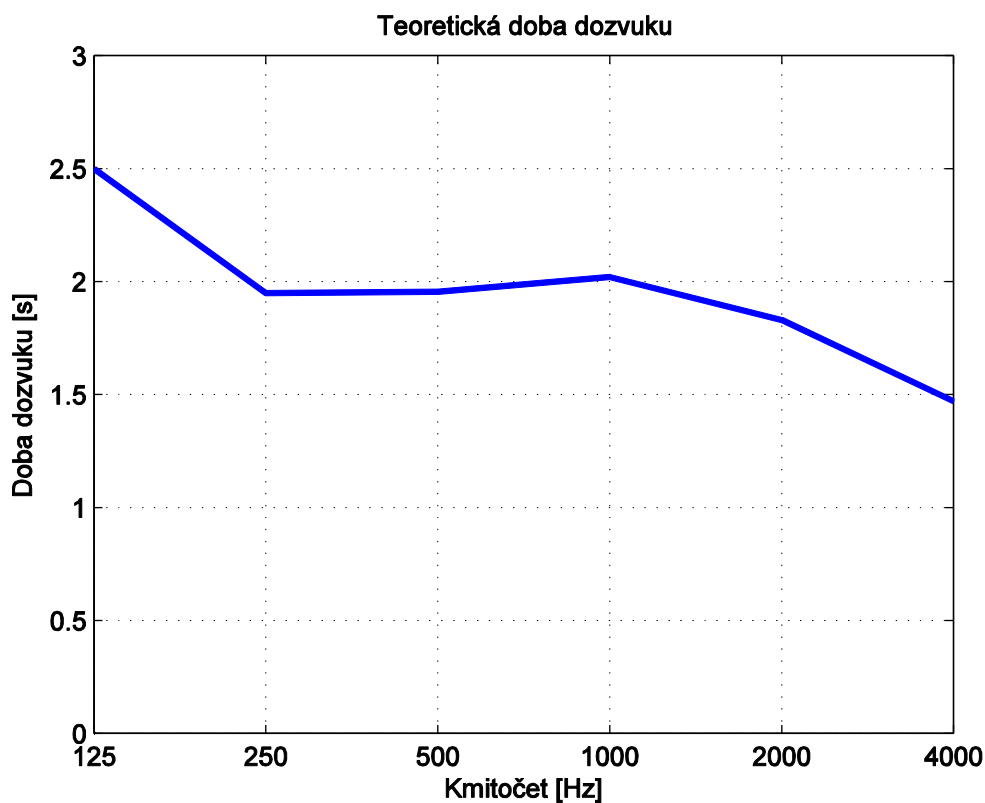
Tabulka 9 – Činitele pohltivosti materiálů

6.2.3 Teoretická doba dozvuku

Doba dozvuku byla vypočtena podle Sabinova vzorce (4), který je vhodný pro $\alpha < 0,2$. Do výpočtu byl také zahrnut člen $4mV$, který vyjadřuje vliv útlumu zvuku při šíření v prostředí.

frekvence (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
doba dozvuku (s)	2,500	1,950	1,955	2,022	1,830	1,471
průměrná doba dozvuku (s)	1,955					

Tabulka 9 – Teoretická doba dozvuku



Obrázek 34 – Graf vypočtené doby dozvuku pro místnost 202a

6.2.4 Schroederův kmitočet

Kritický (Schroederův) kmitočet místnosti 202a, od kterého již začíná být akustické pole vyrovnané, byl stanoven podle (2) na 243 Hz.

6.3 Místnost 205

V místnosti (obrázek 42) jsou proti dveřím dvě dvoudílná okna rozdělená sloupem. Na protější stěně se nachází po celé délce stěny pás menších oken s průsvitnými skly, vedoucí do chodby. Stěna proti přednášejícímu je holá, stejně tak strop. Na podlaze je položeno linoleum.

6.3.1 Rozměry místnosti a plochy jednotlivých materiálů

	délka	šířka	výška
rozměry místnosti (m)	9,40	5,40	3,30
objem místnosti (m ³)	167,51		

Tabulka 10 – Rozměry místnosti

plocha materiálů (m ²)	
linoleum	50,76
tabule	4,92
okna	17,424
pás oken	6,592
zeď	117,817
dveře	1,70
celkem	199,2

Tabulka 11 – Plocha materiálů

6.3.2 Činitelé zvukové pohltivosti materiálů

V tabulce jsou uvedeny jednotliví činitelé zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci a celkový činitel zvukové pohltivosti v závislosti na ploše daného materiálu. Čerpáno z [16] a [17].

materiál	frekvence (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
	činitel zvukové pohltivosti (-)					
linoleum	0,02	0,025	0,03	0,035	0,04	0,04
tabule	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
okno	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04
zeď	0,01	0,05	0,06	0,065	0,075	0,08
dveře	0,15	0,11	0,09	0,07	0,06	0,06
celkový činitel pohltivosti (-)	0,0547	0,0673	0,0658	0,0627	0,0640	0,0633

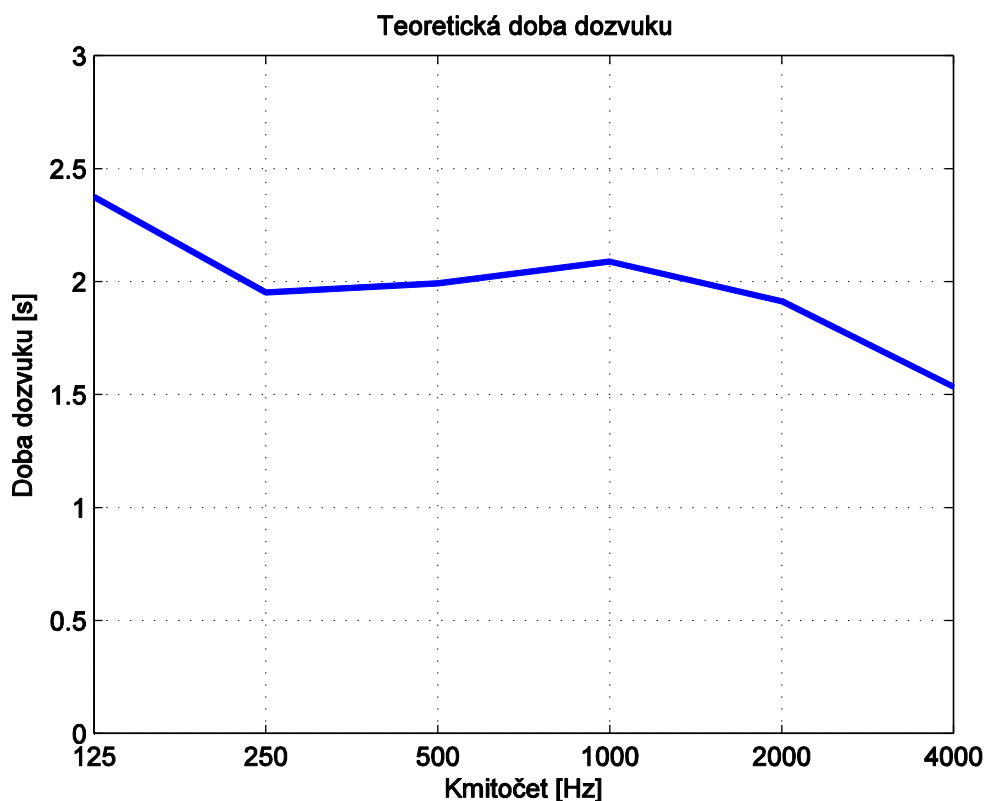
Tabulka 12 – Činitele pohltivosti materiálů

6.3.3 Teoretická doba dozvuku

Doba dozvuku byla vypočtena podle Sabinova vzorce (4), který je vhodný pro $\alpha < 0,2$. Do výpočtu byl také zahrnut člen $4mV$, který vyjadřuje vliv útlumu zvuku při šíření v prostředí.

frekvence (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
doba dozvuku (s)	2,374	1,953	1,993	2,988	1,914	1,534
Průměrná doba dozvuku (s)	1,976					

Tabulka 13 – Teoretická doba dozvuku



Obrázek 35 – Graf vypočtené doby dozvuku pro místnost 205

6.3.4 Schroederův kmitočet

Kritický (Schroederův) kmitočet místnosti 205, od kterého již začíná být akustické pole vyrovnané, byl stanoven podle (2) na 217 Hz.

7 Změřené akustické parametry místností

Vzhledem k tomu, že z místností byl vyklizen nábytek, a tedy nebyl přítomný další materiál, který by nebyl uvažovaný při výpočtech, je pravděpodobné, že se teoreticky vypočtená doba dozvuku bude blížit té naměřené. Největší odchylku mezi změřenými a vypočtenými hodnotami tak pravděpodobně zapříčinil rozdíl mezi reálnými činiteli zvukové pohltivosti materiálů v místnosti a těmi teoretickými použitými pro výpočet.

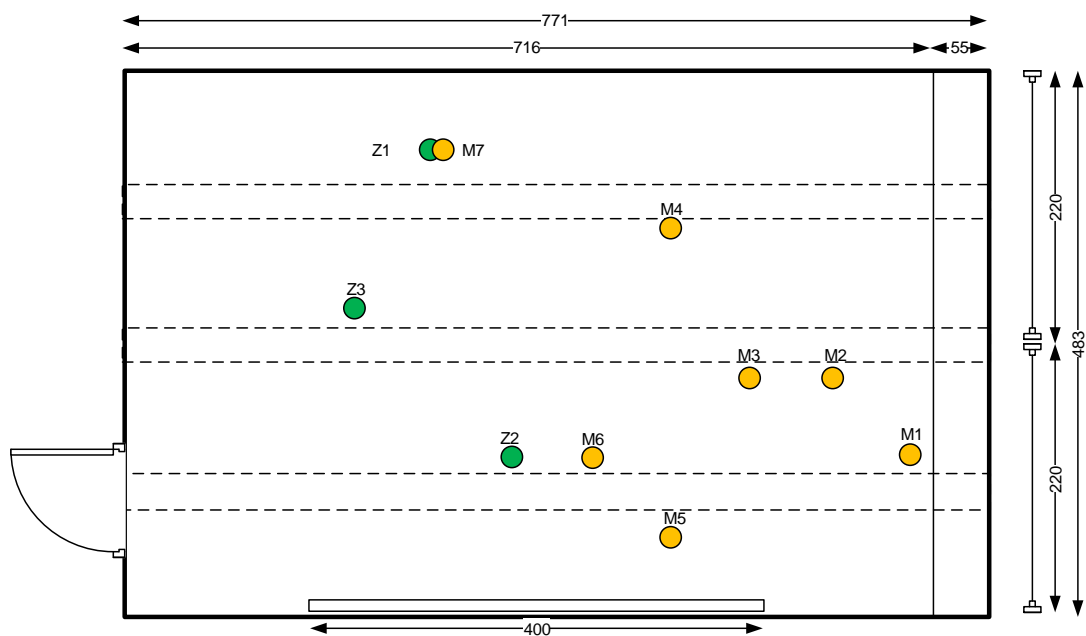
Doba dozvuku byla měřena prostřednictvím programu EASERA, který pomocí generovaného signálu MLS (kapitola 4.2.2) změřil impulzní odezvu prostoru a z ní určil dobu dozvuku i ostatní udávané parametry. V každé místnosti proběhlo několik měření pro různé vzájemné polohy měřícího mikrofону a zdroje s ohledem na to, kde se v místnosti bude pravděpodobně

pohybovat přednášející a kde jsou místa pro studenty. Na půdorysech (místnost 364 - obrázek 36, místnost 202a - obrázek 39, místnost 205 - obrázek 42) jsou poznamenány jednotlivé měřicí body pro vzájemné polohy zdroje a mikrofonu (dále uváděno jako M – poloha mikrofonu a Z – poloha zdroje). Pro měření byl použit mikrofon Earthworks M30, s citlivostí na 1 kHz 33mV/Pa při 22°C a vlhkosti 36%.

Níže jsou uvedeny naměřené doby dozvuku T_{30} , EDT a parametr STI popisující srozumitelnost. Naměřené doby dozvuku T_{30} jsou vyneseny do grafů přes oktávnové pásmo od 125 Hz do 4000 Hz. Pro každou místnost jsou v této kapitole uvedena vždy dvě měření, ostatní se nacházejí v příloze.

7.1 Místnost 364

364



Obrázek 36 – Půdorys místnosti s poznamenanými měřicími body

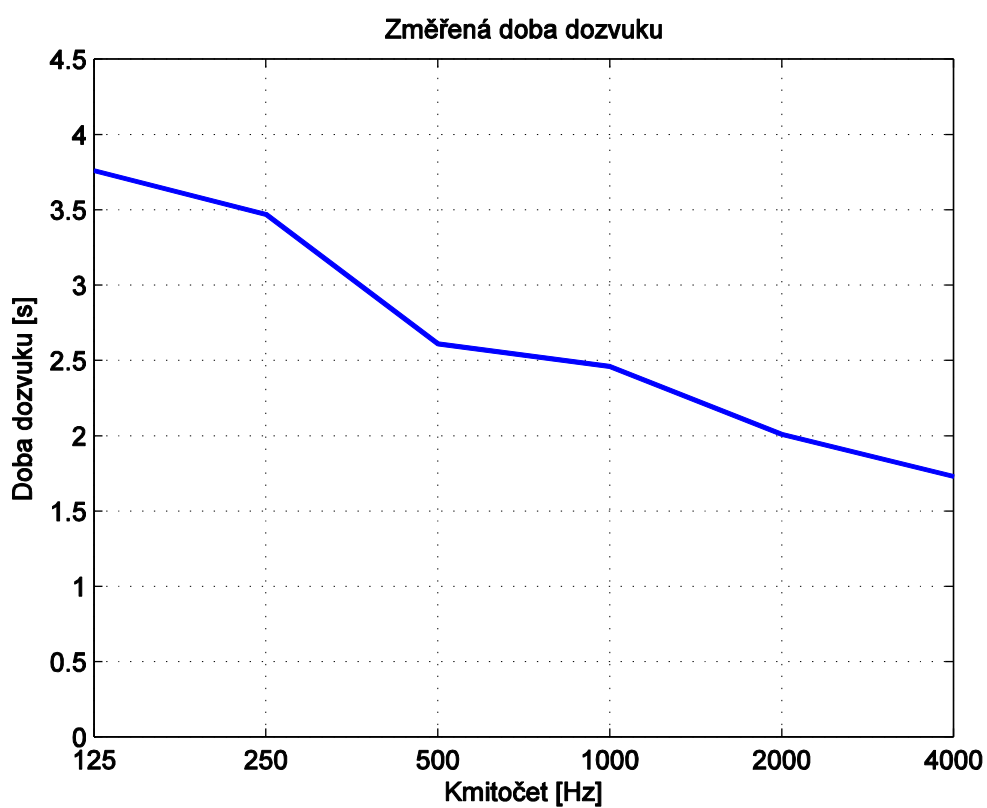
7.1.1 Měření 1 – M 1, Z 1

frekvence (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
EDT (s)	2,62	2,7	2,87	2,34	2,02	1,78
T ₃₀ (s)	3,76	3,47	2,61	2,46	2,01	1,73

Tabulka 14 – Naměřené EDT a T₃₀

STI (celkově)	0,443
STI (mužský hlas)	0,434
STI (ženský hlas)	0,443

Tabulka 15 – Naměřené STI



Obrázek 37 – Graf Naměřené doby dozvuku pro polohu M 1, Z 1

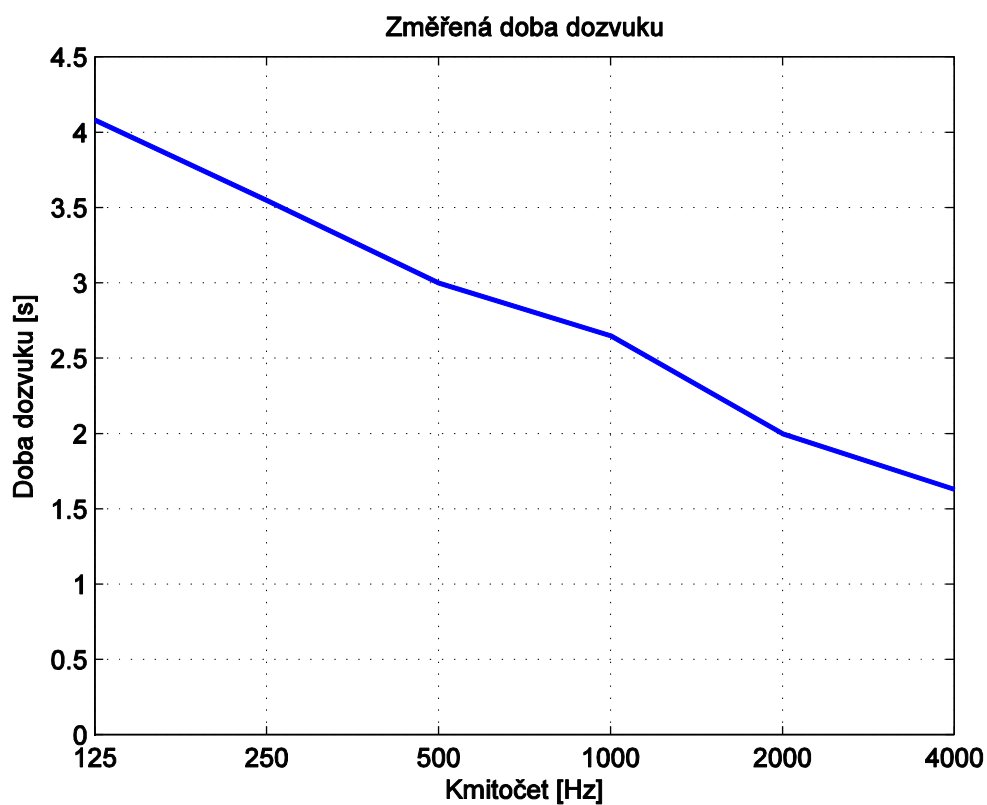
7.1.2 Měření 2 – M 3, Z 3

frekvence (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
EDT (s)	3,99	3,16	2,83	2,26	2,02	1,72
T ₃₀ (s)	4,08	3,55	3	2,65	2	1,63

Tabulka 16 – Naměřené EDT a T₃₀

STI (celkově)	0,439
STI (mužský hlas)	0,443
STI (ženský hlas)	0,455

Tabulka 17 – Naměřené STI



Obrázek 38 – Graf Naměřené doby dozvuku pro polohu M 3, Z 3

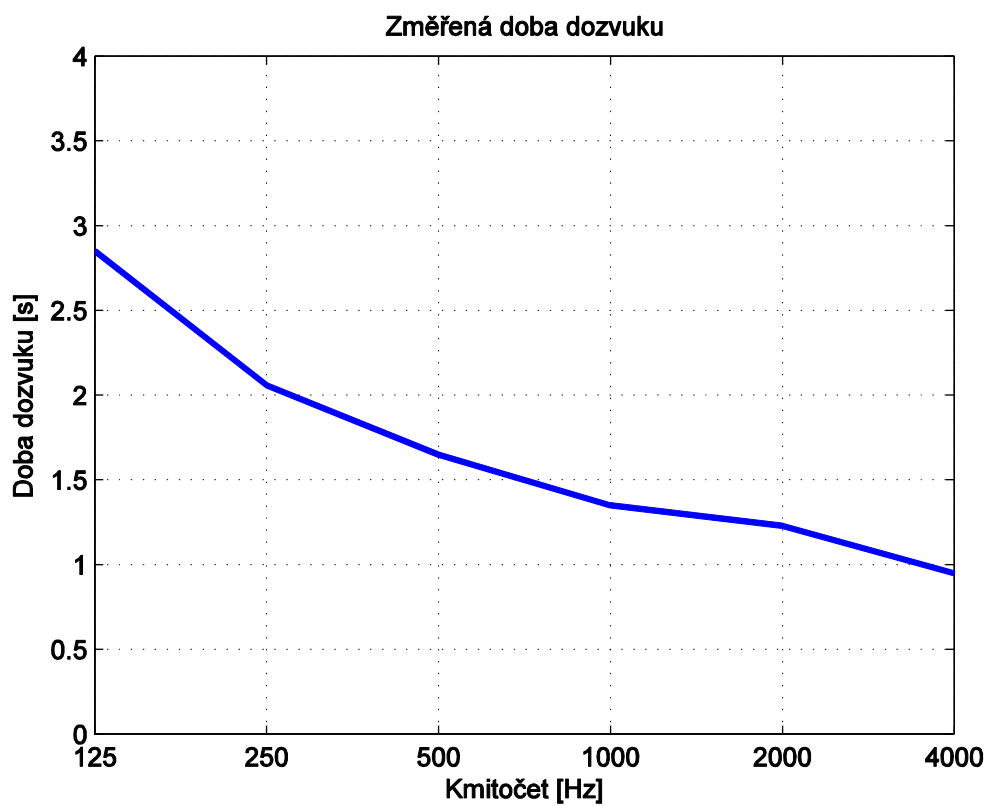
7.2.1 Měření 1 – M 2, Z 1

frekvence (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
EDT (s)	2,2	1,93	1,75	1,3	1,23	0,92
T_{30} (s)	2,85	2,06	1,65	1,35	1,23	0,95

Tabulka 18 – Naměřené EDT a T_{30}

STI (celkově)	0,551
STI (mužský hlas)	0,57
STI (ženský hlas)	0,582

Tabulka 19 – Naměřené STI



Obrázek 40 – Graf Naměřené doby dozvuku pro polohu M 2, Z 1

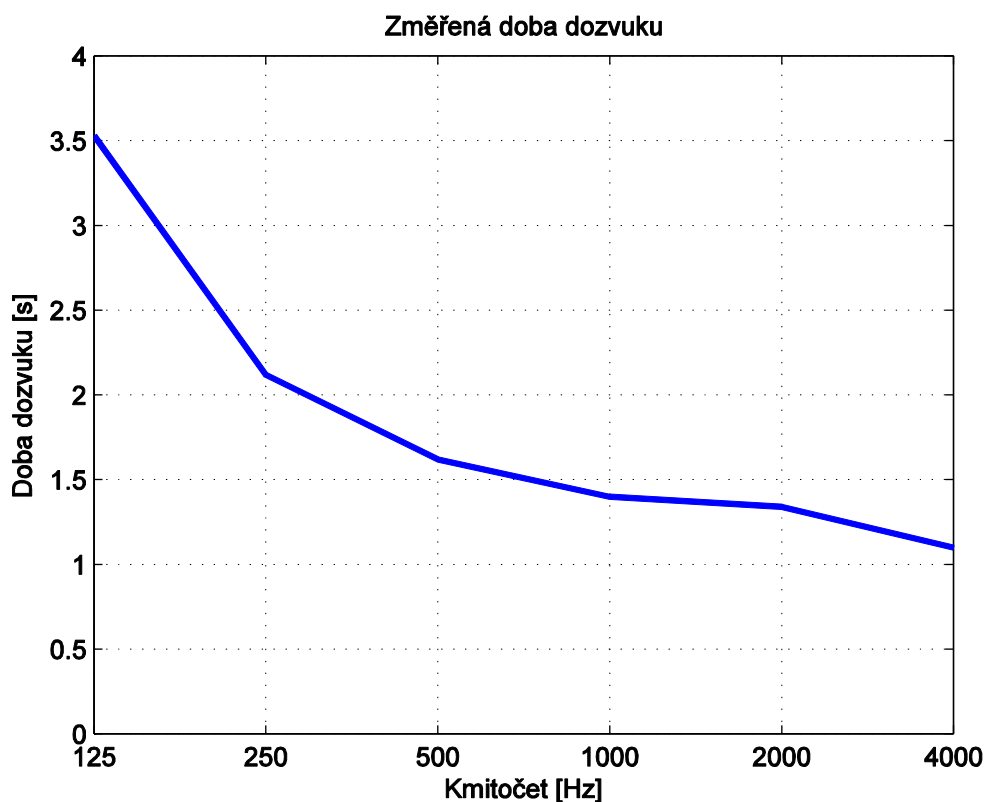
7.2.2 Měření 2 – M 1, Z 2

frekvence (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
EDT (s)	2,33	2,28	1,52	1,34	1,27	1,03
T ₃₀ (s)	3,53	2,12	1,62	1,4	1,34	1,1

Tabulka 20 – Naměřené EDT a T₃₀

STI (celkově)	0,535
STI (mužský hlas)	0,548
STI (ženský hlas)	0,556

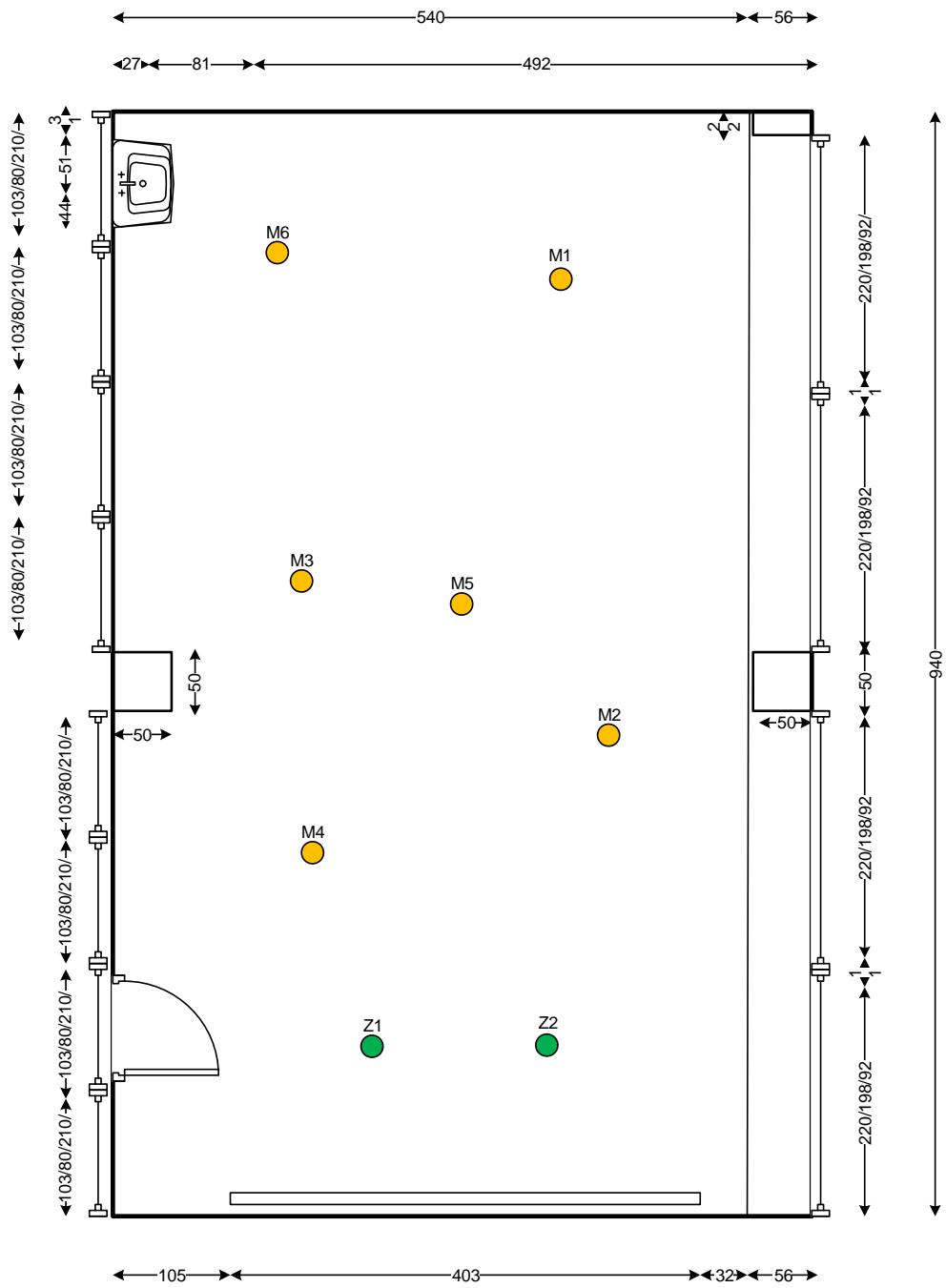
Tabulka 21 – Naměřené STI



Obrázek 41 – Graf Naměřené doby dozvuku pro polohu M 1, Z 2

7.3 Místnost 205

205



Obrázek 42 – Půdorys místnosti s poznamenanými měřicími body

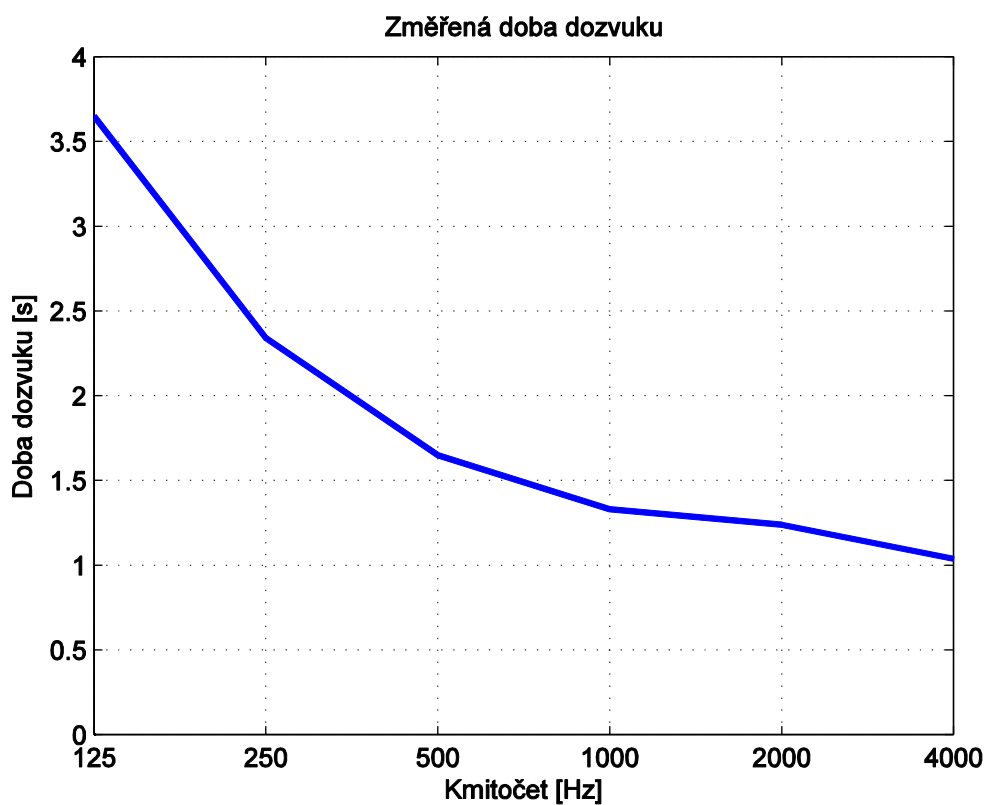
7.3.1 Měření 1 – M 2, Z 1

frekvence (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
EDT (s)	3	2,15	1,54	1,34	1,24	1,09
T ₃₀ (s)	3,65	2,34	1,65	1,33	1,24	1,04

Tabulka 22 – Naměřené EDT a T₃₀

STI (celkově)	0,531
STI (mužský hlas)	0,54
STI (ženský hlas)	0,552

Tabulka 23 – Naměřené STI



Obrázek 43 – Graf Naměřené doby dozvuku pro polohu M 2, Z 1

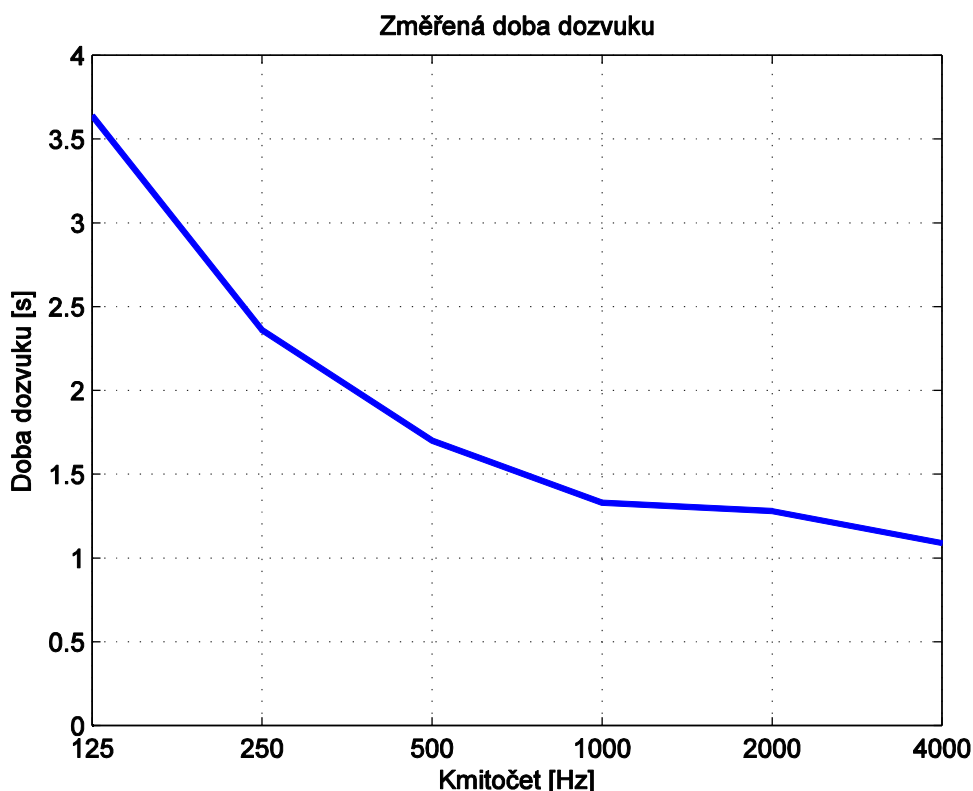
7.3.2 Měření 2 – M 6, Z 2

frekvence (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
EDT (s)	2,77	1,92	1,76	1,33	1,25	1,02
T ₃₀ (s)	3,64	2,36	1,7	1,33	1,28	1,09

Tabulka 24 – Naměřené EDT a T₃₀

STI (celkově)	0,531
STI (mužský hlas)	0,546
STI (ženský hlas)	0,562

Tabulka 25 – Naměřené STI



Obrázek 44 – Graf Naměřené doby dozvuku pro polohu M 6, Z 2

Z naměřených hodnot ve všech místnostech je patrné, že celková hodnota doby dozvuku v některých kmitočtových pásmech až několikanásobně převyšuje hodnoty stanovené normou, a to zejména na nízkých kmitočtech. Je nutné brát v potaz, že při zaplnění učeben doba dozvuku na středních a vyšších kmitočtech ještě klesne a tedy s ní nebude takový problém. Pro porovnání byla pro místnost 202a vypočtena teoretická pohltivost patnácti osob. V tabulce 26 je pak porovnání doby dozvuku pro prázdnou místnost a pro místnost s lidmi. Je patrné, že přítomnost žáků ve třídě bude mít na celkovou akustiku prostoru veliký vliv.

frekvence (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	Průměr
doba dozvuku prázdná (s)	2,500	1,950	1,955	2,022	1,830	1,471	1,955
doba dozvuku - plná (s)	1,605	1,120	0,722	0,526	0,527	0,479	0,830

Tabulka 26 – Porovnání vypočtené doby dozvuku pro prázdnou místnost a pro místnost s patnácti studenty

Nejdelší doba dozvuku je v kmitočtovém pásmu 125 Hz. Velkým problémem je však především dlouhá doba dozvuku na mezi 250 a 500 Hz. Tyto kmitočty lze již považovat za začátek přibližného frekvenčního rozsahu řečového signálu. Výrazně nevyrovnaná a dlouhá doba dozvuku, zvláště na nízkých kmitočtech, je patrná již z teoretických výpočtů v kapitole 6. Je to dáno tím, že na těchto kmitočtech se většina běžně používaných materiálů chová jako velmi dobrý reflektor dopadajícího zvuku, k tomu je navíc nutné myslet také na to, že na nízkých kmitočtech dochází rovněž k menším ztrátám energie vlivem šíření zvuku prostorem. Posledním důležitým aspektem, který je patrný jednak z teoretických výpočtů, ale i z měření, je spojení mezi dobou dozvuku a Schroederovým kmitočtem, který nám říká, od jakého kmitočtu bude zvukové pole v místnosti již vyrovnané. Schroederův kritický kmitočet je podle teoretických výpočtů ve všech místnostech nad 200 Hz, podle naměřených hodnot dokonce kolem 300 Hz, což značí, že do poměrně vysokých kmitočtů mají na akustické pole vliv jednotlivé módy místnosti, kvůli kterým vzniká nevyrovnané akustické pole, a tedy velmi rozdílné zvukové podmínky v jednotlivých místech prostoru. Tyto naměřené podmínky se nakonec výrazně podepisují na špatné hodnotě indexu STI (mezi 0,53 až 0,43), což podle tabulky odpovídá hodnocení dostatečně až špatně. Subjektivně je však třeba říci, že především v místnosti 364 byla srozumitelnost opravdu velmi špatná.

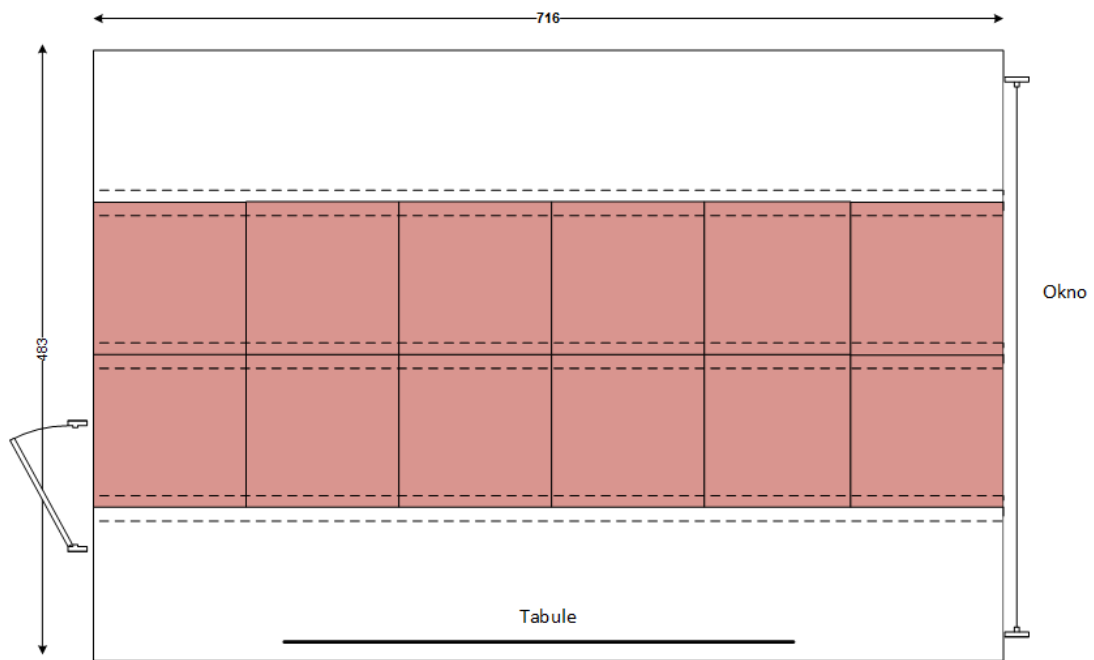
8 Návrh akustických úprav místností

Na základě změřených akustických parametrů místností byly vytvořeny návrhy nutných úprav pro splnění stanovené normy na dobu dozvuku pro přednáškové místnosti (viz kapitola 5). Vytvořené návrhy jsou založené na porovnání vlastností akustických prvků uvedených v kapitole 4 a zároveň je u každé z místností zvolen rozdílný přístup k řešení, aby nebyla řešení stejná s jedním nejlépe pohltivým materiálem. Dalším kritériem byla estetická stránka úprav, protože ne všechny uvedené materiály se vzhledově hodí do přednáškových místností s čistě bílými stěnami, kde mimo lavic a židlí není žádný další nábytek. Při návrhu naopak nebyla brána v potaz přesná cena akustických prvků, protože žádný z výrobců v běžně dostupných materiálech cenu neuvádí.

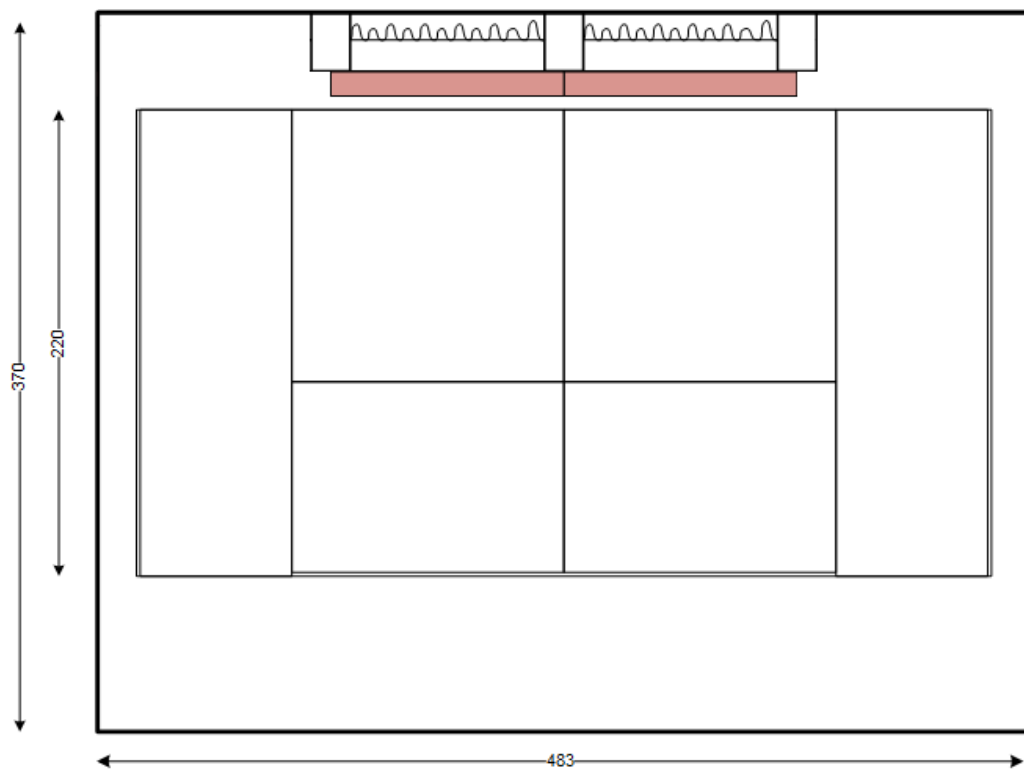
8.1 Místnost 364

8.1.1 Popis návrhu

V místnosti 364 byly změřené hodnoty doby dozvuku i srozumitelnosti nejhorší, proto byl pro tuto místnost zvolen jako hlavní materiál Ecophon Focus. Focus je pohltivý porézni materiál, tvořený skelnými vlákny, určený pro konstrukci akustického podhledu. Má velmi dobrý činitel pohltivosti na středních a vyšších měřených kmitočtech, a rovněž je poměrně účinný v kmitočtech nízkých. Toho je možné dosáhnout především pomocí odsazení akustického podhledu o pár centimetrů od stropu. K tomu dobře poslouží stropní nosníky, se kterými je možné podhled zarovnat, a zároveň příliš opticky neubrat na velikosti celého prostoru. Ve vzniklé mezeře mezi stropem a podhledem je navíc umístěna 40 mm silná deska materiálu Rockwool Airrock HD pro celkové zlepšení tlumících vlastností podhledu. S tímto doplněním by měla doba dozvuku ve všech zkoumaných frekvenčních pásmech splňovat normu. Použití pohltivého materiálu na strop je poměrně jednoduchý způsob, jak zlepšit akustiku místnosti, protože právě strop je z pravidla největší rovnou nijak akusticky neošetřenou plochou. Podhled tvoří dva pruhy o celkové šířce 240 cm a je umístěn uprostřed stropu, nad místem kde je předpokládán nejčastější výskyt zdroje zvuku – přednášejícího (obrázek 45 a 46).



Obrázek 45 – Půdorys akustických úprav místnosti 364. Červeně akustický pohled, přerušovanou čarou stropní nosník, ke kterým je pohled uchycen

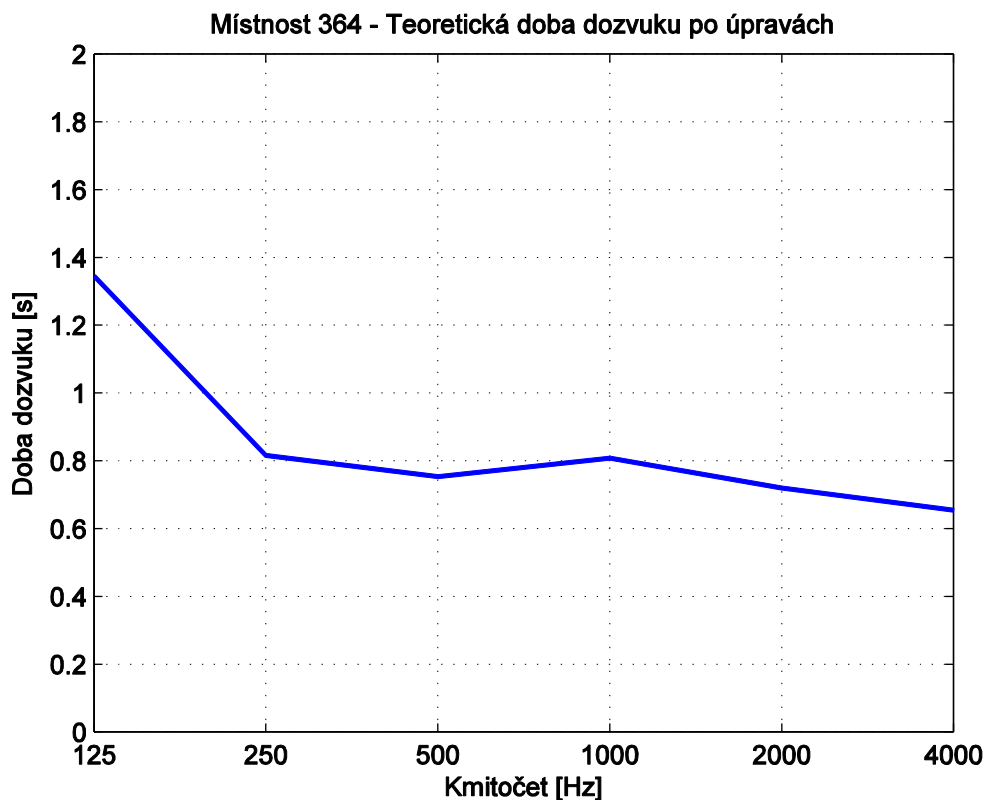


Obrázek 46 – Pohled směrem k oknu, červeně akustický pohled, nad ním vlnkovaně obložení materiálem Rockwool Airrock HD

8.1.2 Teoretické parametry místnosti po úpravě

frekvence (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
celkový činitel pohltivosti (-)	0,092	0,154	0,167	0,155	0,170	0,171
doba dozvuku (s)	1,345	0,816	0,753	0,808	0,720	0,654
průměrná doba dozvuku (s)	0,849					

Tabulka 27 – Teoretické parametry místnosti po úpravě



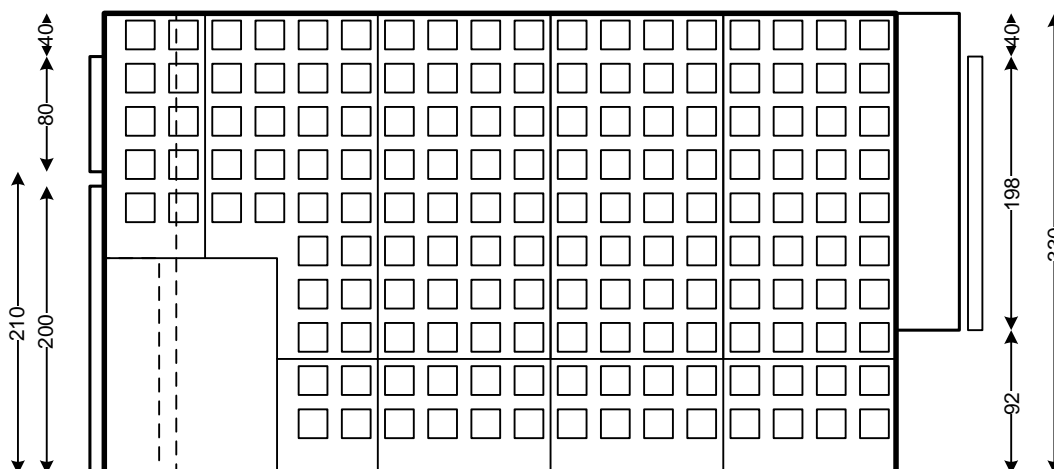
Obrázek 47 – Teoretická doba dozvuku místnosti 364 po úpravách

8.2 Místnost 202a

8.2.1 Popis návrhu

Místnost 202a je poměrně malá a rozměry jejích stěn nejsou celočíselně soudělná, tedy by nemělo docházet k výraznému zesilování některých módů místnosti. Na druhou stranu, stále se jedná o prostor, ve kterém není žádný pohltivý materiál, strop je rovný a na podlaze se nachází linoleum, které je v celém zkoumaném kmitočtovém pásmu velmi odrazivé (viz tabulka 8). Z toho důvodu byl na celou zadní stěnu, kromě kachličkové části s umyvadlem, přidán materiál D127 varianta 15/30 firmy Knauf. Tento akustický prvek primárně slouží jako podhledový materiál, ale je možné ho využít i pro upevnění na stěnu. D127 je děrovaná sádrokartonová deska, která funguje jako rezonátor a pracuje velmi dobře na nízkých kmitočtech. Zároveň se dodává s absorpční tkaninou na rubové straně a dle údajů výrobce při použití s dostatečnou vzduchovou mezerou funguje poměrně dobře i jako absorbér na vyšších frekvencích. V návrhu je obklad umístěn s 400 mm odstupem od stěny a s přidáním 200 mm silného pohltivého materiálu Rockwool Airrock HD. Výrobce udávané parametry jsou pro vzduchovou mezeru 400 mm, návrh sice počítá s menší, zároveň je však přidán další tlumivý materiál, který by měl akustické vlastnosti obkladu zlepšit.

202a

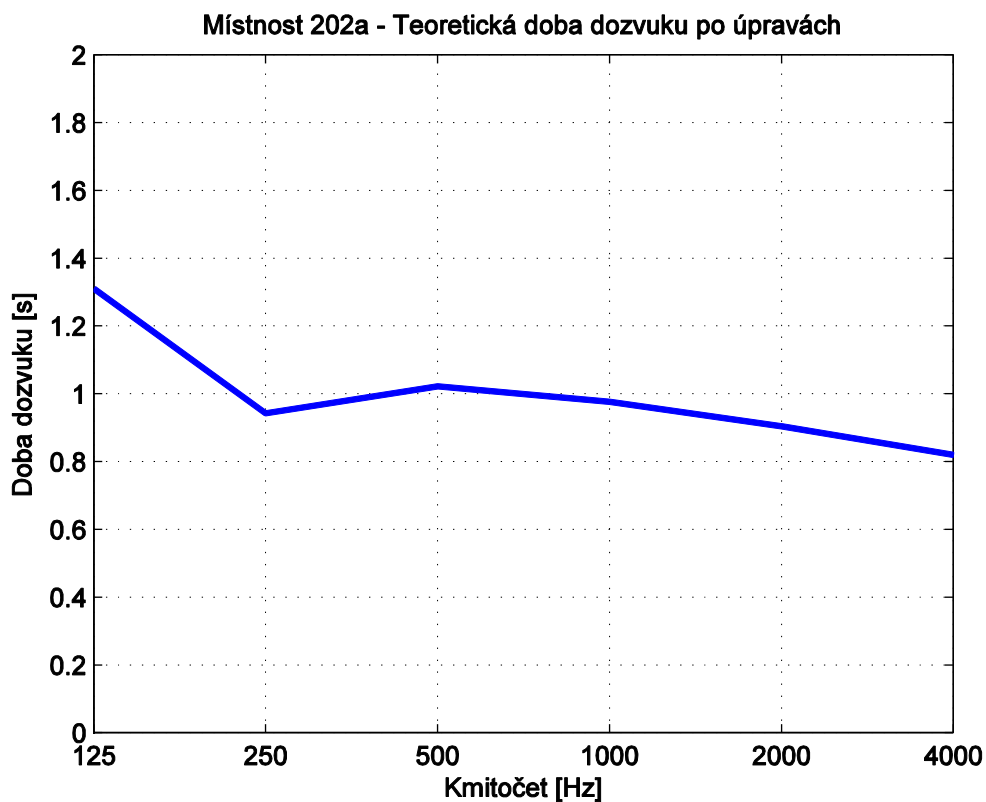


Obrázek 48 – Pohled na zadní stěnu místnosti 202a po akustických úpravách

8.2.2 Teoretické parametry místnosti po úpravě

frekvence (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
celkový číselník pohltivosti (-)	0,097	0,136	0,125	0,132	0,138	0,135
doba dozvuku (s)	1,311	0,943	1,022	0,976	0,904	0,819
průměrná doba dozvuku (s)	0,996					

Tabulka 28 – Teoretické parametry místnosti po úpravě



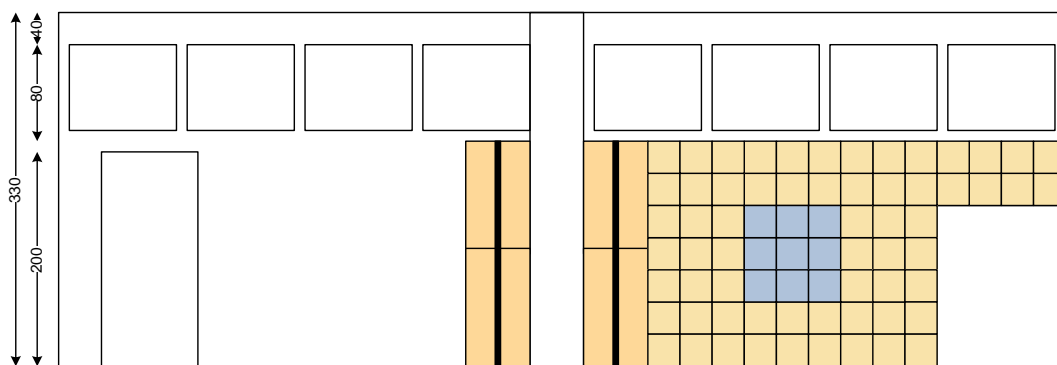
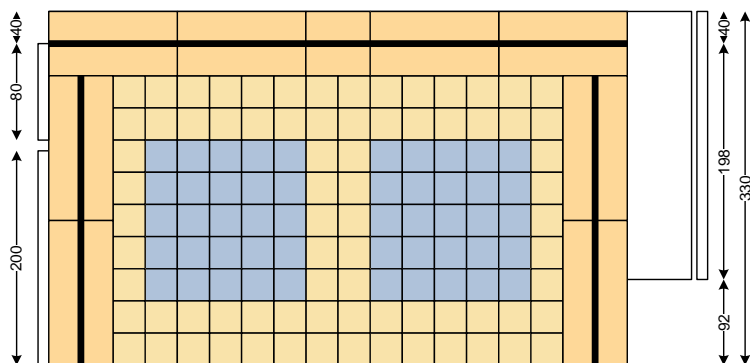
Obrázek 49 – Teoretická doba dozvuku místnosti 202a po úpravách

8.3 Místnost 205

8.3.1 Popis návrhu

Pro návrh akustických úprav místnosti 205 byl zvolen primárně materiál firmy Soning, a to Sonit D30. Jedná se o porézní materiál tvořený barevným pískem pojeným do dlaždic epoxidovou kompozicí. Dlaždice mají dutinu na rubové straně, která může být v případě potřeby dodatečně vyplněna tlumícím materiálem. Pro návrh bylo počítáno s vlastnostmi uvedenými v kapitole 4, které byly změřeny s odstupem obkladu od stěny 75 mm. V návrhu se počítá s odstupem od stěny 400 mm, to by mělo vytvořit dostatečnou vzduchovou mezeru, která zlepší akustické vlastnosti samotného materiálu a může být, podobně jako v návrhu místnosti 364, vyplněná dodatečným tlumícím materiálem, např. Rockwool. Obklad materiálem Sonit D30 tvoří téměř celou zadní stěnu, konkrétně 11,3 m². Zadní stěna byla pro obklad zvolena především proto, že je přímo naproti předpokládanému výskytu přednášejícího. Pohltivý materiál na této stěně by měl snížit množství přímo odražené energie zpět k posluchačům, a tak zlepšit srozumitelnost. Zároveň jeho tlumící vlastnosti sníží celkovou dobu dozvuku. Materiál Sonit byl navíc umístěn vlevo v zadní části prostoru za sloup, který místnost uprostřed nejdelší strany rozděluje. Tlumící materiál v tomto místě jednak sníží dobu dozvuku, a zároveň by měl zlepšit celkové akustické podmínky v zadní části místnosti, kde bez obkladu mohlo docházet k nepříjemným ozvěnám vlivem odrazů od holých stěn. Sonit bohužel nemá tak dobré pohltivé vlastnosti na nízkých kmitočtech. Vzhledem k tomu, že v neupravené místnosti byla doba dozvuku právě na nejnižších kmitočtech nejdelší, jsou do místnosti navíc přidány šterbinové rezonátory DR-SON, účinné především právě na nízkých kmitočtech. Rezonátory jsou umístěné po stranách a nad obkladem ze Sonitu na zadní stěně, kde dohromady zaujímají plochu přibližně 6 m². Dále se rezonátory také nacházejí na stěně okolo sloupu, zde zaujímají plochu 2,5 m². Z estetického hlediska by bylo nejlepší rezonátory upravit, případně vyrobit jiné tak, aby mohli být umístěny šikmo mezi sloup a přiléhající zeď.

205

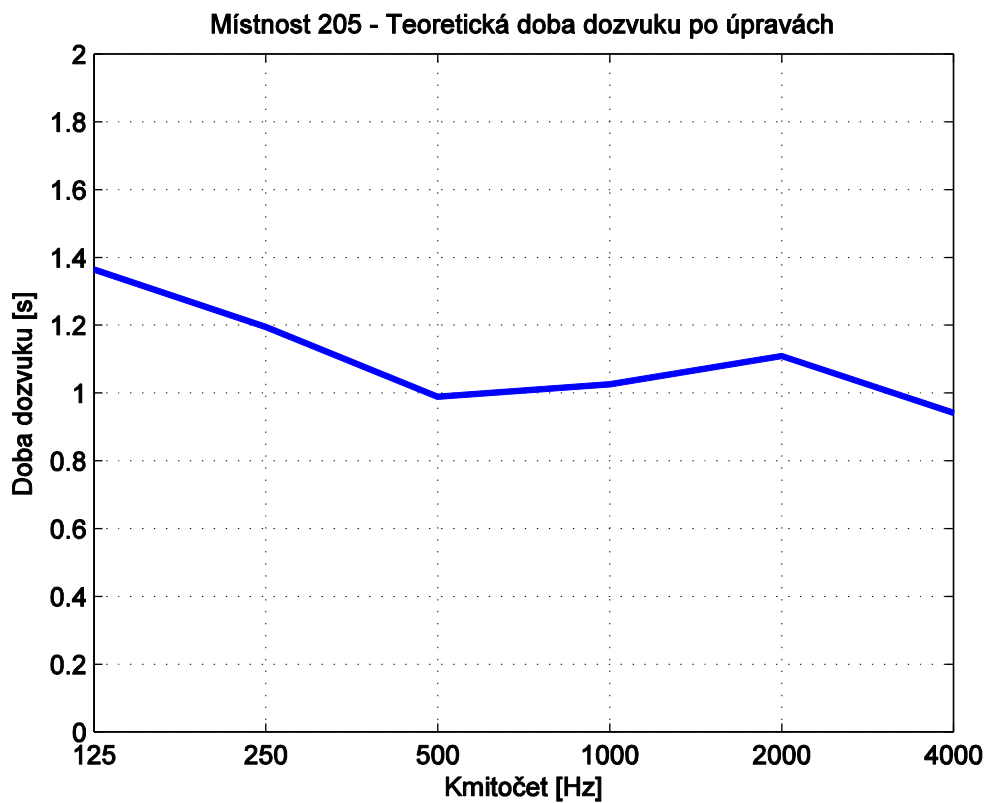


Obrázek 50 – Pohled na zadní stěnu místnosti 202a po akustických úpravách (nahore)
a levou stěnu z pohledu od tabule (dole)

8.3.2 Teoretické parametry místnosti po úpravě

frekvence (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
celkový činitel pohltivosti (-)	0,080	0,104	0,135	0,129	0,114	0,118
doba dozvuku (s)	1,667	1,300	1,005	1,057	1,140	0,965
průměrná doba dozvuku (s)	1,189					

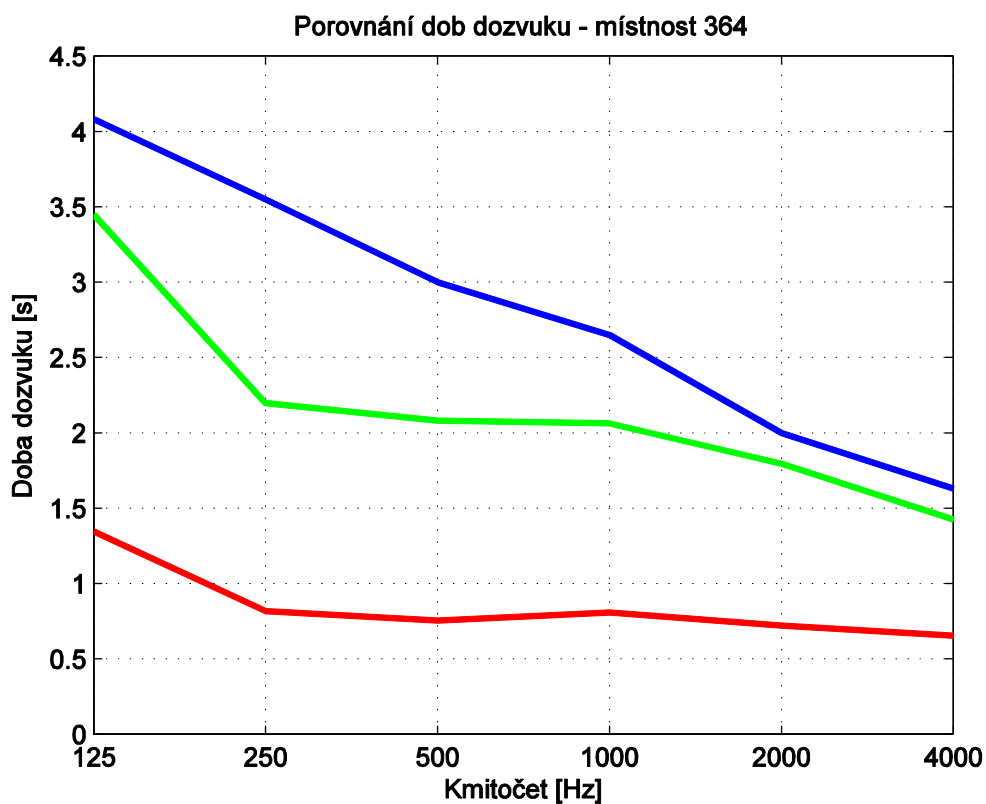
Tabulka 29 – Teoretické parametry místnosti po úpravě



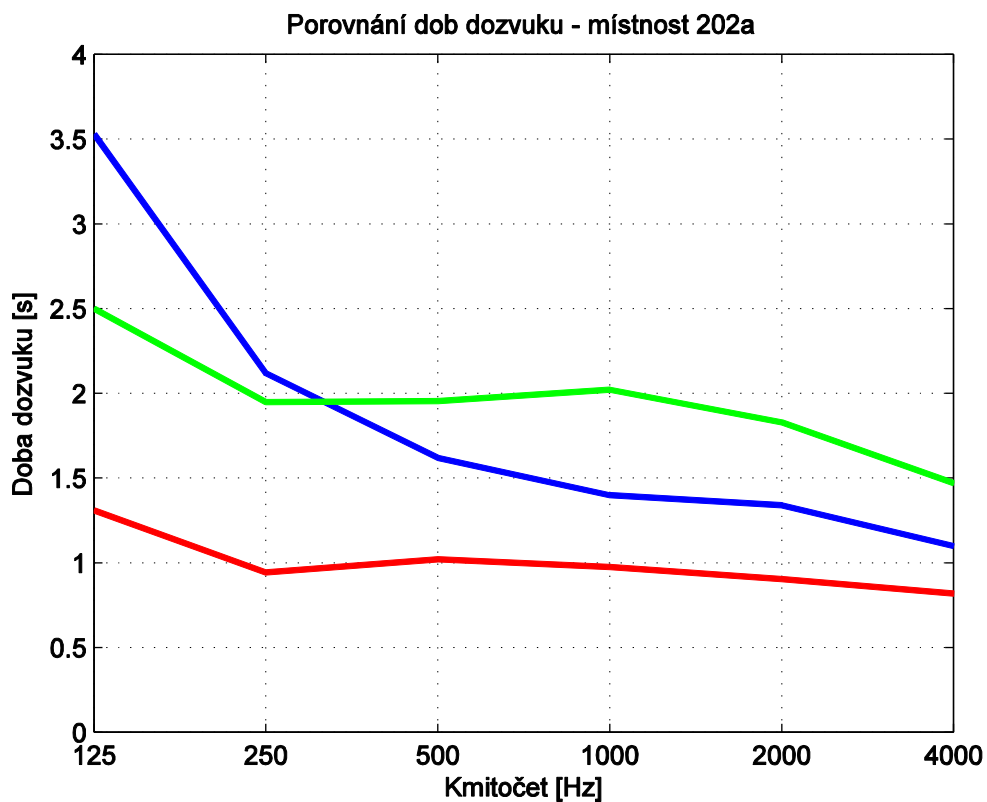
Obrázek 51 – Teoretická doba dozvuku místnosti 205 po úpravách

9 Porovnání návrhů s měřením

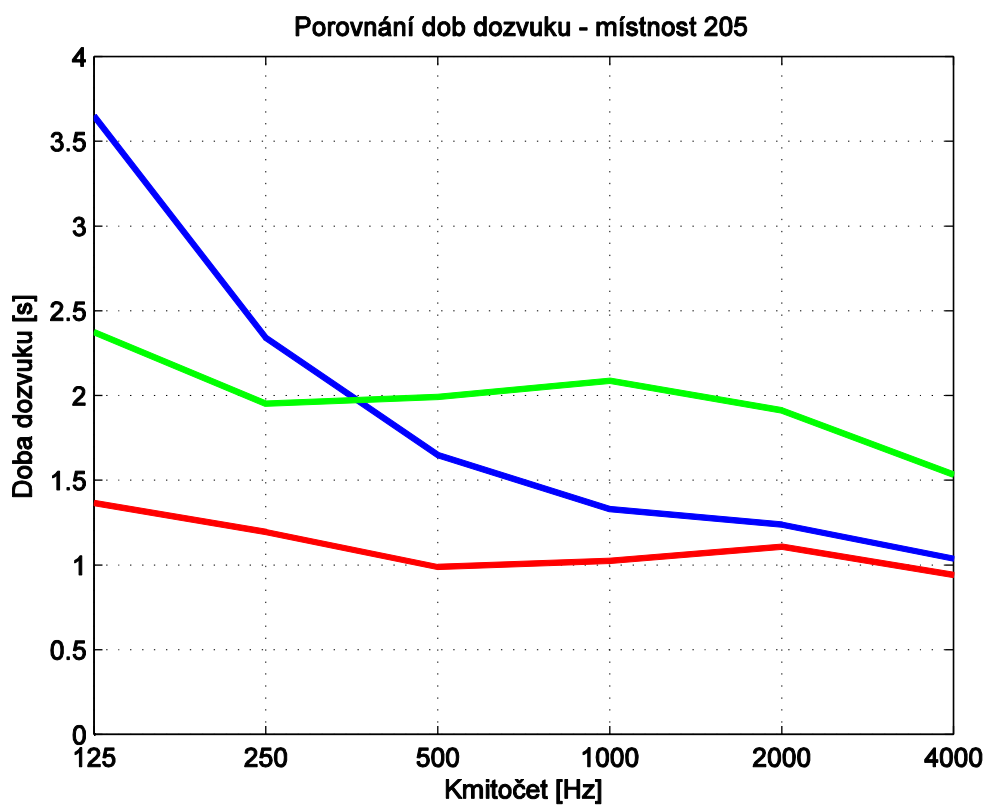
V následujících grafech jsou porovnány vypočtené doby dozvuku pro oba návrhy s naměřenou a teoreticky vypočtenou dobou dozvuku.



Obrázek 52 – Graf porovnání změřené (modře) a vypočtené doby dozvuku (zeleně) s návrhem (červeně) pro místnost 364



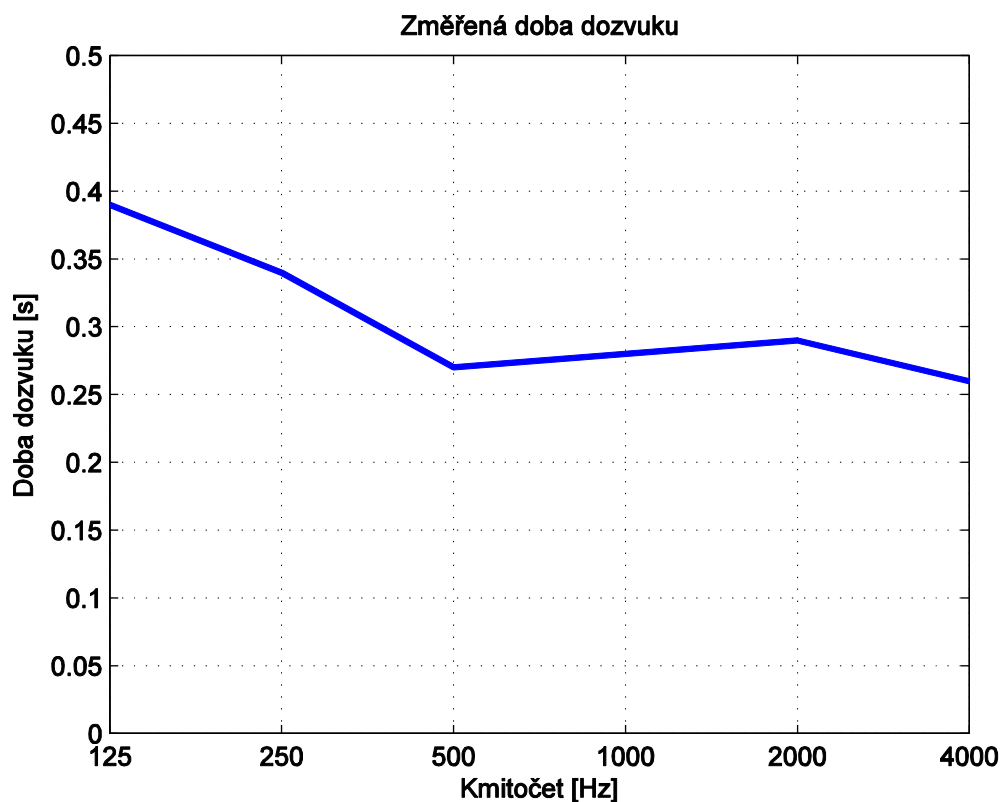
Obrázek 53 – Graf porovnání změřené (modře) a vypočtené doby dozvuku (zeleně) s návrhem (červeně) pro místnost 202a



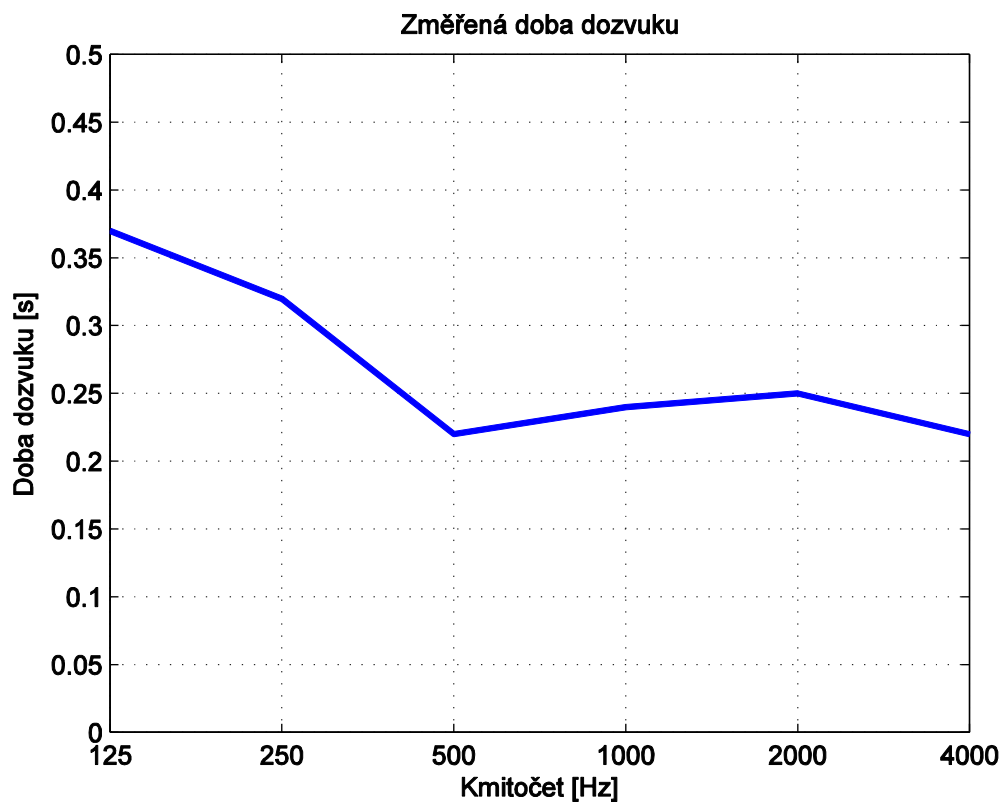
Obrázek 54 – Graf porovnání změřené (modře) a vypočtené doby dozvuku (zeleně) s návrhem (červeně) pro místnost 205

10 Studio

Na závěr byly pro porovnání změřeny také akustické parametry školního studia, které bylo akusticky upraveno. Na zdech místnosti je obklad z materiálu Sonit, na stropě se nachází podhled z pohltivého materiálu a před okny byly umístěny závěsy, které jsou účinné především na středních a vyšších kmitočtech. Pro porovnání, obrázek 55 – měření bez závěsů, obrázek 56 – měření se závěsy. Doba dozvuku v těchto prostorech je díky akustickým úpravám velmi nízká (průměrně cca 0,3 s) a vyrovnaná. Index srozumitelnosti STI je 0,87, což odpovídá nejlepšímu možnému hodnocení.



Obrázek 55 – měření doby dozvuku T_{30} ve studiu, bez závěsů



Obrázek 56 – měření doby dozvuku T_{30} ve studiu, se závěsy

11 Závěr

Během této práce jsem provedl měření akustických parametrů zadaných místností. Tyto prostory jsou určeny pro výuku a jejich kapacita je přibližně 20 studentů. Místnosti nejsou nijak akusticky upraveny a kromě lavic se v nich nenachází žádný nábytek.

Byly vypočteny teoretické hodnoty doby dozvuku podle Sabina pro měřené prostory. Tyto hodnoty se u místnosti 364 od naměřených hodnot příliš nelišily na vyšších kmitočtech. Lišily se však na měřeném kmitočtu 125 Hz a 250 Hz. Předpokládám, že na vině by mohly být vlastní módy místností. Akustické pole v této místnosti je podle Schroederova kmitočtu nevyrovnané až do 271 Hz. U místností 202a a 205 se výpočty od skutečně naměřených hodnot poměrně lišily.

Měření bylo provedeno pomocí programu EASERA, kterým byla zjištěna impulzní odezva místností a z ní určena doba dozvuku pro jednotlivá kmitočtová pásma. Změřená doba dozvuku T_{30} v těchto místnostech je vysoká, což činí komunikaci a poslech přednášejícího značně obtížné. Podle [14] by měla být doba dozvuku v místnosti, určené především k mluvenému slovu a s daným objemem, 0,7 s.

Možnosti zlepšení akustických vlastností místností je mnoho. V dnešní době existuje široká škála akusticky pohltivých materiálů určených pro snížení doby dozvuku, rezonátorů pro potlačení daného frekvenčního pásma, na které je naladěno, nebo difuzních prvků pro celkové zlepšení rozložení akustického pole. Důležitou roli při výběru akustických prvků hraje také cena, mnohdy bohužel na úkor kvality či celkového výsledku.

Předkládám návrhy akustických úprav pro všechny měřené místnosti, kterélepší nyní akustické podmínky – především srozumitelnost řeči. V návrzích jsem se snažil dodržet normou stanovené hygienické požadavky na dobu dozvuku. Největší holá plocha z celé místnosti je vždy strop, z toho důvodu byl návrh místnosti s nejhorsími akustickými parametry zaměřen především na jeho úpravu. Materiál na úpravu stropu v návrhu pro místnost 364 je Ecophon Focus s vysokým koeficientem zvukové pohltivosti. Podle výrobce je jeho koeficient pohltivosti na 2 kHz až 4 kHz roven dokonce 1, což je dle mého názoru v reálném použití nemožné. V místnosti 205 jsem se zaměřil na možnosti použití akustických prvků firmy Soning. Základním materiálem pro tento návrh se tak stal obkladový materiál Sonit D30, umístěný na zadní stěně, který by měl být dle mého názoru cenově dostupnější než materiál Focus, a zároveň má na středních a vysokých kmitočtech velmi dobré pohltivé vlastnosti. Pro utlumení nízkých kmitočtů jsou v návrhu štěrbínové rezonátory DR-SON. V místnosti 202a návrh počítá s obkladem stěny proti přednášejícímu sádrokartonovými děrovanými deskami Knauf D127 s přidanou 20 mm silnou vrstvou absorpční tkaninou.

Ve všech návrzích je za akustický podhled či obklad umístěn pohltivý vláknitý materiál Rockwool Airrock HD. Toto řešení by mělo pomoci utlumit nízké kmitočty, na kterých by byla teoretická doba dozvuku nepatrně vyšší, než stanovuje norma. Je nutné myslet na to, že třídy byly v době měření prázdné. Veliký vliv na akustiku prostoru bude mít také přítomnost studentů, kteří působí jako akusticky velmi pohltivý materiál, jak je možné se přesvědčit v závěru kapitoly 7.

Na závěr byly proměřeny akustické parametry studia, které bylo akusticky upraveno. K úpravě byl mimo jiné použit materiál Sonit, který je také součástí jednoho z předložených návrhů úprav. Doba dozvuku ve studiu je velmi nízká a je patrné, že i přidání závěsů před okna, která velmi dobře odrážejí zvuk, pomohlo snížit dobu dozvuku.

V každém z návrhů bylo přistoupeno k řešení akustiky prostoru odlišným způsobem, je však nutné mít na paměti, že dodržení teoretických hodnot stanovených normou neznamena automaticky stoprocentně úspěšný výsledek. Proto je třeba po realizaci návrhu akustické úpravy ověřit měřením, zda a k jakému zlepšení akustiky došlo.

12 Zdroje

- [1] KOLMER, Felix a Jaroslav KYNCL. *Prostorová akustika: vysokošk. příručka pro vys. školy techn. směru. 2.*, nezm. vyd. Praha: SNTL, 1982. 04-514-80.
- [2] SCHIMMEL, Jiří. *Objektivní vlastnosti poslechových prostorů a jejich měření - přednáška*. 2015. [Online, dostupné z <http://slideslive.com/38892802/objektivni-vlastnosti-poslechovych-prostoru-a-jejich-mereni>]. [cit. 20. 5. 2016].
- [3] ČSN EN ISO 3382-2, *Akustika – Měření parametrů prostorové akustiky – Část 2: Doba dozvuku v běžných prostorech*, 2009
- [4] BS EN 60268-16:2011, *Sound system equipment Part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index*, 2011. [Online, dostupné z: <http://resource.isvr.soton.ac.uk/staff/pubs/PubPDFs/BS%20EN%2060268-16.pdf>]. [cit. 20. 5. 2016].
- [5] KUTTRUFF, Heinrich. *Room Acoustics, Fifth Edition*. New York: Spon Press, 2009. ISBN 0-203-87637-7
- [6] KRŇÁK, Milan. *Akustické obklady*. Praha: VÚZORT, 1971. 06-066-71
- [7] SONING. *Katalog akustických prvků a systémů*. Přiloženo v elektronické příloze.
- [8] Fotografie materiál Rockwool Airrock HD. Buildingsteelframe.com. [Online, dostupné z: http://www.buildingsteelframe.com/photo/pl10964390-heat_resistant_acoustic_wall_rock_wool_insulation_soundproofing.jpg]. [cit. 20. 5. 2016].
- [9] Fotografie materiál Basotect. Obiform [Online, dostupné z: <https://obiform.com/en/Basotect.htm>]. [cit. 24. 5. 2016].
- [10] *Fotografie pohledový materiál Master A*. Skupina Ecophon, 2002 – 2016. [Online, dostupné z: <http://www.ecophon.com/cz/vyrobky/Kazetov--pohledy/Master/Master--A/>]. [cit. 20. 5. 2016].
- [11] *Fotografie děrované desky Kauf*. Knauf, 2015. [Online, dostupné z: <http://www.knauf.cz/image/434/326/51-ctvercove-derovani-jpg.jpg>]. [cit. 20. 5. 2016].
- [12] Fotografie materiál Linea. Akustik & Raum AG. [Online, dostupné z: <http://www.akustik-raum.ch/en/acoustics-systems/products/linea-li/>]. [cit. 20. 5. 2016].
- [13] Obrázek QRD difuzor. B & H Foto & Electronics Corp. [Online, dostupné z: http://www.bhphotovideo.com/c/product/437626-REG/RPG_Diffusor_Systems_SKYEW_2_Skyline_Diffusor_2.html] [cit. 23. 5. 2016].
- [14] ČSN 73 0527, *Akustika – Projektování v oboru prostorové akustiky – Prostory pro kulturní účely – Prostory ve školách – Prostory pro veřejné účely*, 2005
- [15] ČSN 73 0525, *Akustika - Projektování v oboru prostorové akustiky - Všeobecné zásady*, 1998
- [16] SEEP, Benjamin, GLOSEMEYER, Robin, HULCE, Emily et al. *Classroom acoustics*. University of Kansas: Srpen, 2000. [Online, dostupné z: <http://campanellaacoustics.com/ange/ClasRox5.pdf>]. [cit. 20. 5. 2016].
- [17] KAŇKA, Jan. *Konstrukce na pohlcování zvuku*. Stavba.TZB-info. [Online, dostupné z: <http://stavba.tzb-info.cz/akustika-staveb/228-konstrukce-na-pohlcovani-zvuku>]. [cit. 20. 5. 2016].

13 Seznam elektronických příloh

Elektronická verze bakalářské práce

Fotodokumentace měření doby dozvuku

Teoreticky vypočtené doby dozvuku zadaných místností

Teoreticky vypočtené doby dozvuku pro návrhy úprav

Teoretické akustické parametry vybraných akustických prvků

Naměřené akustické parametry zadaných místností

Matlab skript pro vykreslení grafů

Katalog akustických prvků a systémů