

# Vibroakustické vlastnosti pórovitých materiálů

Bc. Měchura Jaroslav

---

Diplomová práce  
2006



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická  
Ústav fyziky a mater. inženýrství  
akademický rok: 2005/2006

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jaroslav MĚCHURA**  
Studijní program: **N 2808 Chemie a technologie materiálů**  
Studijní obor: **Materiálové inženýrství**

Téma práce: **Vibroakustické vlastnosti pórovitých materiálů**

Zásady pro vypracování:

1. Zpracujte literární rešerži na dané téma.
2. V experimentální části si připravte vzorky pórovitých materiálů a provedte měření jejich vibroakustických vlastností.
3. Vyhodnocení-zpracujte přehledně měřené závislosti.
4. Závěr-zhodnoťte získané poznatky.
5. Citujte použitou literaturu.

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

**Literatura dostupná v databázových systémech, na ÚFMI, v ústřední knihovně UTB a dle doporučení vedoucího diplomové práce**

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Martin Vašina, Ph.D.**  
Ústav fyziky a mater. inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **14. února 2006**


Termín odevzdání diplomové práce: **31. května 2006**

Ve Zlíně dne 14. února 2006



  
prof. Ing. Ignác Hoza, CSc.  
děkan

L.S.

  
prof. Ing. Lubomír Lapčík, Ph.D.  
ředitel ústavu

## **ABSTRAKT**

Cílem mé práce bylo změřit vibroakustické vlastnosti měkkých lehčených polyuretanů vyrobené firmou Gumotex. Byl změřen absorpční koeficient a přenosový útlum, které kvantitativně popisují akustické vlastnosti pórovitých materiálů. Strategický význam má pro absorpční koeficient a přenosový útlum pórovitost a tloušťka vzorku. Důležitým faktorem je také porovnat, jak se mění přenosový útlum, když na vzorek působíme silou prostřednictvím závaží různých hmotností. U absorpčního koeficientu bylo porovnáváno jak se mění jeho hodnota, když je vzorek v dvoumikrofonové trubici umístěn u stěny a následně pak s rozdílnou vzruchovou mezerou ve válci. Pórovitost byla měřena metodou objemovou.

Klíčová slova: polyuretan, absorpční koeficient, přenosový útlum, pórovitost

## **ABSTRACT**

Abstrakt ve světovém jazyce

The aims of this thesis is measurement vibroacoustic properties by soft porous cellular polyurethans to produced by firm Gumotex. I measured absorption coefficient and transmission damping, which quantitatively detailing of acoustic properties of the porous materials. The main point for absorption koeficient and transmission damping has porosity and thickness sample. The important factor is further confronted, how the transmission dampig is changed, when we would exert on the sample by the force via weight of different masses. I would confront at the absorption koefficient, how the value changes, when the samples are placed in two-microphone impedance tube at the wall and with the different thickness air passage between sample and piston in the tube. The porosity was measured by volume metod.

Keywords: polyurethans, absorption coefficient, transmission damping, porosity

Děkuji vedoucímu mé diplomové práce panu Ing. Martinu Vašinovi, Ph.D. za odborné vedení, věcné rady a připomínky při zpracování mé diplomové práce.

Souhlasím s tím, že s výsledky mé práce může být naloženo podle uvážení vedoucího diplomové práce, ředitele ústavu a institutu. V případě publikace budu uveden jako spoluautor.

Prohlašuji, že jsem na celé bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval.

Ve Zlíně, 31. 05. 2006

.....

podpis

# OBSAH

|  |           |
|--|-----------|
| <b>ÚVOD</b> .....  | <b>8</b>  |
| <b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....   | <b>10</b> |
| <b>1 AKUSTICKÉ VLASTNOSTI MATERIÁLŮ</b> .....                                      | <b>11</b> |
| 1.1 VLASTNOSTI A ŠÍŘENÍ ZVUKU .....  | 11        |
| 1.1.1 Zvuk a jeho charakteristika .....  | 11        |
| 1.1.2 Veličiny charakterizující zvuk .....   | 12        |
| 1.2 ŠÍŘENÍ ZVUKU PŘES PŘEKÁŽKU .....   | 13        |
| 1.2.1 Činitel zvukové pohltivosti .....  | 14        |
| 1.2.2 Princip metody .....   | 17        |
| 1.3 VIBRACE .....  | 18        |
| 1.3.1 Přenosový útlum.....   | 18        |
| 1.3.2 Činitel vnitřního tlumení.....   | 20        |
| <b>2 PÓROVITÉ MATERIÁLY A JEJICH VLASTNOSTI</b> .....                              | <b>22</b> |
| 2.1 PÓROVITÉ MATERIÁLY .....   | 22        |
| 2.2 MAKROSKOPICKÉ FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI PÓROVITÝCH ABSORBUJÍCÍCH<br>MATERIÁLŮ ..... | 24        |
| 2.3 POLYURETANY .....  | 26        |
| 2.3.1 Chemismus polyuretanů.....   | 28        |
| 2.3.2 Výroba polyuretanů.....  | 29        |
| <b>3 STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE</b> .....                                      | <b>32</b> |
| <b>II PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....   | <b>33</b> |
| <b>4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST</b> .....   | <b>34</b> |
| 4.1 VLASTNOSTI VZORKŮ POLYURETANŮ.....   | 34        |
| 4.2 PŘÍPRAVA VZORKŮ .....  | 35        |
| 4.2.1 Vzorky pro měření pohltivosti .....  | 35        |
| 4.2.2 Vzorky pro měření přenosového útlumu.....                                    | 36        |
| 4.2.3 Vzorky pro měření pórovitosti .....  | 36        |
| 4.3 MĚŘENÍ Činitele ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI .....                                      | 37        |
| 4.3.1 Popis zařízení .....   | 37        |
| 4.3.2 Postup měření.....   | 38        |
| 4.4 MĚŘENÍ PŘENOSOVÉHO ÚTLUMU.....   | 40        |
| 4.4.1 Popis zařízení .....   | 40        |
| 4.4.2 Postup měření.....   | 40        |
| 4.5 MĚŘENÍ PÓROVITOSTI .....   | 42        |
| 4.5.1 Objemová metoda .....  | 42        |
| 4.6 VÝSLEDKY MĚŘENÍ A JEJICH GRAFICKÉ ZPRACOVÁNÍ.....                              | 44        |
| 4.6.1 Činitel zvukové pohltivosti .....  | 44        |
| 4.6.2 Přenosový útlum.....   | 49        |
| <b>5 DISKUZE VÝSLEDKŮ</b> .....  | <b>54</b> |

|   |   |           |
|---|---|-----------|
| 5.1   | VLIV TLOUŠŤKY NA ZVUKOVOU POHLTIVOST .....      | 54        |
| 5.2   | VLIV VZDUCHOVÉ MEZERY NA POHLTIVOST .....       | 54        |
| 5.3   | VLIV PÓROVITOSTI NA POHLTIVOST .....            | 56        |
| 5.4   | VLIV TLOUŠŤKY A ZÁTĚŽE NA PŘENOSOVÝ ÚTLUM ..... | 57        |
| 5.5   | VLIV PÓROVITOSTI NA PŘENOSOVÝ ÚTLUM .....       | 58        |
| <b>ZÁVĚR.....</b>                               |   | <b>59</b> |
| <b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>          |   | <b>61</b> |
| <b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b> |   | <b>63</b> |
| <b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>                     |   | <b>65</b> |
| <b>SEZNAM TABULEK.....</b>                      |   | <b>68</b> |
| <b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>                       |   | <b>69</b> |

## ÚVOD

Zvuk (respektive hluk) vzniká při činnosti lidí i samotné přírody, a proto člověk si jeho působení už prakticky neuvědomuje. Slyšení je pro člověka jedním z nejbohatších zdrojů informací a velmi účinným poplašným systémem. Jednou z charakteristických vlastností zvuku je skutečnost, že se poměrně snadno šíří do velkých vzdáleností, ať už je médiem kapalina, plyn nebo pevná látka. Člověk je schopen intenzivně vnímat zvuk se značnou citlivostí, což může vést k jeho relaxaci, nejčastěji ve formě hudby nebo naopak hluku, což může negativně ovlivnit jeho zdravotní stavu. Není to tak dlouho co bylo zjištěno, že hudba může dokonce i „léčit“. Silný hluk je především v posledních letech koncentrován v oblasti těžkého průmyslu, fabrik, dálnic a letišť. Nejvýznamnější roli zde hraje silniční a letecká doprava. V poslední době hustý provoz na městských komunikacích ztrpčuje svým hlukem, život lidí v obytných zónách. Proto se v některých částech měst budují protihlukové bloky různých tvarů a velikostí. V posledních 20. letech se stala velmi populární i letecká doprava, pro svůj komfort a rychlost přepravy, avšak její velkou nevýhodou je značná hlučnost. Nadměrný hluk zaujímá v řadě faktorů ohrožujících naše životní prostředí stále důležitější místo. V současné době je na škodlivé účinky hluku soustředěna značná pozornost mnoha odborníků především v oblasti zdravotnictví. Potíž při působení nežádoucího hluku je v tom, že člověk není schopen se téměř chránit proti působení intenzivních akustických signálů.

V řadě případů z praxe je hluk často doprovázen i vibracemi, především u strojů a zařízení. Mají nejen nepříznivý vliv na člověka, ale také na samotné stroje, u kterých se vlivem výrazného dynamického namáhání, snižuje účinnost a přesnost stroje. Někdy mohou však být i vibrace žádané. Lze je výborně využít jak v některých technologických pracovních procesech (např. vibrační silniční válce), tak k popisu vad sledovaných strojů a v neposlední řadě v hudební oblasti, při ladění strun.

Jedinou možností v boji proti hluku a vibracím je nutné použít vhodných prostředků nebo metod k redukci hluku na přípustnou mez, která neovlivňuje zdraví pracovníků. Někdy to může být velmi konstrukčně náročný problém, který není lehké snadno řešit! V průmyslových halách při činnosti strojů a lidí je obvykle velký počet činitelů způsobujících hluk, a proto nejjednodušším postupem redukce hluku je pokrytí stěn hal materiály s velkou pohltivostí zvuku nebo nejběžnějším postupem je vybavit pracovníky vhodnými ochrannými pomůckami jako jsou sluchátka, tlumící zátky apod. Důležitým faktorem je



zde také cena, a proto při řešení problémů se volí určitý kompromis, mezi kvalitou ochrany proti hluku a cenou. V některých případech jsme schopni redukovat hluk už od zdroje, což může být někdy nejjednodušší řešení daného problému. K redukcí hluku nám někdy postačí vhodná úprava akustických vlastností prostoru. Nejrozšířenějším postupem ke snižování hladiny hluku v prostoru je pohlcení akustické energie použitím materiálů, které dobře pohlcují vibrace a hluk. Jedná se zpravidla o pórovité a vláknité materiály, které jsou většinou snadno dostupné a relativně levné. Patří sem především lehčené polyuretany, skleněná a minerální vlákna. Důležitým faktorem jsou také geometrický tvar a konstrukce absorbujícího dílce a oblast použití. Jsme schopni průmyslově vyrobit různé druhy konstrukcí zvukově a vibračně pohltivých systémů podle potřeb zákazníka, který často také klade důraz na estetiku a módní trend.

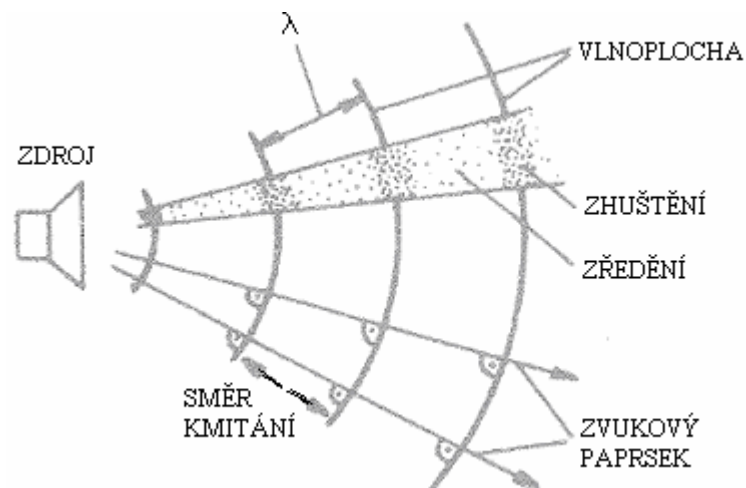
## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

# 1 AKUSTICKÉ VLASTNOSTI MATERIÁLŮ

## 1.1 Vlastnosti a šíření zvuku

### 1.1.1 Zvuk a jeho charakteristika

Fyzikální podstatou zvuku je mechanické kmitání částic pružného prostředí ve frekvenčním rozsahu od 16 Hz do 20 kHz, které se šíří prostředím konečnou rychlostí. Frekvenční rozsah akustického vlnění, kterým se zabývá technická akustika, odpovídá kmitočtovému rozsahu lidského ucha. Zvuk se šíří nejen v prostředí kapalném a plynném, ale i v prostředí pevném. Mechanickými kmity pružného prostředí se přenáší mechanická energie kmitajících částic od zdroje prostřednictvím akustických vln. Vlnění od zdroje se šíří v kulových vlnoplochách ve směru zvukového paprsku určitou rychlostí viz (Obr. 1.). Částice prostředí se s postupující akustickou vlnou zhušťují a zředňují. Částice kmitají kolem svých rovnovážných poloh a zásadně se nepohybují se šířící se vlnou, pouze zprostředkovávají přenos mechanické energie. V homogenním izotropním prostředí se vlnění šíří vždy přímočaře. Podle toho, zda částice prostředí kmitají ve směru šíření vlnění nebo kolmo k němu, dělíme vlnění na podélné a příčné. U podélného vlnění je směr kmitů jednoznačně dán směrem šíření vlnění, kdežto u příčného vlnění musíme udávat též rovinu, ve které dochází k příčným kmitům. [1]



Obr. 1. Šíření zvuku od zdroje

### 1.1.2 Veličiny charakterizující zvuk

Zvuk, který se šíří prostředím je zpravidla charakterizován některou akustickou veličinou. Máme zavedeno několik akustických veličin. Jsou to akustická rychlost, akustický tlak a akustický výkon.

*Akustická rychlost* udává rychlost s jakou kmitají jednotlivé částice prostředí, kterým se šíří akustická vlna. Je definována jako první parciální derivace akustické výchylky podle času.

$$v = \frac{\partial x}{\partial \tau} = \varpi \cdot u_0 \cos \varpi \left( \tau \mp \frac{x}{c} \right), \quad (1)$$

kde:  $u_0$  - amplituda akustické výchylky,  $\varpi$  - úhlová rychlost.

*Akustický tlak* je definovaný jako odchylka celkového tlaku od tlaku statického při vlnění v daném prostředí. Při šíření zvuku prostředím dochází k zhušťování a zředování kmitajících částic prostředí a tím dochází k zvyšování anebo snižování tlaku v plynech nebo kapalinách. Akustický tlak je nasuperponován na tlak barometrický a proto pro celkový tlak platí vztah

$$p_c = p_b + p(t) = p_b + p_0 \cos(\varpi \tau + \varphi), \quad (2)$$

kde:  $p_0$  - amplituda akustického tlaku,  $\varphi$  - fázový posun,  $p_b$  - barometrický tlak

*Akustický výkon* je charakterizovaný jako množství akustické energie, která prochází za jednotku času myšlenou prostorovou plochou, a proto pro platí vztah:

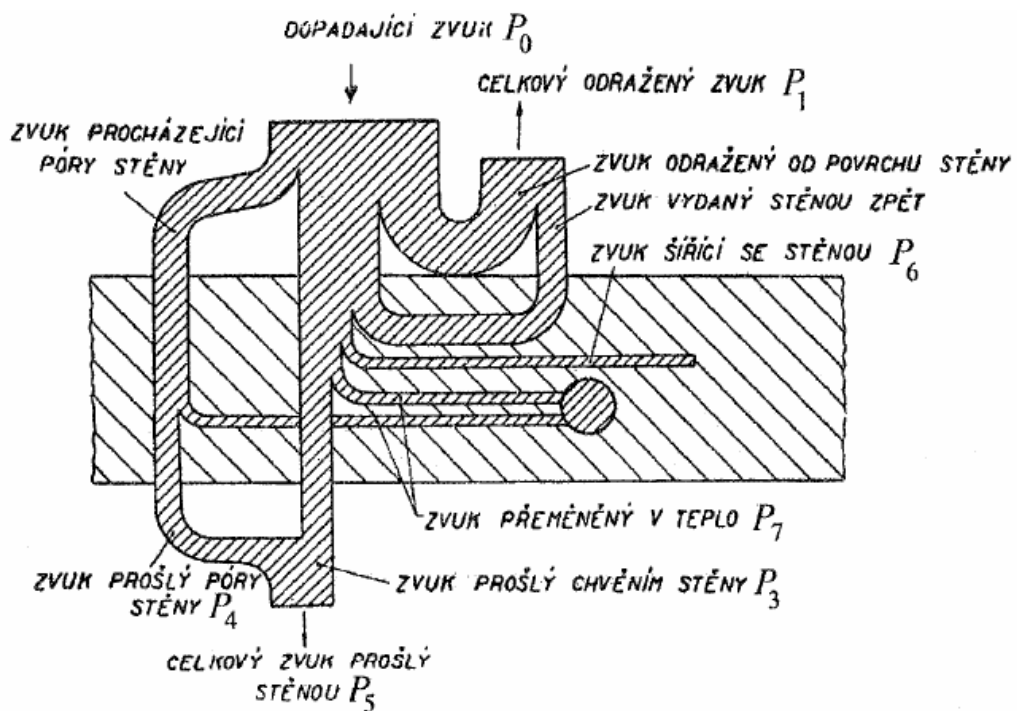
$$P = F \cdot v = p \cdot v \cdot S, \quad (3)$$

kde:  $p$  - akustický tlak,  $v$  - rychlost kmitání částic,  $S$  - plocha

Z hlediska praxe se však tyto veličiny používají jen zřídka, protože lidské ucho reaguje logaritmicky na vnější podnět. Proto se začaly používat logaritmická měřítka pro všechny akustické veličiny, jako dekadický logaritmus poměru sledované veličiny k zvolené referenční hodnotě. Za referenční hodnotu je zvolena hladina akustického tlaku při  $f = 1000$  Hz hodnota  $2 \cdot 10^{-5}$  Pa a ostatní referenční jednotky jsou od ní odvozeny. [7]

## 1.2 Šíření zvuku přes překážku

Nejvíce využívanými materiály v akustice při současném problému nadměrného hluku jsou právě materiály s velkou pohltivostí. Při dopadu zvukové vlny na povrch stěny nebo nějaké překážky se část zvukové vlny odrazí zpět, část se pohltí ve stěně a část projde do prostoru za stěnou viz (Obr. 2.).



Obr. 2. Průchod zvuku stěnou

$P_0$  - dopadající akustický výkon

$P_1$  - odražená složka akustického výkonu

$P_6$  - složka, která se dále šíří stěnou

$P_7$  - složka, která se ve stěně mění v teplo

$P_3$  - složka, která je vlivem kmitání stěny vyzářena do prostoru na druhé straně stěny

$P_4$  - složka procházející póry na druhou stranu stěny

$P_2 = P_6 + P_7$  - pohlcená složka akustického výkonu

$P_5 = P_3 + P_4$  - složka propuštěná stěnou

Jednotlivé vlivy tohoto jevu jsou charakterizovány několika bezrozměrnými veličinami. Jsou to činitel zvukové pohltivosti  $\alpha$  (absorpční koeficient), činitel zvukové odrazivosti  $\beta$  a činitel zvukové průzvučnosti  $\tau$ . Veličiny  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\tau$  nabývají hodnot od 0 do 1 a jejich součet je vždy 1. Můžeme uvažovat, že pro pórovité materiály a konstrukce je  $\tau$  řádově nižší než  $\alpha$  a  $\beta$  a pak platí  $\alpha + \beta \approx 1$ . [2]

Činitel zvukové odrazivosti  $\beta$  můžeme definovat poměrem odraženého  $P_1$  a dopadajícího  $P_0$  akustického výkonu:

$$\beta = \frac{P_1}{P_0}, \quad (4)$$

Obdobně činitel zvukové průzvučnosti  $\tau$  poměrem prošlého  $P_5$  a dopadajícího  $P_0$  akustického výkonu nebo též poměrem intenzit prošlého a dopadajícího zvuku na dělicí prvek:

$$\tau = \frac{P_5}{P_0} = \frac{I_5}{I_0}, \quad (5)$$

O definici činitele zvukové pohltivosti se dozvíme níže, z důvodu podrobnějšího popisu.

### 1.2.1 Činitel zvukové pohltivosti

Schopnost materiálu nebo konstrukce pohlcovat zvuk charakterizujeme činitelem zvukové pohltivosti  $\alpha$ , který je dán poměrem pohlceného  $P_2$  a dopadajícího  $P_0$  akustického výkonu:

$$\alpha = \frac{P_2}{P_0}, \quad (6)$$

Jedná se o bezrozměrnou veličinu, která nabývá hodnot v intervalu  $\langle 0,1 \rangle$ . Akustická energie může být pohlcována několika mechanismy a to:

- třením
- poklesem akustického tlaku
- nepružnou deformací těles

Ve skutečnosti se tlumení uskutečňuje kombinací všech těchto mechanismů. [5]

Absorpce povrchu různých materiálů je funkcí mnoha parametrů jako je efektivní hodnota drsnosti povrchu, pórovitost, poddajnost, rezonanční vlastnosti apod. Proto se hodnoty absorpčního koeficientu u různých látek mohou značně lišit. [7]

Z hlediska praxe můžeme rozdělit materiály a konstrukce pro pohlcování zvuku na:

- materiály - pórovité a vláknité
- konstrukce - pohltivé obklady a akustická tělesa
  - konstrukce typu Helmholtzových rezonátorů
  - kmitající membrány a desky

Činitel zvukové pohltivosti je závislý na kmitočtu a směru dopadu zvukové vlny. Z toho vidíme, že je funkcí frekvence, a proto se jeho hodnoty zpravidla uvádějí v oktávových nebo třetinooktávových frekvenčních pásmech. Pro kolmý dopad jej označujeme jako činitel pohltivosti  $\alpha_N$  a pro všesměrový dopad zvuku jako činitel pohltivosti  $\alpha_S$  (tzv. Sabinův). Měření činitele zvukové pohltivosti pro kolmý dopad se provádí metodou analýzy stojatých vln v interferometru tzv. Kundtově trubici. Podmínky pro jednotlivá měření popisuje norma ČSN 73 0501. Tato metoda je vhodná zejména pro předběžné měření při vývoji nových materiálů, k porovnání pohltivosti různých materiálů a jejich konstrukčního uspořádání nebo ke stanovení dalších charakteristik materiálu, např. akustické impedance. Výhodou jsou malé rozměry zkušebních vzorků.

Měření činitele zvukové pohltivosti pro všesměrný dopad se provádí ve speciální dozvukové komoře. Tato metoda je přesnější a dává výsledky blízké technické praxi. Protože ve srovnání s dopadem zvuku v kolmém směru, dopadá při stejné hustotě zvukové energie při všesměrovém dopadu na tutéž plochu mnohem více zvukové energie. Proto je činitel pohltivosti pro všesměrový dopad větší než pro kolmý dopad zvukových vln.[1,2]

Materiály lze rozdělit dle činitele zvukové pohltivosti na:

- špatně pohltivé materiály pro  $\alpha < 0,25$  (např. obkladačky)
- středně pohltivé materiály pro  $\alpha < 0,25 ; 0,6$  (např. okenní sklo)
- dobře pohltivé materiály pro  $\alpha > 0,6$  (např. polyuretany, skleněná vlákna)

Hodnoty jsou však relativní, závisí na kmitočtu dopadající zvukové vlny. Tak např. okenní sklo má pohltivost do 250 Hz hodnotu  $\alpha = 0,4$  kdežto při hodnotě 1000 Hz je pohltivost poloviční. Z toho vidíme, že sklo je vhodné pro pohlcování zvuku nízkých frekvencí.

Pro praxi jsou značně důležité dobře pohltivé materiály, které mají zpravidla pórovitou, vláknitou nebo houbovitou strukturou. Jednotlivé póry musí být vzájemně propojeny, aby se mohly uplatnit mechanismy přeměny akustické energie. Vysokých hodnot činitele zvukové pohltivosti dosahují ty materiály, u kterých se vlnovému odporu vzduchu  $\rho_0 c$  blíží reálná složka akustické impedance materiálu. Reálnou a imaginární složku akustické impedance můžeme stanovit měřením v interferometru.

Zkušenosti i teoretický rozbor ukazují, že činitel zvukové pohltivosti jednoduché vrstvy na tuhé stěně značně závisí na tloušťce vrstvy. Vztah mezi tloušťkou vrstvy  $h$  a kmitočtem  $f_m$ , nad kterým je materiál akusticky účinný, lze vyjádřit následujícím vztahem:

$$h \approx \frac{1}{10} \frac{c}{f_m}, \quad (7)$$

kde:  $c$  – fázová rychlost zvuku ve vzduchu

Ze vztahu je zřejmé, že pro pohlcení nízkých kmitočtů je zapotřebí velké tloušťky materiálu. Tento nedostatek se odstraňuje různými konstrukčními úpravami. [2]

U porézní látek, u kterých uvažujeme tuhou kostru (i naše polyuretany), která při pohlcování akustické energie s následným vznikem tepla nemění své rozměry, jsme schopni stanovit jejich pohltivé vlastnosti když známe tyto parametry:

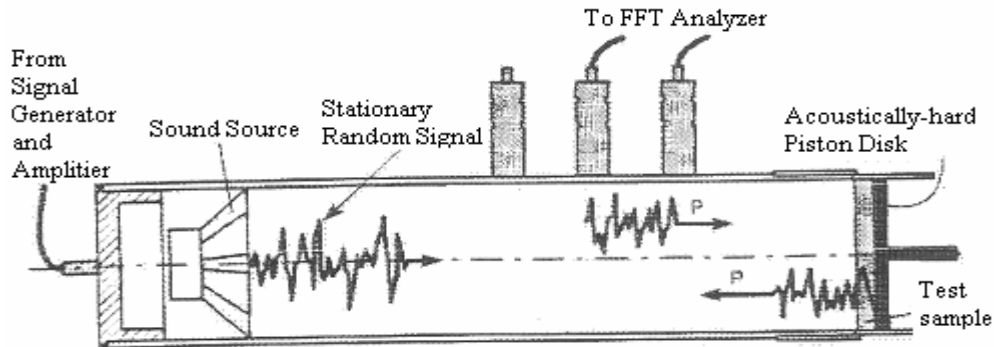
1. pórovitost
2. stejnosměrný akustický odpor (odpor, který klade jednotka objemu látky průtoku vzduchu)
3. činitel struktury (závislý na uspořádání kostry látky a pórů)
4. exponent  $n$  (charakterizuje, zda se jedná o děj izotermický, adiabatický nebo polytropický, jeho hodnoty se pohybují v rozmezí  $n \in \langle 1; 1,4 \rangle$ ). [1]

Pokud však při pohlcování zvuku dojde k výrazným změnám struktury a chování kostry vzorku, jsme nuceni sestavit vhodný matematický model, který daný experiment co nejlépe popisuje. To však vyžaduje značné znalosti a zkušenosti pracovníka.



### 1.2.2 Princip metody

Metoda používá rozkladu akustického signálu generovaného zdrojem uvnitř trubice na dopadající a odraženou složku, které jsou dány vztahem mezi akustickými tlaky působícími ve dvou místech na stěnu trubice viz (Obr. 3.).



Obr. 3. Princip dvoumikrofonové měřící metody

Z velikosti dopadající a odražené složky jsou pak určeny následující přenosové funkce:

$H_1$  – funkce frekvenční odezvy

$H_i$  – funkce frekvenční odezvy dopadající složky

$H_r$  – funkce frekvenční odezvy odražené složky

Z jejich hodnot je vypočten koeficient zvukové odrazivosti  $R$ :

$$R = \left( \frac{H_1 - H_i}{H_r - H_1} \right) * e^{j2k(l+s)}, \quad (8)$$

kde:  $k$  – vlnové číslo,  $l$  – vzdálenost mezi prvním mikrofonom a vzorkem,  $s$  – vzdálenost mezi dvěma mikrofony.

Ze zjištěného koeficientu zvukové odrazivosti můžeme snadno vypočítat hodnoty koeficientu zvukové pohltivosti a normalizovanou impedanci dle následujících vztahů:

$$\alpha = 1 - |R|^2, \quad (9)$$

$$\frac{z}{\rho * c} = \frac{1 + R}{1 - R}, \quad (10)$$

$\frac{z}{\rho * c}$  je akustický odpor (reálná část akustické impedance). [5]

### 1.3 Vibrace

Vibrace jsou fyzikálním jevem jehož podstatou je mechanické kmitání hmotného bodu nebo tuhého tělesa. Při kmitání se hmotný bod pohybuje kolem své střední rovnovážné polohy. Tento efekt není patrný nejen u malých předmětů, ale i v oblasti makrosvěta např. chvění budov nebo zemětřesení.

K popisu chvění je nutné zabývat se silami a momenty, které působí na soustavu a odezvami, které takové působení vyvolává. Hlavními příčinami chvění jsou dynamické síly, které u strojů a zařízení vlivem nepřesností dílů a nevyvážeností součástí mohou způsobovat rezonance. Rezonance jsou charakterizovány silným mechanickým chvěním a hlukem a často při nich dochází k mechanickému poškození strojů a součástí.

K hodnocení kvality a životnosti výrobků se využívá metody vibračního zkoušení, jako základního testovacího programu konstrukčního a projektového inženýrství. Princip vibračního testu spočívá ve vybuzení testované struktury budičem chvění tzv. vibrátorem na vysoké hladiny chvění. Hladina vibrací bývá udržována a kmitočet přeladován pomocí řídicí jednotky. Skutečná úroveň buzení je zjišťována snímačem chvění tzv. akcelerometrem. Druhým snímačem chvění, který je umístěn na jiné části struktury je měřena frekvenční odezva systému na buzení.

#### 1.3.1 Přenosový útlum

Statické experimenty nejsou vhodné pro zjišťování informací o chování makromolekulárních látek v krátkých časech, protože je vždy zapotřebí určitý časový interval nutný pro vložení napětí nebo deformace. Navíc je obtížné provádět měření u statických zkoušek a dosáhnout tak dostatečné přesnosti. Proto se v praxi využívá dynamických měření, při kterých je vzorek vystaven cyklickému namáhání vloženým napětím nebo deformací. [6]

Dynamické odezvy a charakteristiky akustických přenosů struktur jsou určeny v podstatě třemi parametry:

- vlastními frekvencemi
- tvary kmitů
- modálním tlumením

Tlumení způsobuje disipaci energie systému, nebo přesněji způsobuje přeměnu mechanické energie při vibracích struktury na jiné formy energie (zpravidla tepelnou). Strukturální tlumení dosahuje nejvýraznějšího efektu při rezonanci systému nebo v jeho blízkém okolí. Mimo rezonance se tlumení u mechanických struktur výrazně neuplatňuje. Při buzení se budící silou dodává energie do struktury, čímž narůstá amplituda kmitavého pohybu až na hodnotu, při které dochází k rovnováze mezi energií dodávanou a energií disipovanou v důsledku tlumení. [6]

Zvýšení vnitřního tlumení materiálu má za následek:

- rychlejší zánik volných kmitů
- rychlejší úbytek volně se šířících strukturálních vln v konstrukci se vzdáleností od zdroje vibrací
- snížením amplitud vibrací v rezonanci
- snížením vyzařované akustické energie i mimo rezonance struktury
- snížením hodnoty nárůstu vibrací a tím i hluku při přechodu rezonančních oblastí
- snížením amplitud u samobuzených kmitů [7]

Při měření vzorků ve tvaru desek se v praxi používají metody volných kmitů, nucených kmitů a měření na základě deformační křivky. V našem případě použijeme metodu nucených kmitů.

U této metody je jeden konec vzorku připevněn k vibrátoru a druhý následně k setrvačnému prvku. Bude-li na buzený konec dostatečně dlouho působit sinusové harmonické namáhání s výchylkou, pro kterou bude platit:  $u = u_0 \cdot \cos(\omega t)$ , bude pro výchylku setrvačného konce vzorku platit:  $y = y_0 \cdot \cos(\omega t + \delta)$ . Odvození matematických vztahů pro výpočet soufázového a ztrátového modulu a ztrátového úhlu vychází z pohybových rovnic obou konců vzorku. Po zjednodušení na základě znalostí frekvence popř. úhlové rychlosti, hmotnosti setrvačného prvku, amplitud obou konců a jejich fázového rozdílu dostaneme příslušné pohybové rovnice. [6]

Z praktického hlediska není možné přímo měřit dynamické namáhání prvku, kterým se šíří akustický signál. Je však možné přímo měřit rychlost chvění prvku. V praxi se ukázalo, že je vhodné stejně jako při šíření zvuku vzduchem, použít logaritmických stupnic při určování velikosti jednotlivých veličin chvění.

Přenosový útlum materiálu je definován vztahem:

$$D = 20 \cdot \log \frac{|v_0|}{|v|}, \quad (11)$$

kde:  $|v_0|$  - amplituda rychlosti na vstupní straně vzorku,

$|v|$  - amplituda rychlosti na výstupní straně vzorku

V našem případě se jedná o nucené kmitání vzorku s harmonickou změnou napětí sinusového průběhu a deformace při různých budících frekvencích. Pak rovnici (10) můžeme upravit na tvar:

$$D = 20 \cdot \log \frac{|a_0|}{|a|}, \quad (12)$$

kde:  $|a_0|$  - amplituda zrychlení na vstupní straně vzorku,

$|a|$  - amplituda zrychlení na výstupní straně vzorku

Amplitudy zrychlení jsou měřeny pomocí připojených akcelerometrů na vstupní resp. výstupní straně vzorku viz (Obr. 10.). [1]

### 1.3.2 Činitel vnitřního tlumení

Při dynamickém namáhání konstrukčních prvků je nutno vzhledem k existenci vnitřního tlumení v materiálu, zavést komplexní modul pružnosti. Z toho vyplývá, že Hookův zákon se rozšíří na tvar:

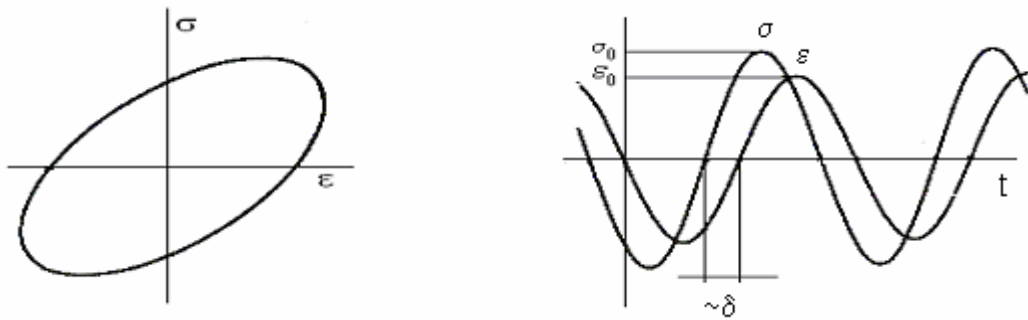
$$\sigma = E(1 + j\eta)\varepsilon, \quad (13)$$

kde:  $E$  - dynamický modul pružnosti,  $\sigma$  - napětí,  $j = \sqrt{-1}$  - komplexní člen

$\eta$  - činitel vnitřního tlumení.  $\varepsilon$  - poměrné prodloužení.

Hodnotu  $E(1+j\eta)$  můžeme nazvat komplexním modulem pružnosti. [14]

Při zkoumání dynamického namáhání součástí bychom dospěli k diagramu viz (Obr. 4.).



Obr. 4. Hystereze v materiálu

Plocha omezená hysterézní křivkou odpovídá energii kmitání, která se přemění na teplo během jednoho kmitu. Činitel vnitřního tlumení se zvětšuje pokud rostou vnitřní ztráty.

Činitel vnitřního tlumení se určuje dvěma nejobvyklejšími postupy a to:

Zjištěním reálné a imaginární složky dynamického modulu pružnosti se zjišťuje vibračním testem metodou nucených kmitů nebo druhým možným způsobem je postup, při kterém vzorek ve tvaru pásku je nejprve rozkmitán v rozsahu rezonančních frekvencí a potom měříme spektrum amplitud v závislosti na frekvenci.

Činitel vnitřního tlumení resp. mechanický ztrátový činitel je možno definovat vztahem:

$$\eta = \operatorname{tg} \delta = \frac{E_{\operatorname{Im}}}{E_{\operatorname{Re}}}, \quad (14)$$

kde:  $\delta$  - ztrátový úhel,  $E_{\operatorname{Im}}$  - imaginární část modulu pružnosti

$E_{\operatorname{Re}}$  - reálná část modulu pružnosti

U druhého postupu činitel vnitřního tlumení vypočítáme jako poměr šířky spektra  $\Delta f$  a rezonanční frekvence  $f_r$ :

$$\eta = \frac{\Delta f}{f_r}, \quad (15)$$

Šířka měřeného spektra amplitud odpovídá efektivní hodnotě maximální amplitudy při rezonanční frekvenci.

## 2 PÓROVITÉ MATERIÁLY A JEJICH VLASTNOSTI

### 2.1 Pórovité materiály

Látky pohlcující zvuk mají převážně porézní a vláknitou strukturu. Pohltivé respektive pórovité materiály jsou významným prostředkem k řešení akustických problémů uzavřených prostorů. V pórovitých materiálech jako jsou polyuretanové pěny, skleněná a minerální vlákna, pórovité sádry apod. dochází při dopadu akustické energie z velké části k jejímu pohlcení a přeměně na jiný druh energie, zpravidla teplo. Použitím pohltivého materiálu nebo pohltivé konstrukce se sníží hladina akustického tlaku, protože se pohlcením sníží zvuková energie odrážejících se vln do prostoru. Tento jev je v praxi značně důležitý, protože jsme schopni prostřednictvím pohltivosti upravit dobu dozvuku v referenčních místnostech jako jsou divadla a kinosály, kde vhodnou úpravou a rozmístěním zdrojů zvuku jsme schopni dosáhnout prostorového zvuku pro lepší smyslový prožitek.

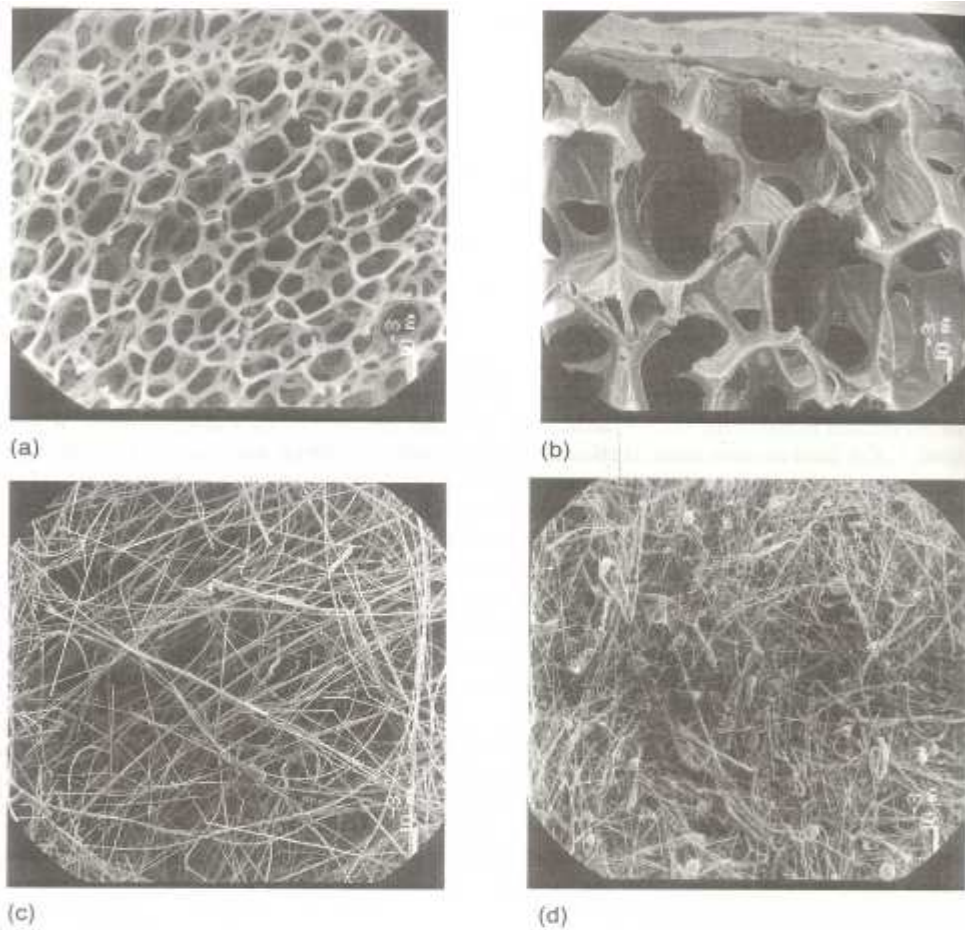
V porézních látkách dochází k nevratné přeměně zvukové energie v tepelnou třemi základními způsoby a to:

- Třením
- Relaxací akustického tlaku
- Nepružnou deformací

K přeměně akustické energie vlivem tření dochází při pohybu částic vzduchu póry pohltivého materiálu. Množství pohlcené akustické energie závisí na rozměrech a distribuci pórů a v neposlední řadě na tloušťce vzorku. Struktura vláknitých materiálů je především tvořena velkým množstvím propojených kanálků, pórů a štěrbin, které způsobí kolísání průtoku plynu uvnitř těchto „mezer“, a navíc se vytvoří viskózní a tepelné rozhraní na povrchu těchto stěn. Velikost kanálků v příčném řezu vztahující se k tloušťce rozhraní vrstev, ovlivní akustické chování tekutiny, který obsahuje. Kanálky u většiny pórovitých materiálů mají velmi složité tvary viz (Obr. 9.). Styčné plochy mezi částicemi vzduchu a materiálem jsou u pórovitých materiálů poměrně velké, a proto dochází k značné přeměně kinetické energie zvukových vln na teplo. [2]

K relaxaci akustického tlaku v daném místě může dojít různými způsoby. Šíří-li se zvuková vlna látkou, nastane v místech zhuštění částic vzduchu v pórech zvýšení akustic-

kého tlaku a tím i ke zvýšení teploty. Pokud soustava pórů není od kostry materiálu tepelně izolována, přejde teplo ze vzduchu do kostry. Přejdem tepla dojde ke snížení teploty vzduchu a tím i k poklesu tlaku, jemuž odpovídá snížení potenciální energie zvukové vlny. Jiný způsob relaxace tlaku nastane, když se zvuk šíří kostrou materiálu. V místech, kde je menší průřez kostry se zvýší teplota a pokud látka dobře vede teplo, dojde k tepelné výměně mezi materiálem a okolím, a tím opět dojde ke snížení akustického tlaku.



Obr. 5. Typy pórovitých materiálů

- a) zcela síťované plastické pěny    b) částečně síťované plastické pěny  
 c) skleněná vlákna (chomáč)    d) minerální vlákna o hustotě  $96 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$

Polyuretanové pěny je vhodné použít v místech, kde není nebezpečí požáru. Naproti tomu vláknité materiály můžeme použít v oblastech se zvýšenou teplotou. [9,10]

## 2.2 Makroskopické fyzikální vlastnosti pórovitých absorbujících materiálů

Z praktického hlediska je nemožné předpovídat chování většiny zvukově absorpčních materiálů jen na základě teoretických modelů, protože není dostatečně popsána jejich geometrie a strukturní složitost. Komerční softwary pro modelování vibroakustických polí v póroelastických materiálech jsou sice k dispozici, ale je nutno důkladně stanovit vstupní a empirická data, což vyžaduje značnou zkušenost. Mnoho experimentálních studií zabývajících se chováním běžných zvukově absorpčních materiálů ukazují, že jsou zde 3 parametry, které ovlivňují jejich zvukově absorpční charakteristiky. [10]

Jedná se o veličiny:

- 1) Pórovitost
- 2) Měrný odpor a odpor proti toku
- 3) Strukturní faktor

ad1) Pórovitost nebo též poréznost vzorku je definována jako objem pórů  $V_p$  vztažený k celkovému objemu materiálu  $V_c$ :

$$P = \frac{V_p}{V_c} * 100\% , \quad (16)$$

Za pórovité považujeme ty látky, u kterých je poréznost minimálně 60%. [2]

ad2) U všech běžných tvarů zvukově pohltivých materiálů, převládají viskózní tekutinové síly nad setrvačnými silami u frekvencí od 20 do několik 1000 Hz. Viskózní odpor vynaložený materiálem způsobuje při nízkých frekvencích ve směru oscilačního toku vytvoření „cestiček“ pomalou rychlostí. Tento odpor se v praxi měří foukáním vzduchu na plochu pórovité stěny. Viskózní odpor proti stabilnímu průchodu vzduchu je úměrný rychlosti vzduchu a nepřímo úměrný tloušťce vzorku. Pro velmi objemné materiály je proto vhodné odpor toku definovat jako stabilní tlakový rozdíl  $\Delta p$  přes plochu vzorku, vztaženou na průměrnou rychlost částice na jednotku plochy. Proces je možno definovat vztahem:

$$\sigma = \frac{\Delta p}{u' \cdot t} = \frac{(\partial p / \partial x)}{u'} , \quad (17)$$



kde:  $\Delta p$  - tlaková diference na koncích vzorku

$u'$  - střední rychlost částic zvuku v jednotce plochy

$t$  - tloušťka vzorku

Odpor toku plochy materiálu tloušťky vzorku je dán výrazem  $\sigma t$ . [10]

ad3) Viskózně-tepelné jevy změny účinnou hustotu a stlačitelnost plynu konajícího oscilační pohyb uvnitř tuhé kostry ve volném objemu. Viskózní napětí vytvořené oscilačním tokem je stanovené jako hlavní disipativní činitel. Je zřejmé, že rychlost zvuku uvnitř absorbujícího materiálu bude působit na tyto rozdíly. Fázová rychlost je vždy menší než rychlost volné vlny. Tato vlastnost má zásadní vliv na zvukovou absorpci pórovitými plochami připevněnými na reflexním povrchu, protože vykazují absorpční maxima a minima při akustické rezonanci a antirezonančních frekvencích, které souhlasí s lichým násobkem  $\frac{1}{4}$  vlnové délky a vícenásobně s  $\frac{1}{2}$  vlnové délky zvuku šířícího se přes pórovitý materiál. [10] Různé vlivy geometrického tvaru kostry na skutečnou hustotu a stlačitelnost jsou shrnuty společně do strukturního faktoru, který označuje skutečnou hustotu prostředí číslem v jeho objemu. Jeho hodnota se dá určit přímo ze vztahu:

$$\kappa = P^2 \cdot \text{Re} \left\{ \left( \frac{Z_a}{Z_0} \right)^2 \right\}, \quad (18)$$

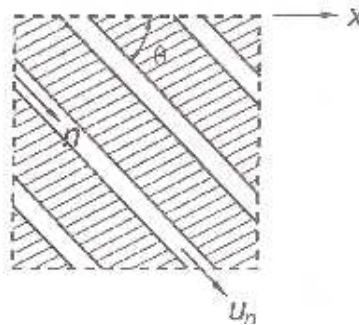
kde:  $Z_0$  - charakteristická impedance plynu (obsaženého v objemu vzorku),  $Z_a$  - komplexní charakteristická impedance,  $\text{Re}$  – Reynoldsovo číslo,  $P$  – pórovitost. [7]

Různé geometrické vlastnosti přispívají ke strukturnímu faktoru následovně:

- náhlé změny v příčném průřezu vzorku způsobí ve spojeních mezi dutinkami a kanálky přítomnost oscilačního toku, a tím dojde v těchto místech ke zvýšení hustoty plynu.
- kanálky, které jsou orientované pod úhlem  $\theta$ , ve směru šířící se vlny, vyvolají tlakový gradient ve směru šířící se vlny, který je větší než podél osy kanálku viz (Obr. 6.).

Kombinací efektů těchto faktorů je vytvoření strukturního faktoru, který inklinuje k hodnotám 1,2 – 2,3 pro zcela síťované pórovité plasty a vláknité materiály. Může dosáhnout

nout podstatně větších hodnot pro částečně síťované pěny, pórovité plasty a sádrové desky. Tento faktor klesá se vzrůstající frekvencí a nabývá hodnot v rozmezí  $\kappa = 6$  až 1.

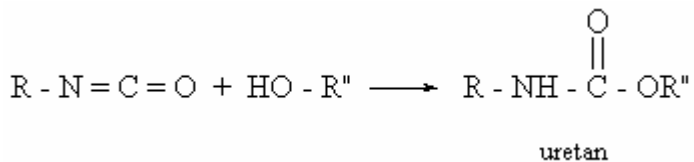


Obr. 6 Neaxiální orientace pórů

Nepravidelnost a různost směru kanálků je reprezentována křivostí materiálu, která je zjišťována ultrazvukovými transmisními měřeními. [10]

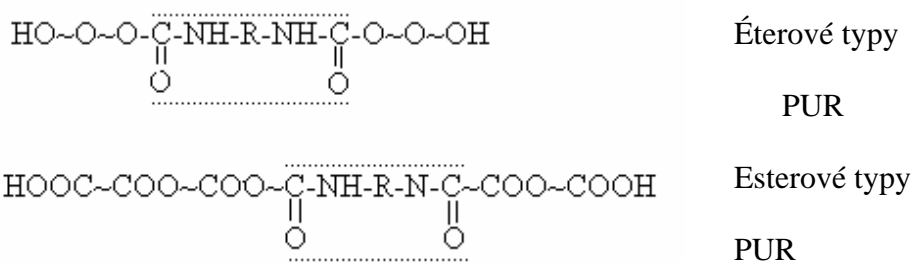
### 2.3 Polyuretany

Polyuretan je polymer, v jehož opakující se jednotce je uretanová vazba (-NH-COO-). Uretany (estery kyseliny karbamové) vznikají reakcí isokyanátů s alkoholy.



Tato hlavní růstová reakce je však často záměrně a samovolně doprovázena dalšími vedlejšími reakcemi, kterými vznikají jiné než uretanové strukturní jednotky.

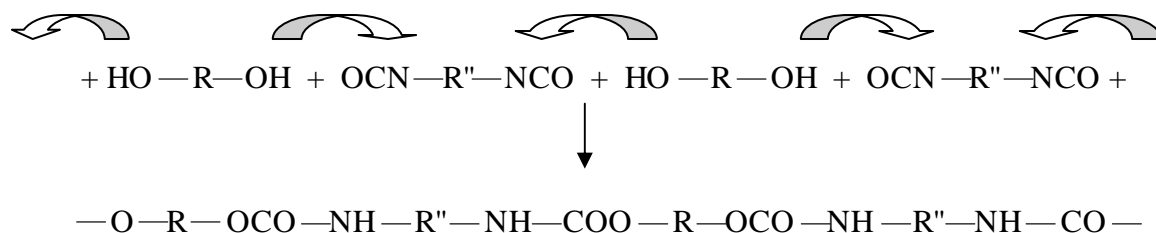
Reakcí vícefunkčních isokyanátů s polyalkoholy vznikají polyuretany, které obsahují tyto skupiny v hlavním řetězci. Druhou převažující složkou polyuretanů jsou nejčastěji polyglykoly a z nich pak vznikají:



Stavba a vlastnostmi polyuretanů leží mezi polymočoviny a polykarbonáty. Produkty z polyuretanů mají velmi rozdílnou povahu, protože vlastnosti závisí nejen na typu polyuretanové vazby, ale i na přítomnosti jiných skupin v řetězci, které způsobují síťování, krystalizaci, orientaci, ohebnost řetězců apod. Kombinací velkého množství polyalkoholů a polyisokyanátů je možno připravit produkty různých vlastností. Z hlediska přípravy uretanů je nejdůležitějším parametrem jejich funkčnost (počet isokyanátových skupin v molekule). Pokud je funkčnost isokyanátů vyšší než 2, je zajištěno dobré zesítnění uretanu. Isokyanáty s funkčností vyšší než 3, se používají pro speciální aplikace.

Nejjednodušší formou polyuretanu je forma lineární, pro jejíž výrobu byly použity jednoduché diisokyanáty a dioly. Lineárních polyuretanů se dá použít k výrobě vláken nebo štětín do kartáčů apod.

Schéma vzniku:



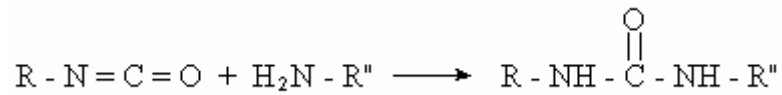
Většina polyuretanů je vyrobena ze tří základních stavebních bloků: polyolu (více-funkčního alkoholu polymerní povahy), diisokyanátu a síťovadla (např. triol).

Při výrobě polyuretanů se používají dva základní postupy: jednostupňový a dvoustupňový. Jednostupňovým postupem rozumíme smícháním všech složek reakční směsi najednou nebo příprava prepolymeru. U dvoustupňového postupu v prvním stupni reaguje polyol s diisokyanátem, čímž vznikne meziprodukt s koncovými  $-\text{NCO}-$  skupinami tzv. prepolymer a v druhém stupni reaguje prepolymer s extenderem a síťovadly za vzniku konečného produktu. V porovnání těchto dvou postupů dává lepší výsledky dvoustupňový postup, vzniká vulkanizát s lepšími vlastnostmi. [15,16]

### 2.3.1 Chemismus polyuretanů

Chemické reakce při výrobě polyuretanů:

- s aminy reagují za vzniku substituovaných močovín:

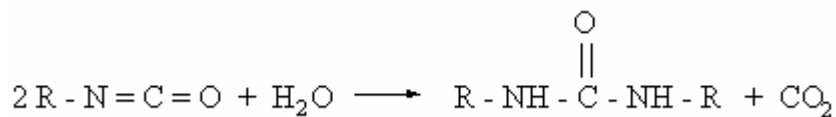


substituovaná močovina

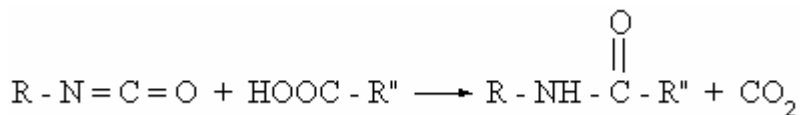
- s vodou za vzniku aminů a  $\text{CO}_2$ :



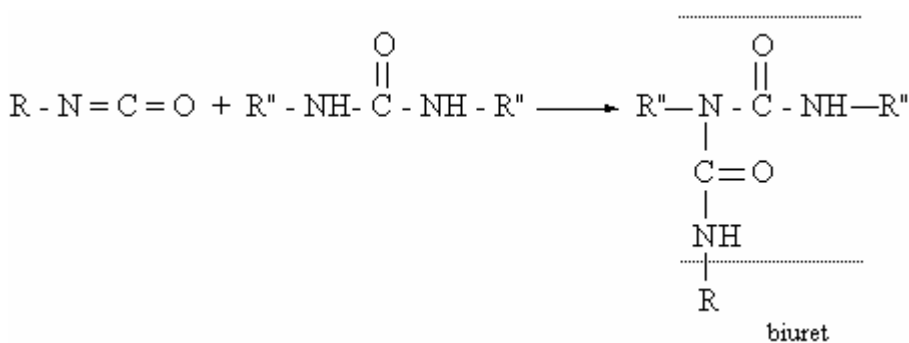
a vzniklý amin pak reaguje s další molekulou isokyanátu za vzniku disubstituované močoviny:



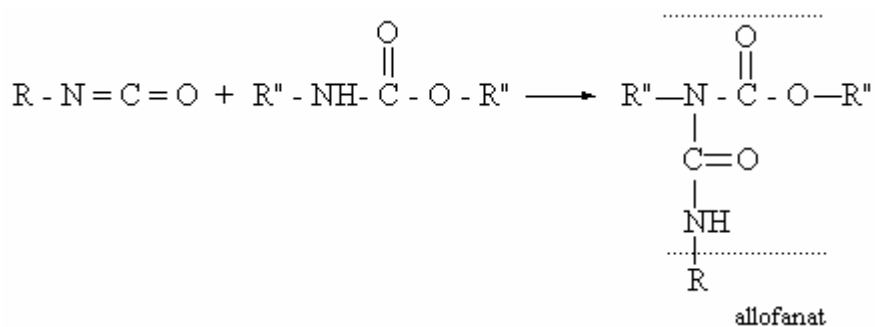
- s karboxylovými kyselinami za vzniku substituovaného amidu a  $\text{CO}_2$ :



- se substituovanou močovinou za vzniku N-substituovaného biuretu:



- s vodíkem uretanové skupiny za vzniku N-substituovaných esterů kyseliny allofanové:



Reaktivita pohyblivých vodíků však není stejná a klesá v řadě:

alifatické aminy > aromatické aminy > alifatické substituované močoviny > primární alkoholy > sekundární alkoholy > voda > fenoly > aromatické substituované močoviny. [4]

Tím je dána řada reakčních možností, ale z nich mají největší význam reakce polyhydroxyloučenin s diisokyanáty a polyisokyanáty. Nejreaktivnější jsou primární aminy, které jsou schopny reagovat s isokyanáty již ve vodném prostředí.

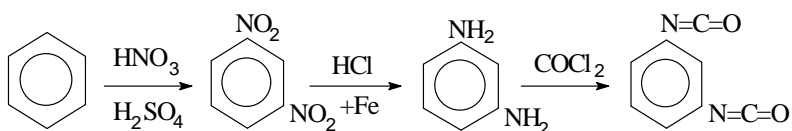
Ostatní reakce isokyanátů s hydroxyloučeninami je nutno provádět ve zcela bezvodém prostředí, neboť by došlo ke vzniku  $\text{CO}_2$  a k vytvoření močovinových vazeb.

Reakce isokyanátů s hydroxyloučeninami probíhají už při teplotě  $20^\circ\text{C}$  za silného uvolnění tepla ( $\sim 224\text{kJ/mol}$ ). Polyadici lze ještě urychlit přidávkou bazických sloučenin jako jsou terciární aminy (např. pyridin) nebo organokovovými sloučeninami (triethylendiaminem).

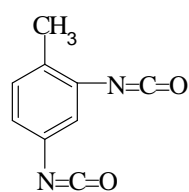
### 2.3.2 Výroba polyuretanů

*Monomery:* a) diisokyanáty – z 95% se používají aromatické (levnější a reaktivnější než alifatické).

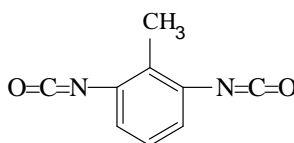
Typická příprava:



nejdůležitější typy:



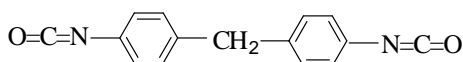
2,4 - izomer TDI



2,6 - izomer TDI

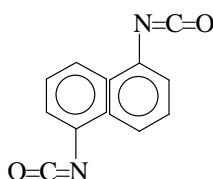
Toluendiisokyanát (TDI)

pro měkké pěny



Difenylnmetandiisokyanát (MDI)

pro tvrdé pěny



Diisokyanátonaftalen

pro mechanicky náročné výrobky

b) glykoly a polyglykoly – vyrábí se z etylenoxidu a propylenoxidu

c) hydroxypolyestery – získávají se polykondenzací glykolů s dikarboxylovými alifatickými kyselinami

Výroba polymeru se liší podle druhu výrobku:

- a) **měkké PUR pěny**: obsah diisokyanátů do 40% tvořenou směsí 2,4 a 2,6 toluendiisokyanátu a polyolu: 1) polyestery rozvětvené od kysel. adipové a dietylen-glykolu s přidavkem vody na vypěnění  
2) polyétery

*Způsob výroby*: Připravují se kontinuálně na zpěňovacích strojích se směšovací hlavou, do které se přivádí všechny složky včetně pomocných látek. Zde se za vysokých otáček připravuje homogenní kapalina, která se lije nejčastěji do forem, nebo na pás, zde proběhnou všechny reakce vedoucí k polymeru a napěnění v průběhu několika sekund, vzniklým CO<sub>2</sub> (reakcí vody s -NCO skupinou). Výrobek se z formy vyjímá až po několika desítkách minut. [15,16]

b) **tvrdé PUR pěny**: obsah diisokyanátů až 70%, hydroxylová složka je silně rozvětvená.

*Způsob výroby*: Po smíchání složek se roztok nalévá do uzavřených i otevřených forem. Zpravidla se postupuje dvoustupňově, nejprve se připraví předpolymer (má omezenou do-

bu skladovatelnosti), který se později vypěnuje po přidavku vodou ( je možno i fyzikálně přidavkem  $\text{CClF}_3$ ).

Měkké a tuhé PUR pěny se od sebe liší různou měrnou hmotností, strukturou pórů a mechanickými vlastnostmi. Měkké PUR pěny mají strukturu pěny s otevřenými a propojenými póry. Hodnota pórovitosti je tudíž značně vysoká, v dostupných pramenech se uvádí hodnoty od 90-99%. Naproti tomu tuhé PUR pěny mají hustější síť a větší obsah tuhých uretanových úseků v makromolekulách. Struktura pórů je uzavřená, tuhost řetězce je větší a pevnost pěny vzrůstá s měrnou hmotností. [4]

Polyuretany je možné využít k výrobě velké škály výrobků, a proto mají v průmyslu svůj velký význam. Jsme schopni vyrobit jak klasické polyuretanové pěny, tak i vlákna a filmy, dále eleastomery, lepidla, polyuretanové licí pryskyřice, nátěrové hmoty i pojiva. Nejrozšířenějším polyuretanovým výrobkem jsou polyuretany pěnové. Používají se jako izolační materiály, jejichž objemová hmotnost se pohybuje v rozmezí 20-80  $\text{kg/m}^3$ . Velkou výhodou pěnového polyuretanu spočívá v tom, že se dá napěňovat přímo na staveništi a kopírovat tak složité tvary konstrukce. Pěna je krátkodobě odolná při teplotě až 250°C.

Produkty mají velké uplatnění v chemii při čistění technických kapalin pro výrobu filtrů, pro výrobu cigaretových filtrů na bázi PUR drtě atd. Výhodou polyuretanů je dobrá odolnost proti běžným chemickým látkám. Nevýhoda spočívá v tom, že pěnový polyuretan obsahuje isokyanátovou složku, která je jedovatá, a proto při výrobě je třeba pracovat s ochrannými pomůckami, protože při styku s kůží isokyanát leptá lidskou tkáň. [4]

### 3 STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem této diplomové práce je změřit vibroakustické vlastnosti měkkých lehčených polyuretanů distribuované firmou Gumotex. Trendem poslední doby je hledání materiálů se stále lepšími vibroakustickými vlastnostmi, protože jejich použití přispěje k zlepšení životního prostředí a k ochraně osob proti hluku a vibracím.

Pro zjišťování akustických vlastností vzorků byla měřena hodnota činitele zvukové pohltivosti, jehož hodnota má pro použití výrobků v praxi rozhodující význam. Měří se pomocí dvoumikrofonové impedanční trubice pro kolmý dopad vln. Tato metoda je relativně přesná a hlavně rychlá, a proto v praxi často používaná.

Při zjišťování vibračních vlastností především přenosového útlumu materiálu, bylo použito metody nucených kmitů, která je nejčastěji používanou metodou vibračních zkoušek.

Na základě objemové metody byla zjištěna pórovitost každého vzorku s následným vyhodnocením vlivu jak na absorpční koeficient tak přenosový útlum.

Na základě těchto měření je třeba vyhodnotit nejlepší resp. nejhorší vzorek při dané pórovitosti, pro oblast použití v technické praxi. Nutné je třeba také porovnat jak se od sebe liší vlastnosti jednotlivých polyuretanů navzájem a v porovnání s recyklátem.



## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

V experimentální části bylo různými postupy připraveno a měřeno 35 vzorků polyuretanů. Vzorky jsou od výrobce dodávány ve formě bloků o třech různých tloušťkách a to 2, 3 a 5 cm. Pro měření absorpčního koeficientu bylo použito 15 vzorků ve tvaru válců, pro přenosový útlum též 15 vzorků ve kvádru a pro měření pórovitosti 5 vzorků ve tvaru kvádrů.

### 4.1 Vlastnosti vzorků polyuretanů

Vlastnosti jednotlivých vzorků polyuretanů udané výrobcem jsou shrnuty v (Tab.1.). Jednotlivé názvy typů vzorků jsou složeny z hodnot objemové hmotnosti a odporu proti stlačení.

Tab. 1. Parametry komerčních vzorků

| Materiál | Barva    | Objemová hmotnost [kg.m <sup>-3</sup> ] | Odpor proti stlačení [kPa] | Pevnost v tahu [kPa] | Tažnost [%] | Trvalá deformace [%] |
|----------|----------|---|----------------------------|----------------------|-------------|----------------------|
| S3535F   | Šedá     | 35                                      | 3,5                        | 130                  | 190         | 2                    |
| N2130    | Bílá     | 21                                      | 3,0                        | 150                  | 230         | 2,1                  |
| N2538    | Oranžová | 25                                      | 3,8                        | 150                  | 230         | 2,5                  |
| N2529    | Zelená   | 25                                      | 2,9                        | 160                  | 290         | 2,5                  |
| RE80*    | -        | 80 ± 10%                                | 9,5 ± 2,5                  | 50                   | -           | 10                   |

Popis charakteru jednotlivých typů vzorků:

Speciální typy - *MOLITAN*<sup>®</sup> S

Pěny se speciální úpravou. Imitace mořské houby - využití ve spotřebním průmyslu. Pěny se sníženou hořlavostí - využití v automobilovém průmyslu a jako zvukové izolace.

Standardní typy *MOLITAN*<sup>®</sup> N

Pěny o objemové hmotnosti v rozmezí 18 - 30 kg/m<sup>3</sup>. Používají se pro výrobu čalouněného nábytku a matrací, dále jako výplňový materiál, zvukové izolace a také v obalové technice.

Recyklované typy *MOLITAN<sup>®</sup> RE*

ve formě bloků, desek, přířezů a tvarovek o objemové hmotnosti 40 - 230 kg/m<sup>3</sup>. Vyrábí se pojením polyuretanové drtě, ale může obsahovat i částice s jutovou nebo jinou textilií, papírem, pogumovaným textilem, nebo pěnovou pryží podle požadovaných vlastností. Tento materiál se lehce zpracovává, dá se řezat a lepit kaučukovými, disperzními a tavnými lepidly a v případě potřeby je zpětně recyklovatelný. Použití v nábytkářském průmyslu - výroba matrací, čalounictví, výroba sportovních žíněnek, zvukové a tepelné izolace, obalový materiál ve sklářském průmyslu podložky do stájí a kravínů, podložky pro hydroponní pěstování rostlin, ochranné bariéry závodních tratí apod.

## 4.2 Příprava vzorků

### 4.2.1 Vzorky pro měření pohltivosti

Vzorky koupené od výrobce byly pro měření nepoužitelné, protože výrobce je distribuuje pouze ve formě kusých bloků. Proto musely být jednotlivé vzorky pro měření získány vyřezáním pomocí ručního lisu. Nejprve byla mezi čelisti lisu vsunuta plastová podložka z důvodu lepšího odřezání vzorku. Na ni byl umístěn vzorek s přiloženým ostrým hrotem duté ocelové formy ve tvaru válce a ručním pohonem bylo provedeno zalisování. Byly použity formy dvou rozměrů, které odpovídají průměrům malé a velké trubice ( $d_m = 30$  mm a  $d_v = 100$  mm). Tímto postupem bylo připraveno 15 vzorků tří různých tloušťek pro malou a velkou trubici viz (Obr. 7.).



Obr. 7. Typy formy a ruční lis

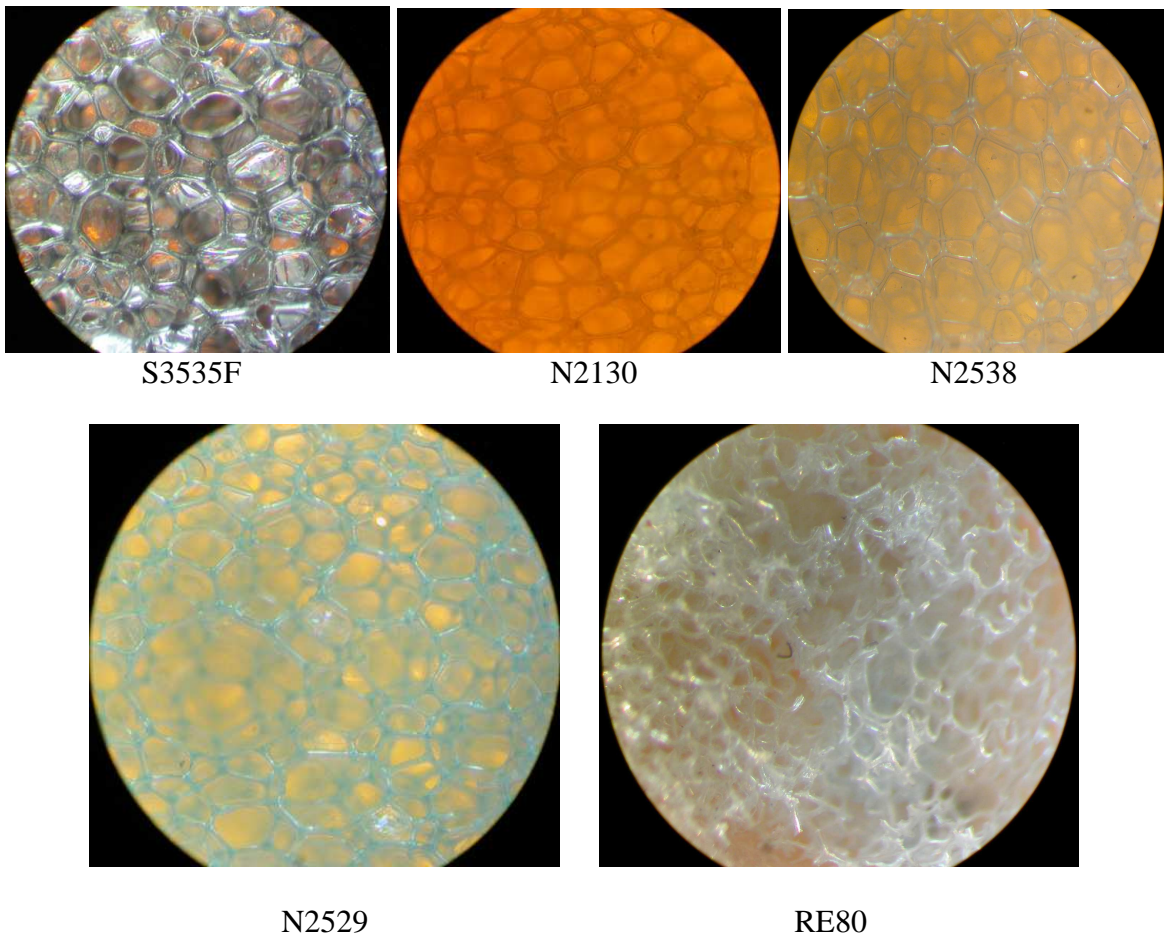
#### 4.2.2 Vzorky pro měření přenosového útlumu

Vzorky byly z jednotlivých bloků vyřezány ručně pomocí skalpelu. Půdorysné rozměry vzorku jsou (6x6) cm. Třetí rozměr tvoří tloušťka vzorku v cm. Bylo nutné zvážit nejen každý vzorek, ale i jednotlivé čelisti a hmotnosti zátěže.

#### 4.2.3 Vzorky pro měření pórovitosti

Vzorky byly vyřezány z jednotlivých bloků pomocí skalpelu ve tvaru kvádrů o rozměrech (7,3 x 11,3 x 2)cm, který odpovídá rozměrům skleněné formy, ve které je vzorek při měření umístěn. Byla zvolena nejmenší tloušťka vzorku  $t = 2$  cm ze dvou důvodů, jednak aby měření proběhlo co nejdříve a aby nedocházelo k přehřívání vývěvy.

Pro ukázkou je zde detailní náhled na jednotlivé vzorky pod mikroskopem.



Obr. 8. Vzorky pod mikroskopem se 40ti násobným zvětšením.

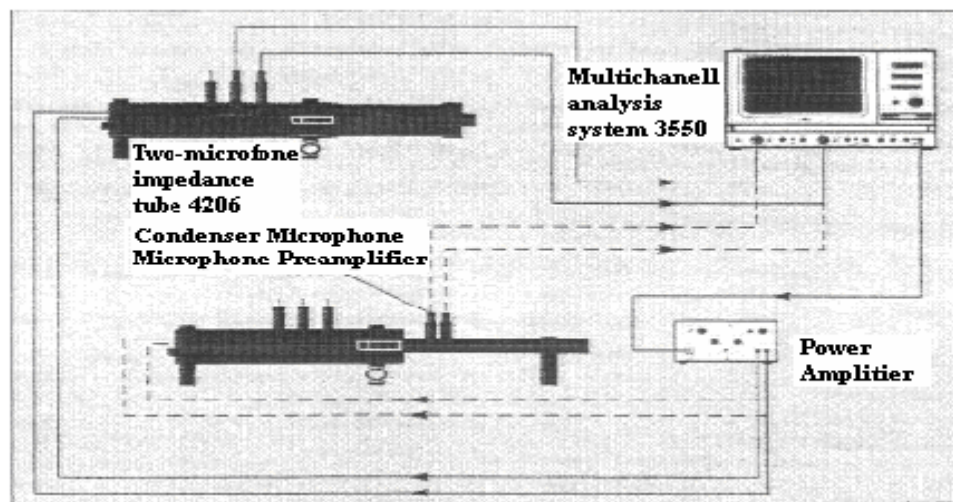
### 4.3 Měření činitele zvukové pohltivosti

#### 4.3.1 Popis zařízení

Pro měření činitele zvukové pohltivosti  $\alpha$  byla použita dvoumikrofonová impedanční trubice, která se používá k analýze stojatých vln ve frekvenčním rozsahu 16 Hz až 6,3 kHz.

Skládá se z:

- Velké měřicí trubice pro měření v oblasti 16 Hz až 1,6 kHz, která je vybavena obvodem pro vyvažování frekvence, zdrojem zvuku a 3 pozicemi pro montáž mikrofonů.
- Malé měřicí trubice pro měření v oblasti 16 Hz až 6,3 kHz, se dvěmi pozicemi pro montáž mikrofonů. Tato trubice se montuje přímo na otevřený konec velké měřicí trubice.
- Malý a velký držák vzorku, každý s akusticky tvrdou zadní deskou spojenou s pohyblivým pístem.
- Trubicemi pro nastavení, sloužící k vytvoření vhodných akustických podmínek pro speciální měření.



Obr. 9. Zapojení s velkou a malou měřicí trubicí

Sestava dále obsahuje dvoukanálový analyzátor B&K 2034 a zesilovač B&K 2706 viz (Obr. 9.). Pro snazší obsluhu analyzátoru a zpracování dat je k analyzátoru připojen PC s aplikačním softwarem BZ 5050, kde se spouští aplikace a ukládají jednotlivé kalibrace a měření.

### 4.3.2 Postup měření

Před měřením je nutno provést kalibraci!

#### *Kalibrace*

V prvním kroku spustíme PC, dvoukanálový analyzátor a zesilovače. Při nabíhání systému v PC zvolíme možnost 2.GHIP, která dovoluje systému detekovat a zavést ovladače pro kartu PCII/PCIIA, díky které je zajištěna komunikace mezi PC a analyzátozem. Je také nahráván jazyk používaný touto kartou.

V druhém kroku nastavíme analyzátor pomocí aplikačního softwaru BZ 5050, který je universální prostředek pro analýzu dat. Je umístěn v adresáři D:\ BZ5050, ve kterém jsou nahrány spouštěcí programy pro velkou trubici s názvem souboru *velkatr.bat* a pro malou trubici *malatr.bat*.

Ve třetím kroku kliknutím na jednu z těchto ikon se nám otevře dialogové okno programu BZ5050. Dále je třeba provést nastavení prostředí, ve kterém je měření prováděno. K tomu slouží položka SET UP a následně příkaz Small tube standard nebo Large tube standard. Analyzátor a software jsou v této fázi připraveny k měření.

Ve čtvrtém kroku vložíme do Kundtovy trubice kalibrační standard a pomocí pístu se umístí tak, aby mezi jeho zadní stěnou a pístem nebyl žádný volný prostor a zároveň aby čelní stěna byla v rovině s vnitřní hranou držáku vzorku.

V pátém kroku se provede vlastní kalibrace pomocí funkční klávesy F3 – Calibration. Během kalibrace je funkce frekvenční odezvy vypočítána pro mikrofony ve vzájemně změněných pozicích a pak opět pro standardní osazení. Slouží k eliminaci možných chyb vzniklých při měření.

Je nutno provést tyto kroky:

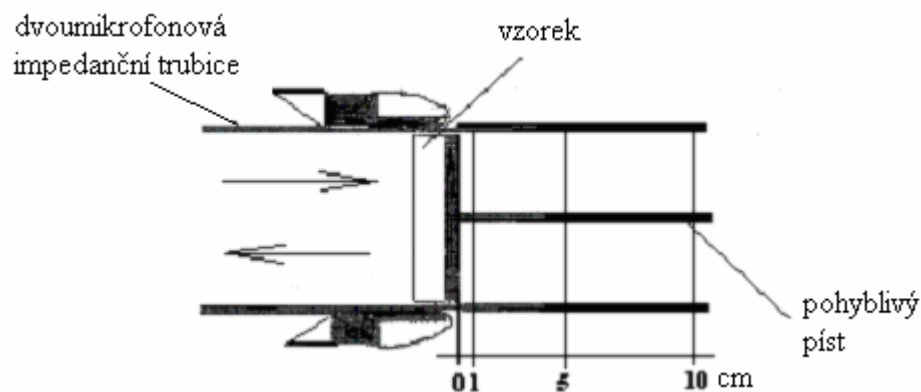
- Záměna pozice mikrofónů A a B
- Nastavení filtru na trubici
- Nastavení hladiny signálu
- Nastavení počtu průměrování
- Záměna pozice mikrofónů A a B

Výsledek kalibrace se pak uloží do souboru BZ5050 s příponou \*.cal.

System je nakalibrován a připraven k měření.

#### Vlastní měření

1) Po kalibraci se kalibrační vzorek z trubice vyjme a je nahrazen měřeným vzorkem. Vzorek musí být umístěn na osu trubice, doléhat na stěny trubice a píst. Nedodržení těchto zásad způsobuje chyby měření, protože dochází k nežádoucím odrazům a rezonancím. Při měření však bylo záměrně využito tohoto postupu, abych věděl jak se mění hodnoty absorpčního koeficientu, když píst je v trubici od vzorku vzdálen 1, 5 a 10 cm a hodnoty porovnány se vzdáleností 0cm, kdy píst je těsně u vzorku viz (Obr. 8.).



Obr. 10. Metodika měření

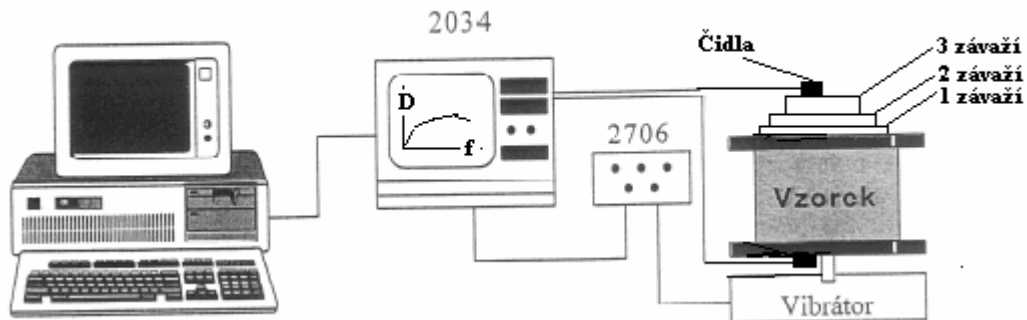
2) Na trubici je nutno zkontrolovat pozici přepínače pro vyvážení frekvencí (Linear pro velkou trubici a High-pass pro malou trubici) a pozici mikrofonů.

3) Samotné měření je zahájeno funkční klávesou *F4 –Measurement*. Probíhá samo a po skončení sekvence následuje uložení souboru s příponou \*.ttm. Maximálně můžeme do zásobníku tzv. bufferu uložit 6 souborů. Ukládání se děje pomocí menu Library a dále pak Save results. Uložené formáty musíme převést do textového souboru příkazem Print/Select buffers/Output destination/ASCII file, abychom je mohly naimportovat do programu MS Office (např. Excel) za účelem vyhodnocení.

## 4.4 Měření přenosového útlumu

### 4.4.1 Popis zařízení

Pro měření je využito analyzátoru B&K 2034, tentokrát ve spojení s vibrátorem 4810 a akcelerometry. Pro registraci a zpracování dat je opět využito PC viz (Obr. 11.).



Obr. 11. Schéma měřící aparatury

### 4.4.2 Postup měření

1) Zapneme dvoukanálový analyzátor, zesilovač a PC a zvolíme volbu 2.GPIB. V adresáři D:\Kmity klikneme na ikonu vibr1.bat. Po spuštění se program zeptá na připravenost analyzátoru a oznámí správné pozice čidel pro jednotlivé kanály.

2) V dalším kroku musíme zadat parametry aparatury. Je možné nastavit jak parametry aparatury, analyzátoru tak i obrazovky analyzátoru. Tento proces přeskočíme trojitým zmáčknutím ESC a objeví se tabulka nastavení vlastností čidel, ve které se pohybujeme pomocí ENTER a obsah měníme pomocí šipek. Do prvního pole zadáme takové označení, které odpovídá koncovému dvojčíslí sériového čísla akcelerometrů pro daný kanál (tedy acc60). Dále je nutné zadat orientaci – pro kanál A(-) a pro kanál B(+).

3) Byly zadány parametry vzorku a požadavky na měření. Důležitým parametrem je zvolení frekvenčního rozsahu měření v intervalu od (50 ÷ 2000) Hz s krokem 25 Hz.

4) Spuštění měření, při kterém je někdy nutné provádět změny amplitud tak, aby odezva akcelerometrů byla dostatečná a aby nedocházelo k přetížení vibrátoru. Amplitudu je možné upravovat pomocí ovládacích prvků SIGNAL GENERAL AMPLITUDE na analyzátoru nebo prvkem GAIN CONTROL na zesilovači.

5) Při měření vzorků bylo postupováno následovně:



1. měření – bez zátěže

2. měření na horní část vzorku byla přilepena vrchní čelist s přiloženým čidlem.

3. měření – na horní čelist bylo přidáno první závaží s přiloženým čidlem.

4. měření – k prvnímu závaží bylo přidáno druhé závaží s přiloženým čidlem.

5. měření - k prvnímu a druhému závaží bylo přidáno závaží třetí s přiloženým čidlem (hodnoty jednotlivých zátěží jsou uvedeny v Tab. 2.).

6) Jednotlivá měření byla ukládána s příponou \*.res, která byla převedena na soubory typu \*.dat (pro přenesení do Excelu), pomocí souboru vibr\_res.exe.

Tab. 2. Hmotnosti jednotlivých zátěží

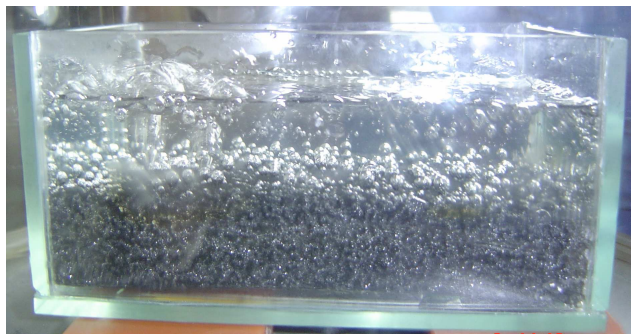
| číslo závaží | hmotnost v [g] |       |       |       |       |
|--------------|----------------|-------|-------|-------|-------|
|              | S3535F         | N2130 | N2538 | N2529 | RE80  |
| M0           | 0              | 0     | 0     | 0     | 0     |
| M1           | 85,2           | 83,7  | 85,2  | 83,9  | 85,6  |
| M2           | 106,0          | 104,5 | 106,0 | 104,7 | 106,4 |
| M3           | 235,9          | 234,4 | 235,9 | 234,6 | 236,3 |
| M4           | 498,6          | 497,1 | 498,6 | 497,3 | 499,0 |

## 4.5 Měření pórovitosti

### 4.5.1 Objemová metoda

V tomto případě byla pórovitost měřena prostřednictvím změny hmotnosti s následným přepočtem na obj.%, ve kterých je pórovitost definována. Zvážený suchý vzorek byl ponořen do měřicí nádoby s vodou. Voda difundovala při občasném stlačení dovnitř vzorku po dobu 24 hodin, aby byl co nejvíce odstraněn vzduch s pórů. Zbýlý vzduch ve vzorcích byl vysán pomocí rotační olejové vývěvy při maximálním podtlaku 100 kPa viz (Obr.12.). Doba evakuace se u jednotlivých vzorků pohybovala okolo 2 hodin. Měření bylo ukončeno právě tehdy, když se 1 min neuvolnila žádná vzduchová bublina, z důvodu značného zahřívání vývěvy. Po vyjmutí vzorku z podtlakové komory byla zbytková voda vysána jehlou stříkačky po vnitřní plochu vzorku a vzorek s vodou byl zvážen.

Podle normy se nepostupovalo, protože by bylo zapotřebí speciální normované nádoby, technické váhy se zavěšením klece a měření jednoho vzorku by trvalo týden.



Obr. 12. Detail vzorku a rotační olejová vývěva

Tab. 3. Naměřené hodnoty pórovitosti

| Materiál | $m_1$ [g] | $P_1$ [obj. %] | $m_2$ [g] | $P_2$ [obj. %] | $m_3$ [g] | $P_3$ [obj. %] | $\bar{P}$ [obj. %] |
|----------|-----------|----------------|-----------|----------------|-----------|----------------|--------------------|
| S3535F   | 158,8     | 96,4           | 159,0     | 96,5           | 158,8     | 96,4           | 96,4               |
| N2130    | 159,1     | 96,6           | 159,0     | 96,5           | 159,1     | 96,6           | 96,6               |
| N2538    | 159,3     | 96,7           | 159,3     | 96,8           | 159,4     | 96,7           | 96,7               |
| Pena     | 155,0     | 99,1           | 154,9     | 99,0           | 155,1     | 99,1           | 99,1               |
| RE80     | 141,4     | 85,8           | 141,3     | 85,8           | 141,1     | 85,6           | 85,8               |

$m_{1,2,3}$  – hmotnosti vody při jednotlivých měřeních

$P_{1,2,3}$  – vypočtené hodnoty pórovitosti

$\bar{P}$  – průměrná hodnota pórovitosti získaná ze 3 měření

Použité vzorce: pro hmotnost vody:  $m_{H_2O} + m_s = m_v \rightarrow m_{H_2O} = m_v - m_s$

$$\text{pro objem vody: } \rho_{H_2O(20^\circ C)} = \frac{m_{H_2O}}{V_{H_2O}} \rightarrow V_{H_2O} = \frac{m_{H_2O}}{\rho_{H_2O(20^\circ C)}} = \frac{m_v - m_{PUR}}{\rho_{H_2O(20^\circ C)}}$$

$$\text{celkový objem: } V_t = a \cdot b \cdot c \quad [cm^3]$$

$$\text{Pórovitost: } P = \frac{V_{H_2O}}{V_t} 100\%$$

kde:  $m_s$  - hmotnost suchého vzorku v [g],  $m_v$  - hmotnost  $H_2O$  + vzorek v [g],

$m_{H_2O}$  - hmotnost vody v [g],  $\rho_{H_2O(20^\circ C)}$  - hustota vody při  $20^\circ C$  [0,9982 g/cm<sup>3</sup>]

$V_{H_2O}$  - objem vody v [cm<sup>3</sup>],  $V_t$  - celkový objem vzorku daný rozměrem nádoby v [cm<sup>3</sup>]

Příklad výpočtu pórovitosti pro vzorek RE80:

$$\text{Objem vody: } V_{H_2O} = \frac{m_{H_2O}}{\rho_{H_2O(20^\circ C)}} = \frac{141,4}{0,9982} = 141,65 \text{ cm}^3$$

$$\text{Celkový objem: } V_t = 7,3 \cdot 11,3 \cdot 2,0 = 164,98 \text{ cm}^3$$

$$\text{Výpočet pórovitosti: } P = \frac{V_{H_2O}}{V_t} 100\% = \frac{141,65}{164,98} 100\% = 85,8\%$$

## 4.6 Výsledky měření a jejich grafické zpracování

### 4.6.1 Činitel zvukové pohltivosti

Měření jednotlivých vzorků v celém frekvenčním pásmu se provádí ve dvou fázích, kterými získáme dvě závislosti. Výslednou závislost dostaneme tak, že spojíme obě frekvenční křivky do jedné. Pro nízké kmitočty bereme za správné hodnoty změřené z velké trubice a pro vysoké kmitočty bereme za správné hodnoty z malé trubice. Výsledná křivka popisuje závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci od 16 Hz do 6,3 kHz. Při nízkých frekvencích jsou hodnoty značně nespolehlivé, a proto za správné bereme hodnoty až od 50 Hz výše, ale i přes to jsou v grafu zahrnuty.

Pro ukázkou je zde vložena tabulka naměřených hodnot pro vzorek N2529.

Tab. 4. Hodnoty činitele zvukové pohltivosti pro vzorek N2529

| N2529 | 20*      | 21       | 25       | 210      | 30       | 31       | 35       | 310      | 50       | 51       | 55       | 510      |
|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| f     | $\alpha$ | $\alpha$ | $\alpha$ | $\alpha$ | $\alpha$ | $\alpha$ | $\alpha$ | $\alpha$ | $\alpha$ | $\alpha$ | $\alpha$ | $\alpha$ |
| [Hz]  | [ - ]    | [ - ]    | [ - ]    | [ - ]    | [ - ]    | [ - ]    | [ - ]    | [ - ]    | [ - ]    | [ - ]    | [ - ]    | [ - ]    |
| 16    | 0,000    | 0,000    | 0,021    | 0,366    | 0,001    | 0,058    | 0,000    | 0,000    | 0,000    | 0,000    | 0,000    | 0,088    |
| 20    | 0,017    | 0,108    | 0,000    | 0,092    | 0,035    | 0,000    | 0,089    | 0,037    | 0,020    | 0,000    | 0,038    | 0,072    |
| 25    | 0,010    | 0,033    | 0,010    | 0,167    | 0,000    | 0,067    | 0,020    | 0,040    | 0,001    | 0,009    | 0,030    | 0,050    |
| 31,5  | 0,000    | 0,109    | 0,033    | 0,092    | 0,004    | 0,061    | 0,048    | 0,000    | 0,000    | 0,035    | 0,066    | 0,036    |
| 40    | 0,007    | 0,022    | 0,033    | 0,044    | 0,010    | 0,010    | 0,032    | 0,039    | 0,036    | 0,021    | 0,052    | 0,059    |
| 50    | 0,014    | 0,030    | 0,023    | 0,053    | 0,039    | 0,036    | 0,029    | 0,014    | 0,021    | 0,022    | 0,066    | 0,124    |
| 63    | 0,012    | 0,010    | 0,017    | 0,072    | 0,043    | 0,027    | 0,033    | 0,066    | 0,037    | 0,041    | 0,082    | 0,294    |
| 80    | 0,015    | 0,031    | 0,026    | 0,081    | 0,039    | 0,046    | 0,041    | 0,073    | 0,042    | 0,051    | 0,116    | 0,566    |
| 100   | 0,022    | 0,035    | 0,039    | 0,094    | 0,037    | 0,046    | 0,056    | 0,107    | 0,067    | 0,077    | 0,290    | 0,637    |
| 125   | 0,024    | 0,039    | 0,051    | 0,100    | 0,048    | 0,055    | 0,080    | 0,151    | 0,093    | 0,111    | 0,460    | 0,690    |
| 160   | 0,040    | 0,050    | 0,070    | 0,195    | 0,065    | 0,073    | 0,120    | 0,331    | 0,135    | 0,231    | 0,518    | 0,722    |
| 200   | 0,045    | 0,053    | 0,074    | 0,250    | 0,071    | 0,088    | 0,206    | 0,474    | 0,193    | 0,329    | 0,641    | 0,791    |
| 250   | 0,057    | 0,069    | 0,165    | 0,350    | 0,085    | 0,124    | 0,274    | 0,635    | 0,293    | 0,460    | 0,765    | 0,821    |
| 315   | 0,065    | 0,086    | 0,228    | 0,474    | 0,102    | 0,163    | 0,387    | 0,812    | 0,404    | 0,606    | 0,824    | 0,795    |
| 400   | 0,099    | 0,110    | 0,330    | 0,624    | 0,134    | 0,233    | 0,557    | 0,940    | 0,567    | 0,762    | 0,814    | 0,733    |
| 500   | 0,113    | 0,145    | 0,470    | 0,751    | 0,168    | 0,334    | 0,759    | 0,972    | 0,736    | 0,850    | 0,754    | 0,665    |
| 630   | 0,138    | 0,198    | 0,636    | 0,809    | 0,228    | 0,491    | 0,924    | 0,912    | 0,821    | 0,832    | 0,698    | 0,625    |
| 800   | 0,172    | 0,294    | 0,811    | 0,800    | 0,330    | 0,704    | 0,993    | 0,801    | 0,841    | 0,819    | 0,721    | 0,674    |
| 1000  | 0,230    | 0,339    | 0,786    | 0,629    | 0,450    | 0,762    | 0,977    | 0,726    | 0,925    | 0,908    | 0,834    | 0,804    |
| 1250  | 0,312    | 0,474    | 0,716    | 0,360    | 0,507    | 0,900    | 0,772    | 0,429    | 0,900    | 0,801    | 0,729    | 0,823    |
| 1600  | 0,365    | 0,674    | 0,601    | 0,346    | 0,749    | 0,899    | 0,627    | 0,692    | 0,749    | 0,799    | 0,928    | 0,849    |
| 2000  | 0,519    | 0,815    | 0,459    | 0,785    | 0,924    | 0,773    | 0,557    | 0,767    | 0,806    | 0,923    | 0,850    | 0,903    |
| 2500  | 0,689    | 0,810    | 0,372    | 0,592    | 0,929    | 0,685    | 0,691    | 0,683    | 0,910    | 0,870    | 0,840    | 0,844    |
| 3150  | 0,788    | 0,694    | 0,675    | 0,608    | 0,809    | 0,711    | 0,904    | 0,846    | 0,874    | 0,876    | 0,903    | 0,902    |
| 4000  | 0,794    | 0,613    | 0,671    | 0,660    | 0,750    | 0,938    | 0,778    | 0,902    | 0,886    | 0,899    | 0,901    | 0,896    |
| 5000  | 0,754    | 0,669    | 0,734    | 0,778    | 0,854    | 0,911    | 0,945    | 0,882    | 0,884    | 0,905    | 0,912    | 0,912    |
| 6300  | 0,736    | 0,842    | 0,809    | 0,864    | 0,984    | 0,823    | 0,843    | 0,901    | 0,887    | 0,904    | 0,934    | 0,931    |

\* první číslice značí tloušťku vzorku  $t = 2\text{cm}$ , druhé posunutí pístu v trubici  $x = 0\text{cm}$

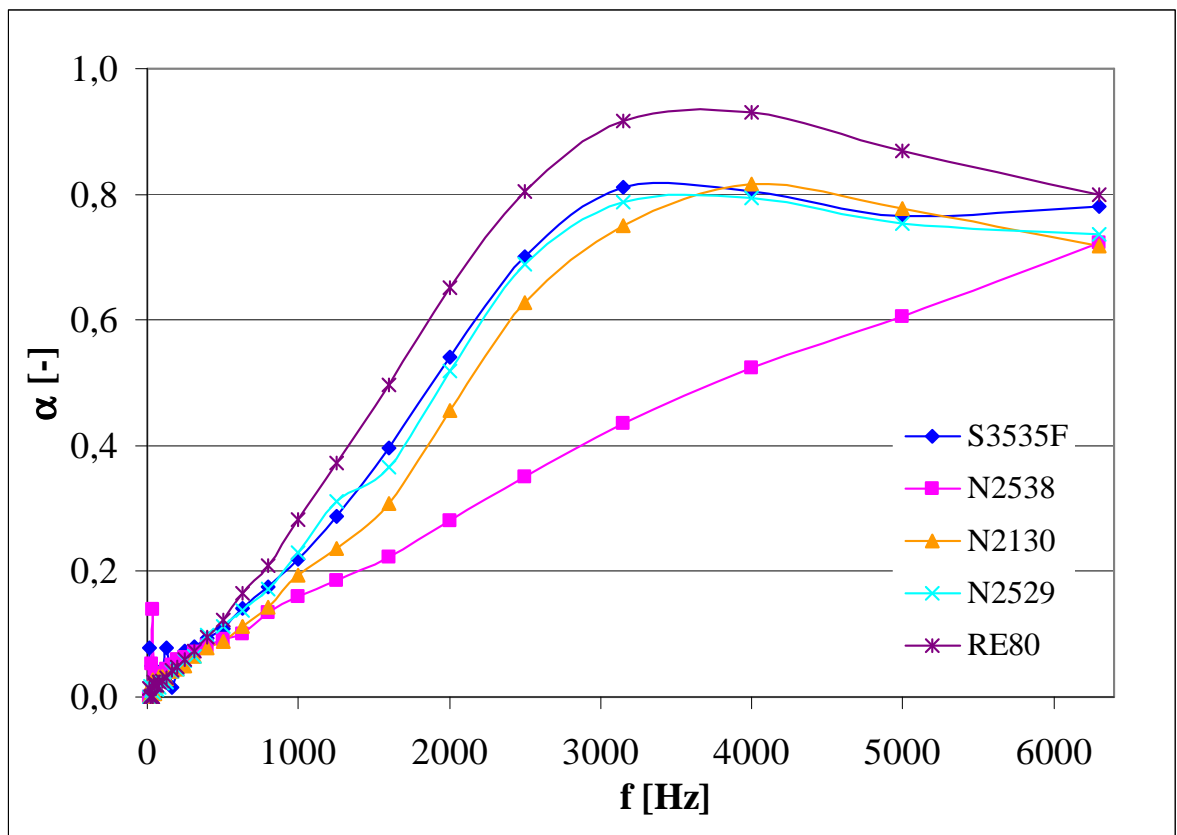
K určení jednotlivých závislostí činitele zvukové pohltivosti bude uvedeno několik grafů (zbytek bude uveden v příloze), z nichž budeme moci rozhodnout:

- který vzorek nejlépe pohlcuje (Obr. 12-16)
- jak ovlivňuje pohltivost tloušťka vzorku (Obr. 16-20)
- jak je ovlivněna pohltivost, když se mění posunutí pístu od vzorku v trubici  $x=0$  cm a  $x=10$  cm (Obr. 20-24)
- jak je ovlivněna pohltivost u každého vzorku s posunutím pístu  $x=0,1,2,5,10$  cm (Obr.24-28)

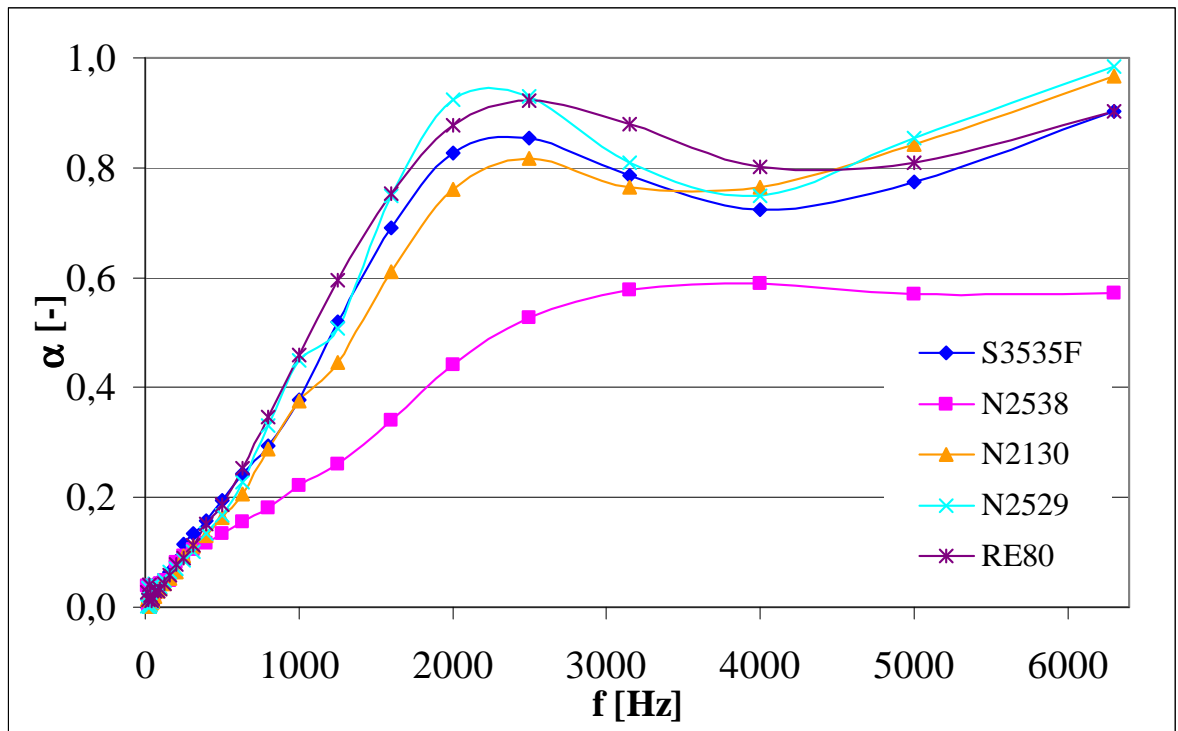
Parametry:  $t$  - tloušťka vzorku

$x$  - vzdálenost pístu od vzorku v trubici

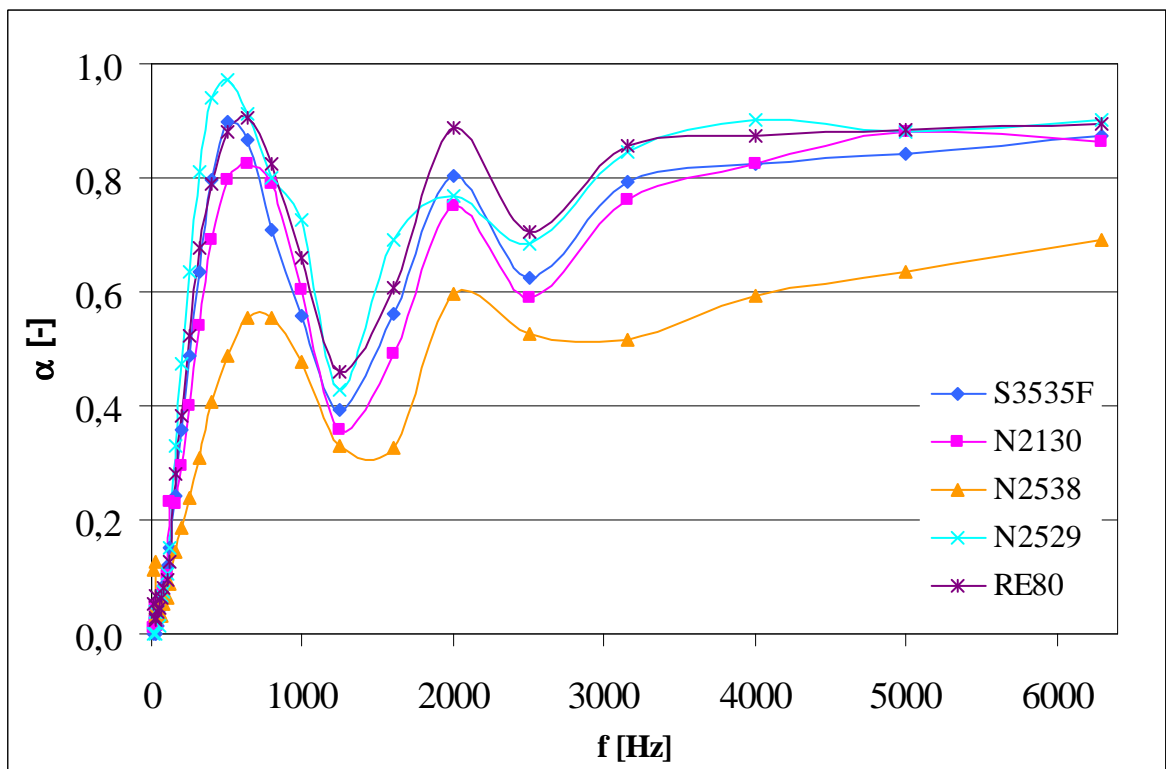
Grafické znázornění experimentálních dat:



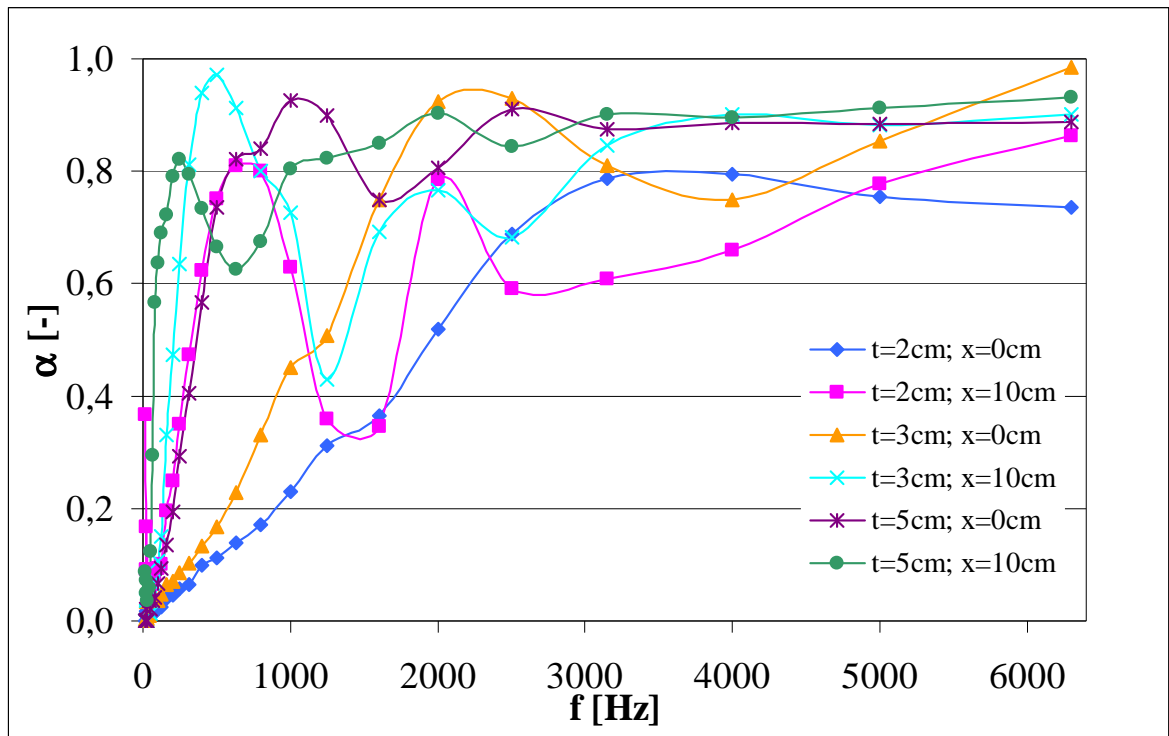
Obr. 13. Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci pro tloušťku vzorků  $t=2$  cm s polohou pístu  $x=0$  cm



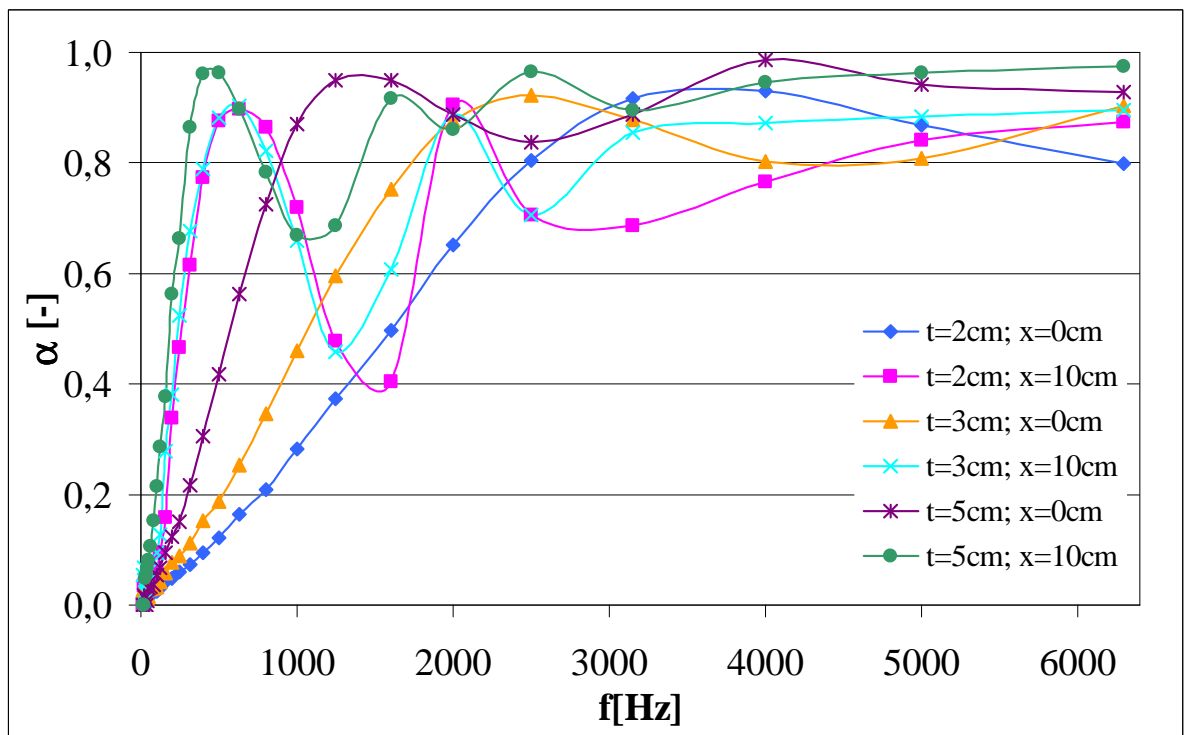
Obr. 14. Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci pro tloušťku vzorků  $t=3$  cm s polohou pístu  $x=0$  cm



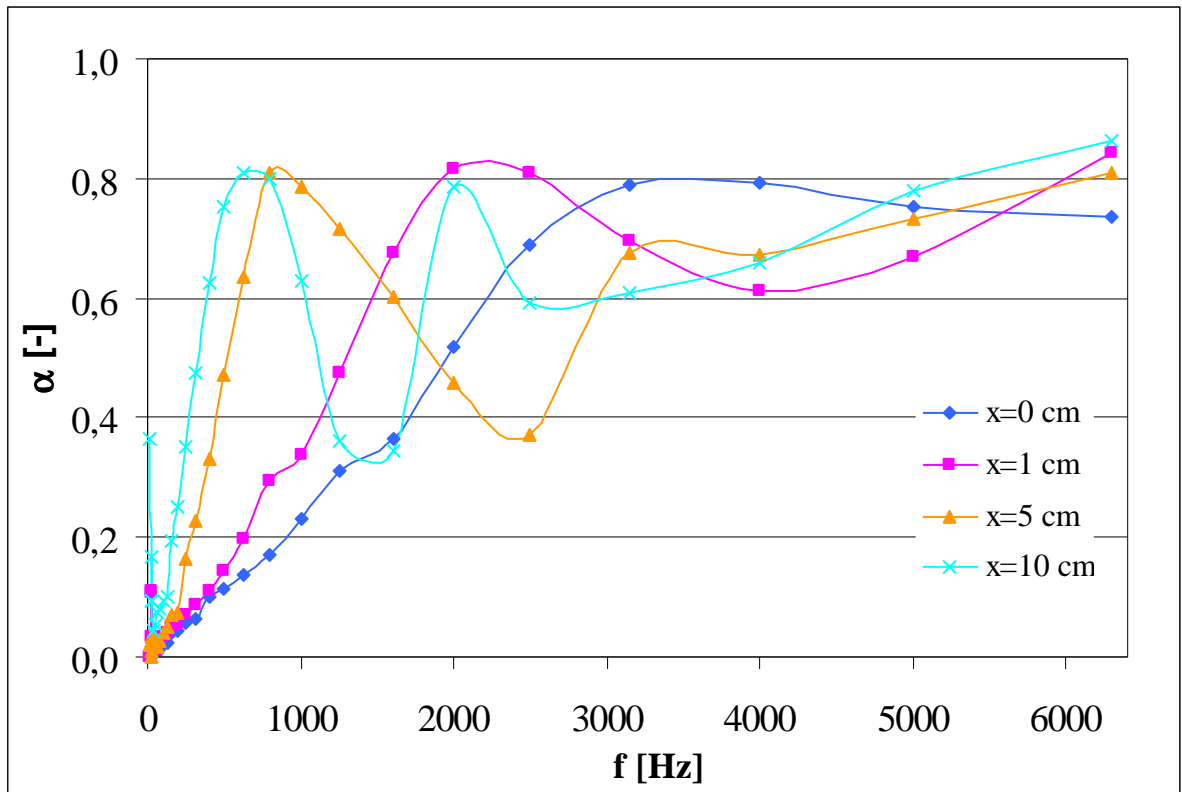
Obr. 15. Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci pro tloušťku vzorků  $t=3$  cm s polohou pístu  $x=10$  cm



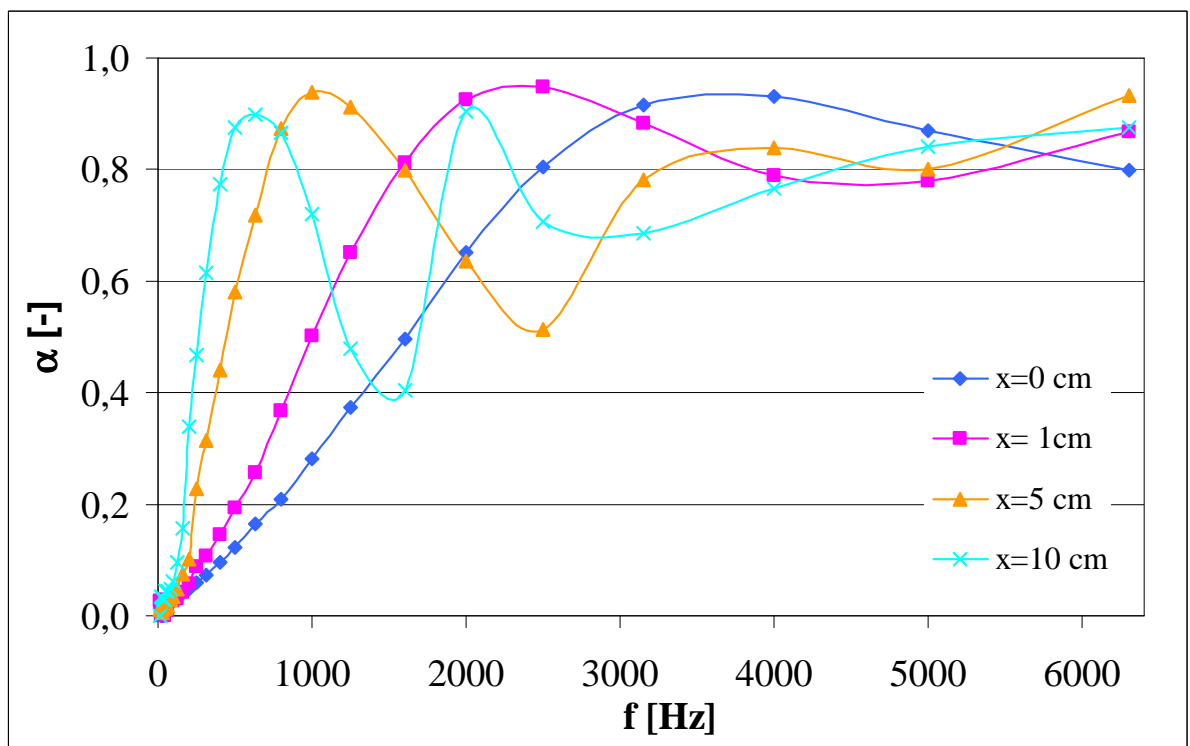
Obr. 16. Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci vzorku N2529 pro tloušťky  $t=2,3,5$  cm s polohou pístu  $x=0$  cm a  $x=10$  cm



Obr. 17. Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci vzorku RE80 pro tloušťky  $t=2,3,5$  cm s polohou pístu  $x=0$  cm a  $x=10$  cm



Obr. 18. Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci vzorku N2529 pro  $t=2$  cm s polohou pístu  $x=0,1,2,5$  a 10 cm.



Obr. 19. Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci vzorku RE80 pro  $t=2$  cm s polohou pístu  $x=0,1,2,5$  a 10 cm.



#### 4.6.2 Přenosový útlum

Grafické závislosti přenosového útlumu jsou přehledně zpracovány do tabulek a grafů, avšak z důvodu velkého množství řádků (80) tabulky nejsou k dispozici, a proto se musíme spokojit jen s grafickým vyjádřením.

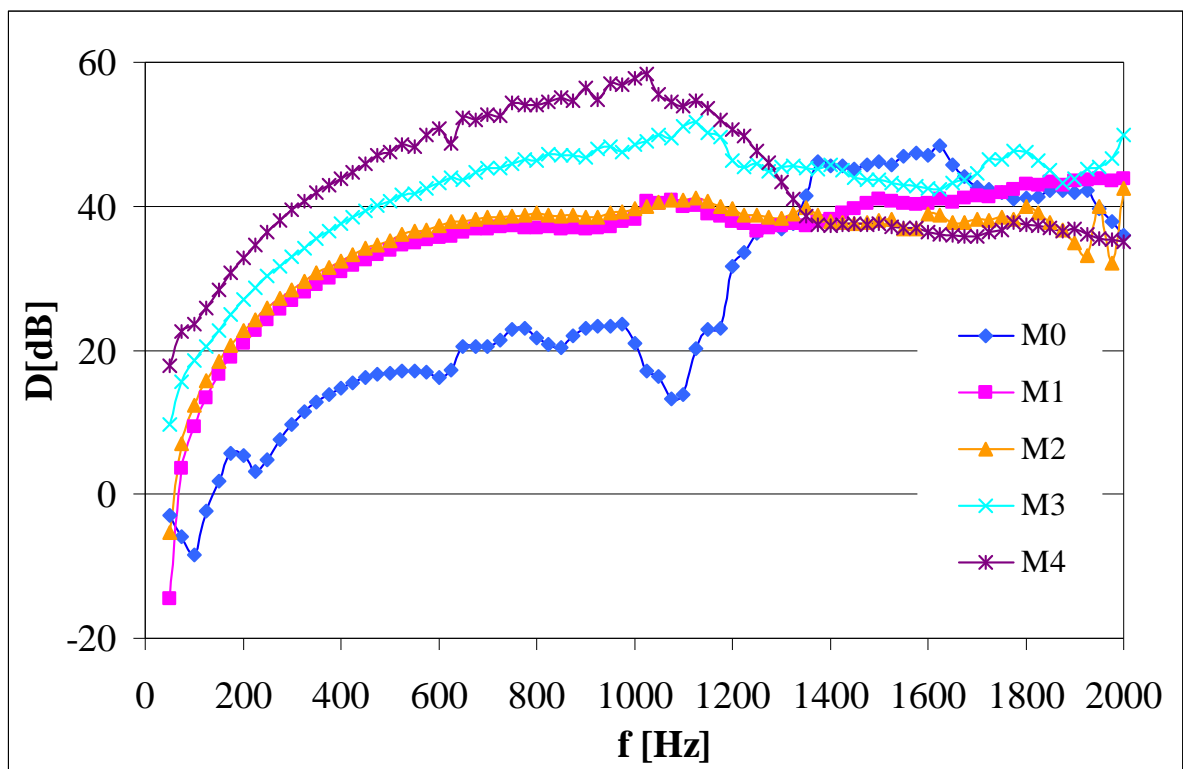
Máme k dispozici 5 vzorků o 3 různých tloušťkách s 5 různými zátěžemi. Abychom získali charakteristiku každého vzorku a vzorků navzájem, musíme k analýze zvolit tyto kombinace:

- jeden vzorek jedné tloušťky pro všech pět zátěží (Obr. 19 a 20)
- jeden materiál všech tří tloušťek se dvěma zátěžemi např. M0 a M4 (Obr. 21 a 23)
- všech pět materiálů při jedné tloušťce a jedné zátěži + jiná tloušťka nebo jiná zátěž (Obr.24 a 25)

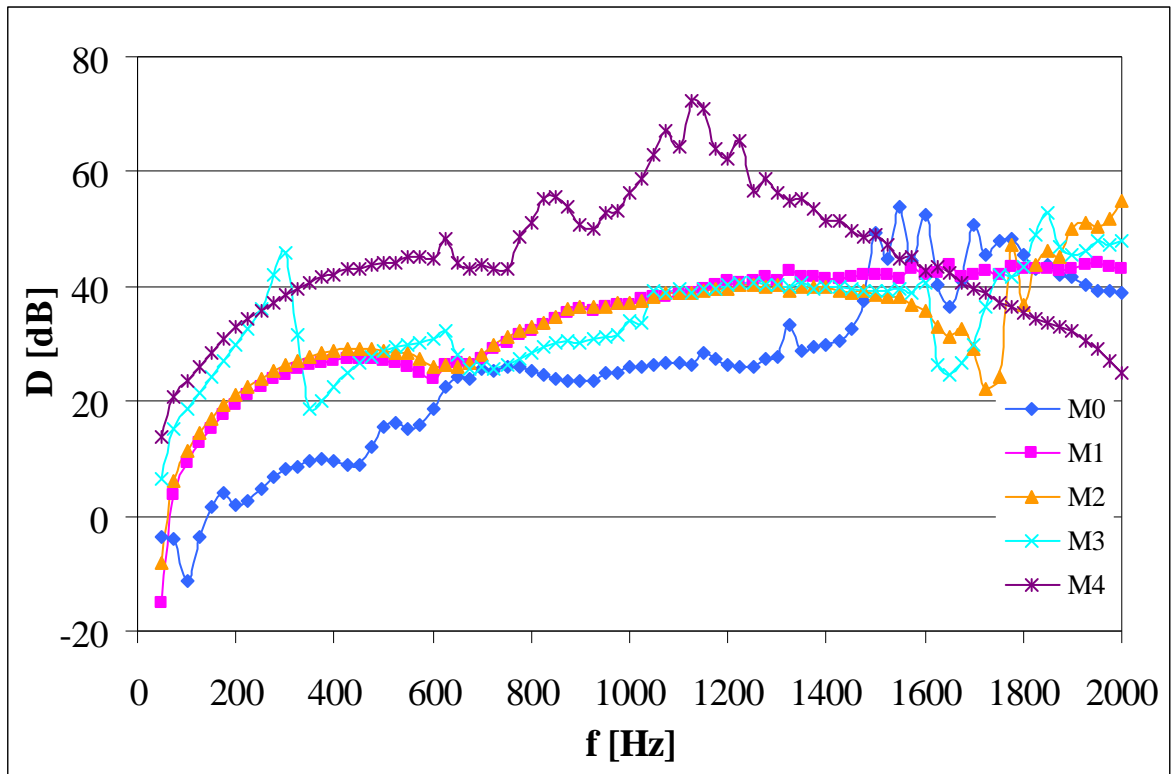
Vysvětlivky:  $t$  – tloušťka vzorků

$M$  – hmotnost zátěže

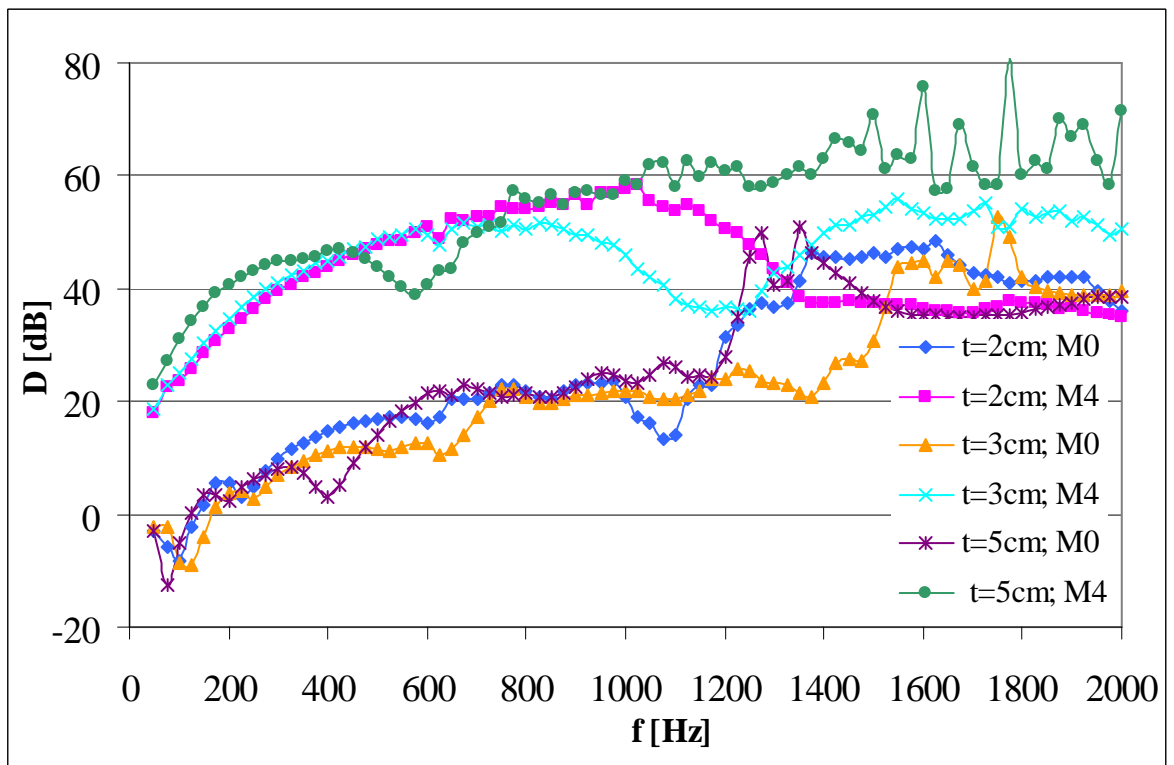
Grafické znázornění experimentálních dat:



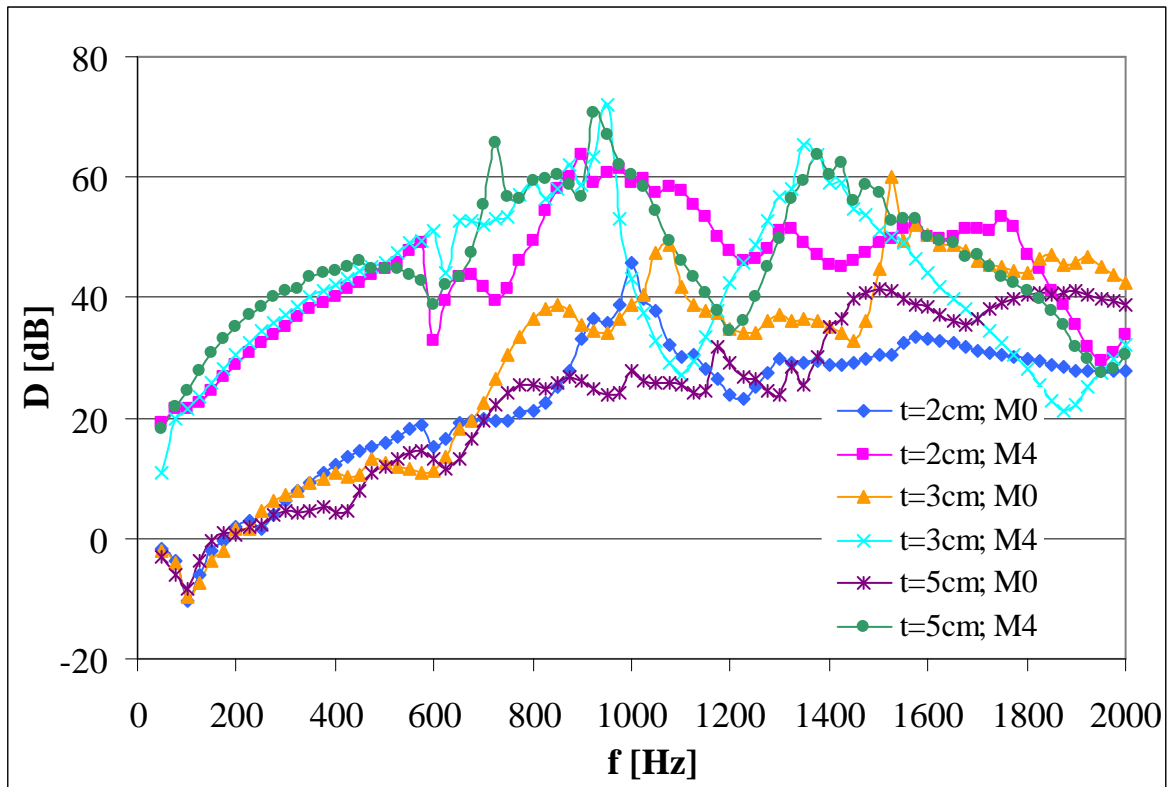
Obr. 20. Závislost útlumu na frekvenci pro vzorek N2529 při  $t=2$  cm s 5 různými zátěžemi



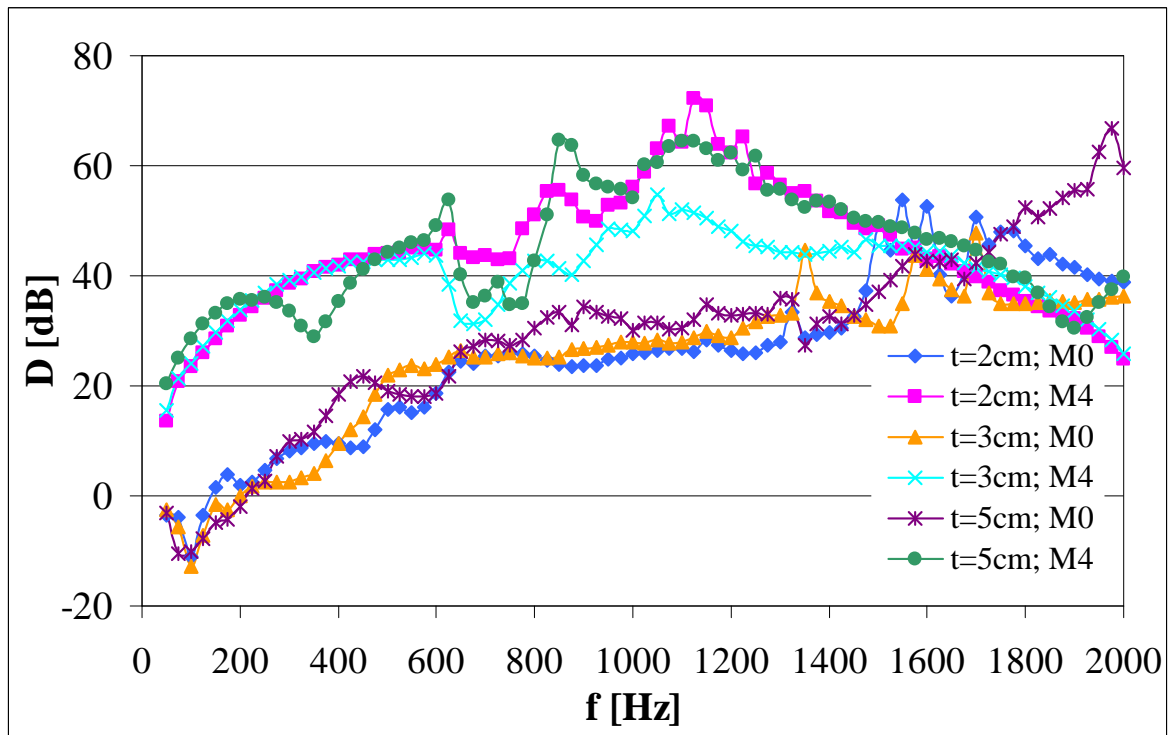
Obr. 21. Závislost útlumu na frekvenci pro vzorek RE80 při  $t=2$  cm s 5 různými zátěžemi



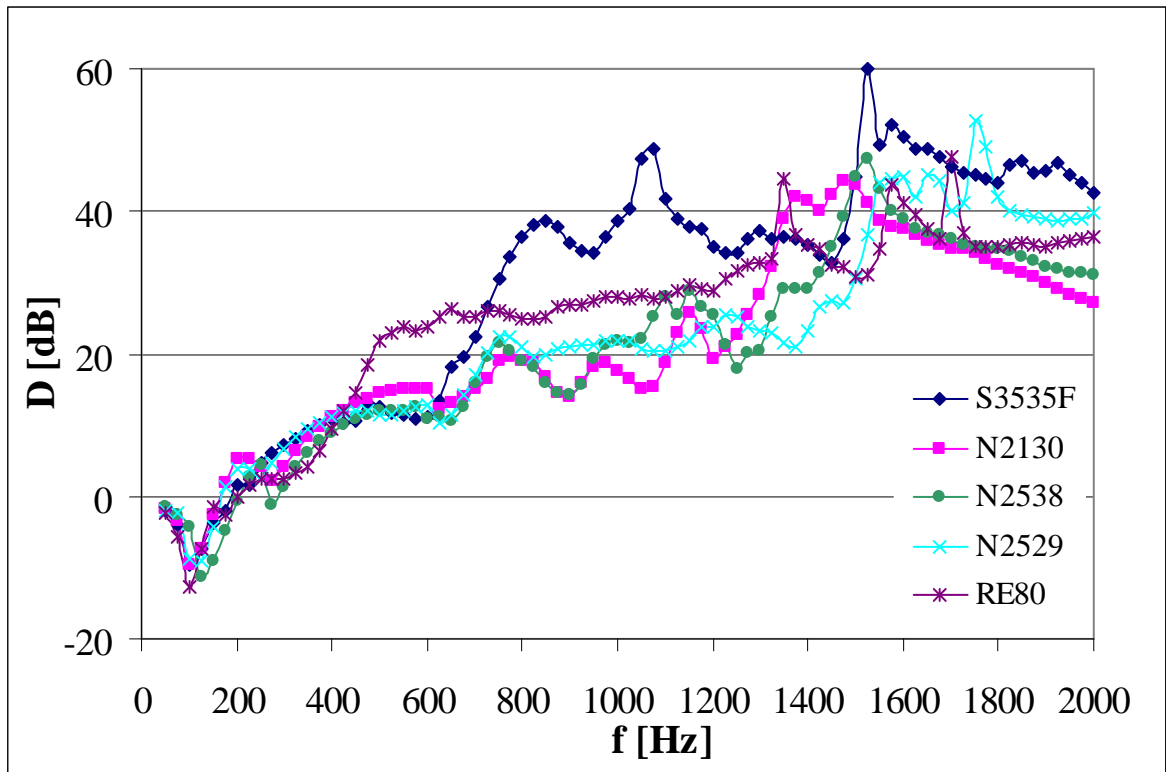
Obr. 22. Závislost útlumu na frekvenci vzorku N2529 při  $t=2,3,5$  cm a zátěžemi M0 a M4



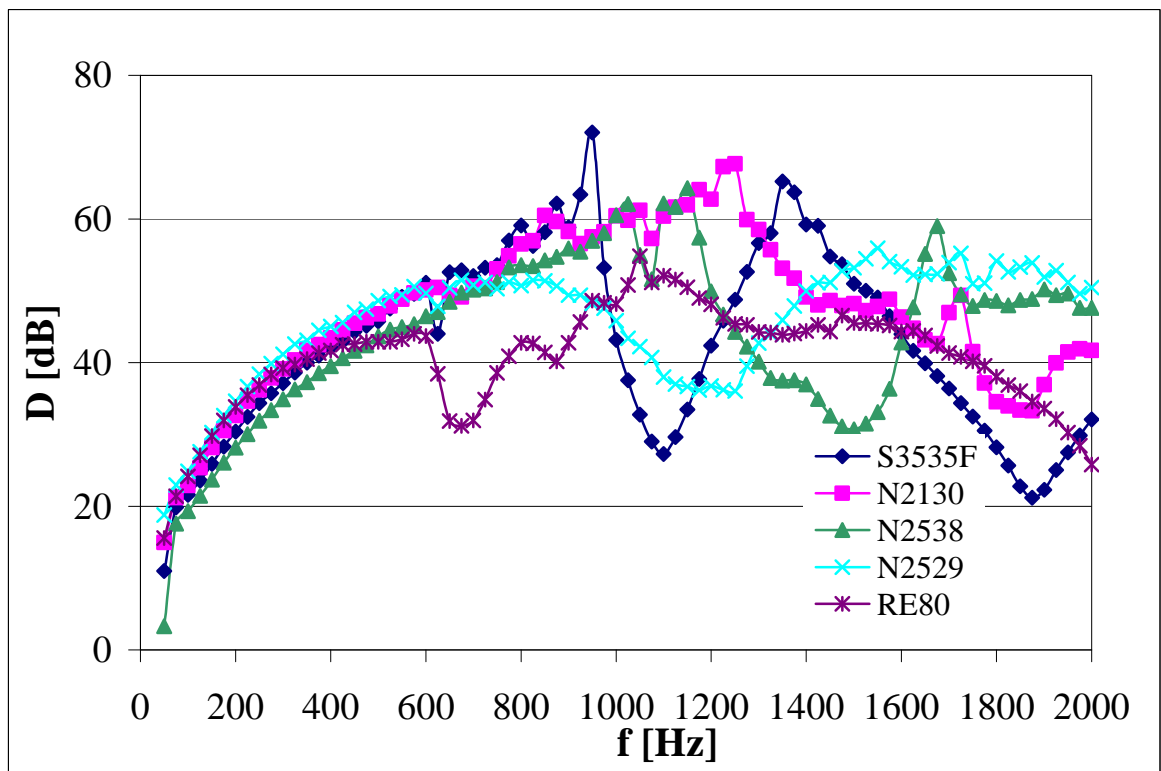
Obr. 23. Závislost útlumu na frekvenci vzorku S3535F při  $t=2,3,5$  cm a zátěžemi M0 a M4



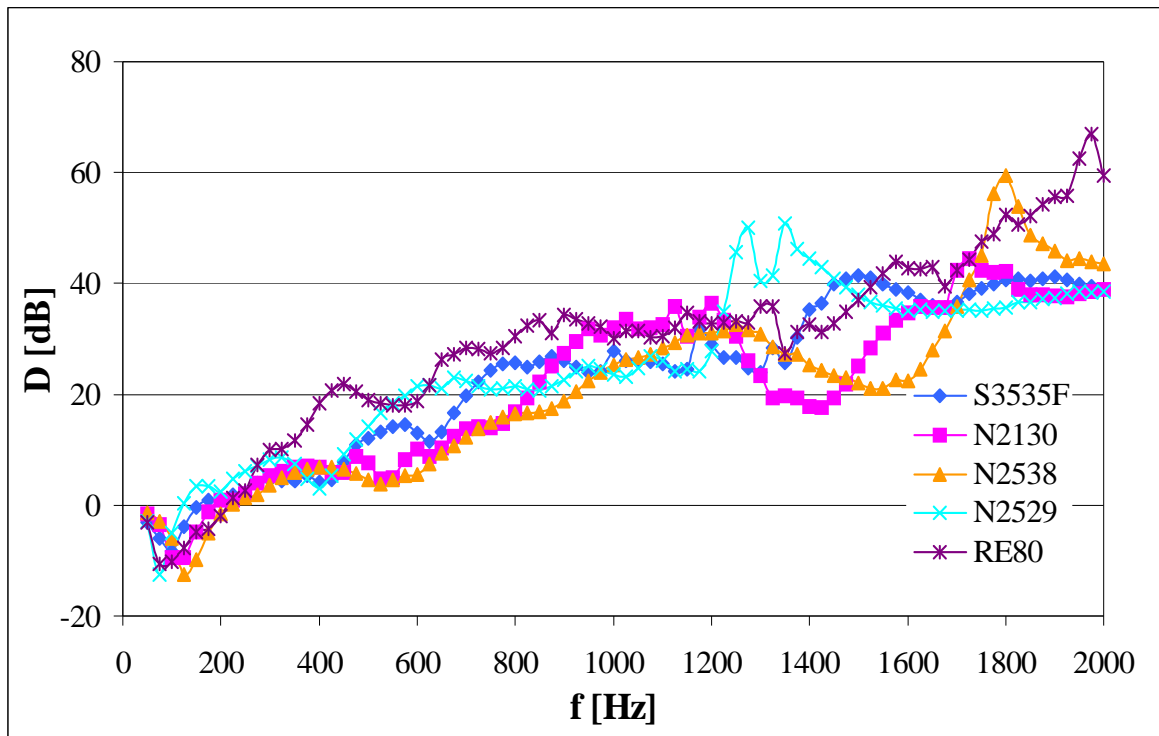
Obr. 24. Závislost útlumu na frekvenci vzorku RE80 při  $t=2,3,5$  cm a zátěžemi M0 a M4



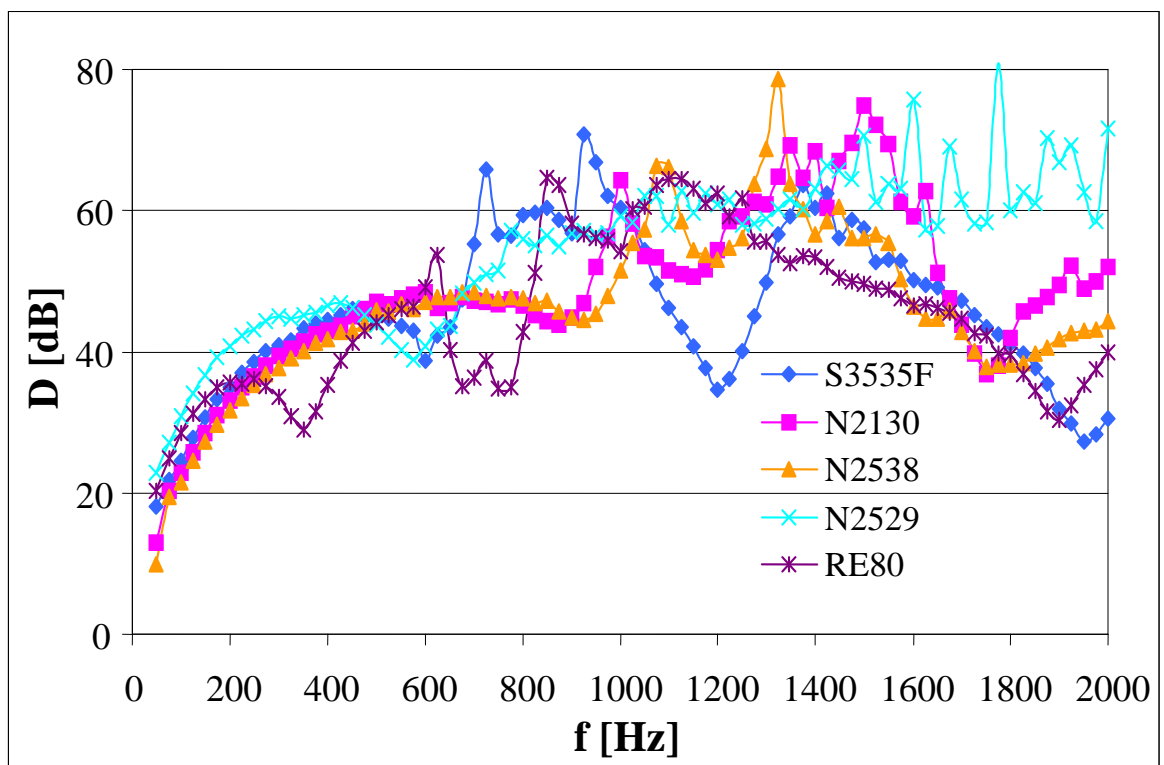
Obr. 25. Závislost útlumu na frekvenci pro všech 5 vzorků při  $t=3$  cm se zátěží M0



Obr. 26. Závislost útlumu na frekvenci pro všech 5 vzorků při  $t=3$  cm se zátěží M4



Obr. 27. Závislost útlumu na frekvenci pro všech 5 vzorků při  $t=5$  cm se zátěží M0



Obr. 28. Závislost útlumu na frekvenci pro všech 5 vzorků při  $t=5$  cm se zátěží M4

## 5 DISKUZE VÝSLEDKŮ

### 5.1 Vliv tloušťky na zvukovou pohltivost

Hodnota činitele zvukové pohltivosti obecně závisí na tloušťce vzorku, distribuci póru a na tom, zda je pohlcující prvek těsně u stěny nebo nikoliv.

Při zjišťování vlivu tloušťky na pohltivost je z frekvenčních charakteristik zřejmé, že se zvyšující se tloušťkou vzorku pohltivost roste. U všech křivek (Obr.18,19,29-32) je zřejmý strmější nárůst pohltivosti a rychlejší dosažení maximální hodnoty  $\alpha$ . Z toho vidíme, že objemnější vzorky jsou vhodné pro pohlcování zvuku nízkých frekvencí.

Analýza chování vzorků při jednotlivých tloušťkách:

Pro tloušťku vzorků  $t=2\text{ cm}$  pro  $x=0\text{ cm}$  (Obr. 13.) - vidíme, že všechny vzorky dosahují skupinově maximální pohltivosti ve frekvenčním rozsahu  $f=(3000-4000)\text{ Hz}$ , jediný vzorek N2538 se neosvědčil, jeho pohltivost je poloviční a srovnatelné hodnoty dosahuje až při  $f=6300\text{ Hz}$ . *Nejlépe pohlcujícím vzorkem je RE80.*

Pro tloušťku vzorků  $t=3\text{ cm}$  pro  $x=0\text{ cm}$  (Obr. 14.) - vidíme, že všechny vzorky dosahují skupinově maximální pohltivosti ve frekvenčním rozsahu  $f=(2000-2500)\text{ Hz}$ , pohltivost má opět nejhorší vzorek N2538, jehož hodnota je opět poloviční.

*Nejlépe pohlcují vzorky RE80 a N2529.*

Pro tloušťku vzorků  $t=5\text{ cm}$  pro  $x=0\text{ cm}$  (Obr. 31.) - vidíme, že všechny vzorky skupinově dosahují maximální pohltivosti ve frekvenčním rozsahu  $f=(1000-1500)\text{ Hz}$ , pohltivost je u všech vzorků vysoká  $\alpha > 0,9$ , jen vzorek N2130 dosahuje pohltivosti 0,8.

*Všechny vzorky pohlcují relativně dobře.*

### 5.2 Vliv vzduchové mezery na pohltivost

Nyní je třeba vyšetřit jak se mění pohltivost, když měníme vzdálenost vzorku od pevné stěny (pístu). Pro skupinu těchto grafů je charakteristické zvlnění těchto závislostí. Každá křivka vykazuje dvě vlny, první je vždy o něco vyšší. Při větší tloušťce se maximální hodnoty první a druhé vlny posouvají k nižším frekvencím a tloušťky vln křivek jsou užší. Pro všechny tři tloušťky se od 3000 Hz hodnota  $\alpha$  mění jen málo a křivky mají povolný lineární charakter.

Analýza chování vzorků při změně vzdálenosti z  $x=0$  cm na  $x=10$  cm :

Pro tloušťku vzorků  $t=2$  cm (Obr.32) - maximum první vlny je při  $f=700$  Hz a maximum druhé vlny  $f=2100$  Hz. Minimální pohltivost je při  $f=1500$  Hz. *Nejlépe pohlcují vzorky N2529 a RE80 a nejhůře vzorek N2538.*

Pro tloušťku vzorků  $t=3$  cm (Obr.15.) - maximum první vlny je při  $f=500$  Hz a maximum druhé vlny  $f=2000$  Hz. Minimální pohltivost je při  $f=1500$  Hz. *Nejlépe pohlcují vzorky N2529 a RE80 a nejhůře vzorek N2538.*

Pro tloušťku vzorků  $t=5$  cm (Obr.32) - maximum první vlny je při  $f=500$  Hz a maximum druhé vlny  $f=400$  Hz. Minimální pohltivost je při  $f=1200$  Hz. *Všechny vzorky pohlcují dobře.*

*Tab. 5. Maximální pohltivost jednotlivých vzorků v závislosti na frekvenci pro  $\alpha$ , kdy  $x=0$  cm a  $x=10$  cm*

| Vzorek | t[cm] | $\alpha_{\max,0}$ [dB] | $f_0$ [Hz] | $\alpha_{\max,10}$ [dB] | $f_{10}$ [Hz] |
|--------|-------|------------------------|------------|-------------------------|---------------|
| S3535F | 2     | 0,812                  | 3150       | 0,836                   | 630           |
|        | 3     | 0,903                  | 6300       | 0,898                   | 500           |
|        | 5     | 0,968                  | 4000       | 0,963                   | 400           |
| N2130  | 2     | 0,817                  | 4000       | 0,826                   | 6300          |
|        | 3     | 0,967                  | 6300       | 0,881                   | 5000          |
|        | 5     | 0,944                  | 4000       | 0,951                   | 6300          |
| N2538  | 2     | 0,723                  | 6300       | 0,567                   | 6300          |
|        | 3     | 0,589                  | 4000       | 0,692                   | 6300          |
|        | 5     | 0,994                  | 6300       | 0,994                   | 400           |
| Pena   | 2     | 0,794                  | 4000       | 0,864                   | 6300          |
|        | 3     | 0,984                  | 6300       | 0,972                   | 500           |
|        | 5     | 0,925                  | 1000       | 0,931                   | 6300          |
| RE80   | 2     | 0,931                  | 4000       | 0,905                   | 2000          |
|        | 3     | 0,922                  | 2500       | 0,904                   | 630           |
|        | 5     | 0,987                  | 4000       | 0,974                   | 6300          |

Z (Tab. 5.) je zřejmé, že nelze najít žádné universální pravidlo mezi tloušťkou vzorku v závislosti na frekvenci. Vzorek dané tloušťky vykazuje maximální pohltivost jen pro určitou frekvenci.

### 5.3 Vliv pórovitosti na pohltivost

Pohltivost obecně závisí na distribuci a velikosti pórů. V (Tab. 6.) jsou zvýrazněny maximální hodnoty a pro jednotlivé tloušťky vzorků a posunutí pístu. Z našich výsledků není prokázána jasná souvislost mezi pórovitostí a pohltivostí, protože neplatí, že nejvíce pórovitý vzorek má největší pohltivost a naopak. Z našich výsledků jsou patrné tyto závěry:

- nejvíce pohlcuje pro  $t = 2 \text{ cm}$  vzorek *RE 80* při  $\alpha_{2,\max} = 0,931$ ,  $\alpha_{2,10\max} = 0,905$
- nejvíce pohlcuje pro  $t = 3 \text{ cm}$  vzorek *N2529* při  $\alpha_{3,\max} = 0,984$ ,  $\alpha_{3,10\max} = 0,972$
- nejvíce pohlcují pro  $t = 5 \text{ cm}$  vzorky *RE 80* při  $\alpha_{5,\max} = 0,987$   
*N2538* při  $\alpha_{5,10\max} = 0,994$

Z těchto vztahů vidíme, že každý vzorek polyuretanu vykazuje při určité tloušťce maximální pohltivost v závislosti na frekvenci, a proto pórovitost nehraje tak dominantní roli, protože její hodnoty u vzorků polyuretanů jsou obecně vysoké.

Tab. 6. Závislost maximálního  $\alpha$  na pórovitosti pro posunutí pístu  $x=0 \text{ cm}$  a  $x=10 \text{ cm}$

| Materiál | $\alpha_{2,0\max}[-]$ | $\alpha_{3,0\max}[-]$ | $\alpha_{5,0\max}[-]$ | $\alpha_{2,10\max}[-]$ | $\alpha_{3,10\max}[-]$ | $\alpha_{5,10\max}[-]$ | $\bar{P}$ [obj.%] |
|----------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------|
| S3535F   | 0,812                 | 0,903                 | 0,968                 | 0,836                  | 0,898                  | 0,963                  | 96,5              |
| N2130    | 0,817                 | 0,967                 | 0,944                 | 0,826                  | 0,881                  | 0,951                  | 96,6              |
| N2538    | 0,723                 | 0,589                 | 0,944                 | 0,567                  | 0,692                  | 0,994                  | 96,7              |
| N2529    | 0,794                 | 0,984                 | 0,925                 | 0,864                  | 0,972                  | 0,931                  | 99,1              |
| RE80     | 0,931                 | 0,922                 | 0,987                 | 0,905                  | 0,904                  | 0,974                  | 85,8              |



#### 5.4 Vliv tloušťky a zátěže na přenosový útlum

Při zkoumání závislosti přenosového útlumu na tloušťce vzorku a velikosti zátěže jsme dospěli k několika závěrům:

- všechny vzorky vykazují s větší setrvačnou zátěží větší útlum bez ohledu na tloušťku vzorku (Obr. 20,21,37-41)
- u každého vzorku tloušťky  $t = 2,3,5$  cm a dvou zátěžích M0 a M4 je jasně patrné, že při nízkých frekvencích je útlum se zátěží M4 větší. U vyšších budících frekvencí nad 1500 Hz jsou útlumy jednotlivých vzorků různé (Obr. 23,24, 42-44)
- všechny vzorky jedné tloušťky a jedné zátěže vykazují při nízkých frekvencích do 500 Hz přibližně stejné hodnoty útlumu
- z (Tab.7.) je jasně patrné, že s rostoucí setrvačnou zátěží při které je útlum maximální frekvence klesá.
- pro vystihnoutí chování jednotlivých vzorků však tyto údaje nejsou směrodatné, protože není zde zachyceno chování vzorku v celém frekvenčním rozsahu, tzn. že vzorek který má největší pohltivost nemusí být pro tlumení nejlepší.
- Z analýzy jednotlivých vzorků z grafických závislostí plynou tyto závěry:

Pro  $t = 2\text{ cm}$  se zátěží M0 (Obr.47) - všechny vzorky vykazují pozvolný nárůst útlumu se zvyšující se frekvencí, nejlepší útlum má vzorek RE80 při  $D_{\max} = 53,82$  dB, jehož křivka má nestálý průběh bez větších skokových změn.

M4 (Obr.48) – všechny vzorky skupinově vykazují maximální útlum při  $f = 800\text{-}1200$  Hz, největší  $D_{\max} = 74,7$  má N2130, při vzrůstající frekvenci útlum všech vzorků klesá, přibližně na 30 dB.

Pro  $t = 3\text{ cm}$  se zátěží M0 (Obr.25)- nejlépe tlumí vzorek S3535F, jeho  $D_{\max} = 59,95$  dB.

M4 (Obr.26) - je patrný velký rozkmit útlumu u každého vzorku, nejstabilnější průběh má vzorek N2529, i když hodnota útlumu není maximální.

Pro  $t = 5\text{ cm}$  se zátěží M0 (Obr.27) - nejlépe tlumí vzorek RE80, jeho  $D_{\max} = 66,88$  dB.

M4 (Obr.28) - nejlépe tlumí vzorek N2529, jeho  $D_{\max} = 80,84$  dB.

Tab. 7. Maximální hodnoty útlumu v závislosti na frekvenci pro zátěže M0 a M4

| Vzorek | t[cm] | $D_{\max,0}$ [dB] | $f_0$ [Hz]  | $D_{\max,4}$ [dB] | $f_4$ [Hz]  |
|--------|-------|-------------------|-------------|-------------------|-------------|
| S3535F | 2     | <b>45,77</b>      | <b>1000</b> | 63,72             | 900         |
|        | 3     | <b>59,95</b>      | <b>1525</b> | 72,04             | 950         |
|        | 5     | 41,51             | 1500        | 70,77             | 925         |
| N2130  | 2     | 48,27             | 1250        | <b>74,71</b>      | <b>1025</b> |
|        | 3     | 44,36             | 1475        | 67,69             | 1250        |
|        | 5     | 44,45             | 1725        | 74,82             | 1500        |
| N2538  | 2     | 44,24             | 1625        | 69,23             | 1225        |
|        | 3     | 47,33             | 1525        | 64,29             | 1150        |
|        | 5     | 59,46             | 1800        | 78,69             | 1325        |
| N2529  | 2     | 48,49             | 1625        | 58,43             | 1025        |
|        | 3     | 52,78             | 1750        | 55,92             | 1550        |
|        | 5     | 50,83             | 1350        | <b>80,84</b>      | <b>1775</b> |
| RE80   | 2     | <b>53,82</b>      | <b>1550</b> | 72,26             | 1125        |
|        | 3     | 47,77             | 1700        | 54,82             | 1050        |
|        | 5     | <b>66,88</b>      | <b>1975</b> | 64,63             | 850         |

### 5.5 Vliv pórovitosti na přenosový útlum

Z (Tab. 8) je zřejmé, že hodnoty maximálního útlumu vykazují pro jednotlivé tloušťky vzorků při zátěži M4 tyto materiály:

- $t=2$  cm vzorek N2130 pro  $D_{\max}=74,71$  dB pro  $P=96,6$  obj. %
- $t=3$  cm vzorek S3535F pro  $D_{\max}=72,04$  dB pro  $P=96,5$  obj. %
- $t=5$  cm vzorek N2529 pro  $D_{\max}=80,84$  dB pro  $P=99,1$  obj. %

Z výsledků je patrná jasná souvislost mezi pórovitostí a útlumem. Bylo zjištěno, že vzorky které mají větší pórovitost mají i větší přenosový útlum. Maximální hodnoty útlumu bylo dosaženo u vzorku N2529  $t=5$  cm.

Tab. 8. Vliv pórovitosti na přenosový útlum

| Materiál | $t=2$ cm          |                   | $t=3$ cm          |                   | $t=5$ cm          |                   | $P$ [obj. %] |
|----------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------|
|          | $D_{\max,0}$ [dB] | $D_{\max,4}$ [dB] | $D_{\max,0}$ [dB] | $D_{\max,4}$ [dB] | $D_{\max,0}$ [dB] | $D_{\max,4}$ [dB] |              |
| S3535F   | 45,77             | 63,72             | <b>59,95</b>      | <b>72,04</b>      | 41,51             | 70,77             | <b>96,5</b>  |
| N2130    | 48,27             | <b>74,71</b>      | 44,36             | 67,69             | 44,45             | 74,82             | <b>96,6</b>  |
| N2538    | 44,24             | 69,23             | 47,3              | 64,29             | 59,46             | 78,69             | 96,7         |
| Pena     | 48,49             | 58,43             | 52,78             | 55,92             | 50,83             | <b>80,84</b>      | <b>99,1</b>  |
| RE80     | <b>53,82</b>      | 72,26             | 47,77             | 54,82             | <b>66,88</b>      | 64,63             | 85,8         |

## ZÁVĚR

Cílem mé diplomové práce bylo změřit vibroakustické vlastnosti měkkých lehčejších polyuretanů.

Z *akustických vlastností* byl zjišťován činitel zvukové pohltivosti  $\alpha$ , metodou mikrofonové impedanční analýzy. Při zjišťování vlivu tloušťky na pohltivost je z frekvenčních charakteristik zřejmé, že se zvyšující se tloušťkou vzorku pohltivost roste. U všech křivek je zřejmý strmější nárůst pohltivosti a rychlejší dosažení maximální hodnoty  $\alpha$ . Z toho vidíme, že objemnější vzorky jsou vhodné pro pohlcování zvuku nízkých frekvencí.

Dále byl srovnáván vliv velikosti vzduchové mezery mezi materiálem a pístem na pohltivost. Pro srovnání byly použity hodnoty posunutí  $x=0$  cm a  $x=10$  cm, protože jsou zde patrné největší rozdíly v jejich chování. Zjistili jsme, že se zvyšující se vzdáleností pístu od vzorku, se frekvenční závislosti podstatně mění. Křivky mají vlnitý charakter a pohltivost je větší pro nízké frekvence. Nejlépe pohlcují vzorky *N2529* a *RE80* a nejhůře vzorek *N2538* pro  $t=2, 3$  cm, pro tloušťku 5 cm je pohltivost všech vzorků vysoká  $\alpha > 0,9$ .

Vliv pórovitosti na pohltivost nebyla striktně dokázána, protože nejlepší  $\alpha$  měl nejméně a nejvíce pórovitý vzorek. Z toho vidíme, že každý vzorek polyuretanu vykazuje při určité tloušťce maximální pohltivost v závislosti na frekvenci, a proto pórovitost nehraje tak dominantní roli, protože její hodnoty u vzorků polyuretanů jsou obecně vysoké.

Z naší mikrofonové impedanční analýzy plyne, že *nejlépe pohlcují vzorky N2529 a RE80*.

Z *vibračních zkoušek* byla použita metoda nucených kmitů, v praxi nejvíce využívaná. Byl zkoumán vliv tloušťky, velikost setrvačné zátěže a vliv pórovitosti na přenosový útlum materiálu.

Byla porovnávána velikost setrvačné zátěže  $M0(0$  g) a  $M4$  (~500 g), protože je na ní nejlépe vidět, jak se chová nezatížený vzorek v relaci s největší setrvačnou zátěží. Bylo zjištěno že tloušťka nemá na velikosti útlumu výrazný vliv, protože hodnoty útlumu pro vzorky tloušťky 2, 3 a 5 cm, se liší jen málo.

Všechny vzorky vykazují s větší setrvačnou zátěží větší útlum bez ohledu na tloušťku vzorku, přičemž pro každý vzorek je charakteristický malý útlum při nízkých budících frekvencích. Dále bylo zjištěno, že s větší setrvačnou zátěží při které je útlum ma-

ximální hodnota budící frekvence klesá. Vzorky jedné tloušťky a jedné zátěže vykazují při nízkých frekvencích do 500 Hz přibližně stejné hodnoty útlumu.

Z analýzy jednotlivých vzorků a porovnání grafických závislostí plyne, že je obtížné určit vzorek s nejlepšími tlumícími vlastnostmi. Protože při různých tloušťkách a zátěžích M0 a M4 měli nejlepší vlastnosti prakticky všude různé vzorky. *Největšího útlumu* bylo dosaženo při tloušťce vzorku  $t=5$  cm u *vzorku N 2529* s  $D_{\max}= 80,84$  dB. Při zkoumání vlivu pórovitosti na přenosový útlum bylo dospěno k jednoznačnému závěru, že vzorky s větší pórovitostí mají větší přenosový útlum, protože se v nich přemění větší množství energie na teplo.

Závěrem je třeba konstatovat, že naše měření dávají překvapivé výsledky pro recyklovaný polyuretan *RE80*, jehož hodnoty  $\alpha$  a  $D$ , v řadě případů patří k nejlepším. Navíc výroba recyklovaných polyuretanů je levnější oproti nově vyrobeným a odpadá i problém skládkování.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] NOVÝ, Richard. Hluk a chvění. 2. vyd. Praha: vydavatelství ČVUT, 2000. 389 s. ISBN 80-01-02246-3
- [2] VAŇKOVÁ, Marie. Hluk, vibrace a ionizující záření, část I. 1. vyd. Brno: VUT, 1995. 140 s. ISBN 80-214-0695-x
- [3] VAŇKOVÁ, Marie. Hluk, vibrace a ionizující záření, část II. 1. vyd. Brno: VUT, 1995. 160 s. ISBN 80-214-0818-9
- [4] RABB, M., LAPČÍK, L. Nauka o materiálech II, 2. vyd. Zlín: Vydavatelství Academia centrum Zlín, 2004. 130 s. ISBN 80-7318-229-7
- [5] BRUEL&KJAER: Naerum- Dánsko, Měření zvuku 1984
- [6] BRUEL&KJAER: Naerum- Dánsko, Vibrační zkoušení 1984
- [7] MIŠUN, Vojtěch. Vibrace a hluk. Brno: PC-DIR Real VUT, 1998. 180 s. ISBN 80-214-1262-3
- [8] JIŘÍČEK, Ondřej. Úvod do akustiky. Praha: vydavatelství ČVUT, 2002. 140 s. ISBN 80-01-02460-1
- [9] EVEREST, F.A. The master handbook of acoustics, 4. vyd. USA: McGraw-Hill Companies, 2001. 610 s. ISBN 0-07-136097-2
- [10] Fahy, F. Foundations of engineering acoustics, 2.vyd. London: Academia press, 2003. 440 s. ISBN 0-12-247665-4
- [11] KRÁTKÝ, A. Materiály pro snižování hluku a vibrací [Diplomová práce], Zlín 2004. UTB ve Zlíně, Fakulta technologická
- [12] KUSÁK, R. Činitel zvukové pohltivosti keramických materiálů [Diplomová práce]. Zlín 2001. UTB ve Zlíně, Fakulta Technologická
- [13] AKUSTICKÉ LISTY č.10, Poznatky z měření v interferometru, březen 2004. [online].[cit. 2006-5-22]. Dostupný z WWW: [http://www.czakustika.cz/hlav\\_cz.htm](http://www.czakustika.cz/hlav_cz.htm)
- [14] AKUSTICKÉ LISTY č.8, Tlumení v mechanických soustavách, prosinec 2002. [online].[cit. 2006-20-5]. Dostupný z WWW: [http://www.czakustika.cz/hlav\\_cz.htm](http://www.czakustika.cz/hlav_cz.htm)

[15] MLEZIVA, J., KÁLAL, J. Základy makromolekulární chemie, 1 vyd. Praha: STNL/ALFA, 1986. 384 s. Typové číslo L16-C3-IV-41f/68088

[16] MLEZIVA, J., ŠNUPÁNEK, J. Polymery, 2 vyd. Brno: Sobotáles, 2000. 544 s. ISBN 80-85920-72-7

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

|                 |   |
|-----------------|---|
| $\alpha$        | činitel zvukové pohltivosti.                  |
| $\beta$         | činitel zvukové odrazivosti.                  |
| $\tau$          | činitel zvukové průzvučnosti                  |
| $h$             | tloušťka vzorku                               |
| $R$             | zvuková odrazivost                            |
| $P$             | pórovitost                                    |
| $c$             | fázová rychlost vzduchu                       |
| $f$             | frekvenční kmitočet                           |
| $f_r$           | rezonanční kmitočet                           |
| $\varphi$       | fázový posun                                  |
| $\kappa$        | činitel struktury                             |
| $\lambda$       | vlnová délka                                  |
| $\eta$          | činitel vnitřního tlumení                     |
| $D$             | Přenosový útlum                               |
| $v_0$           | amplituda rychlosti na vstupní straně vzorku  |
| $v$             | amplituda rychlosti na výstupní straně vzorku |
| $\sigma$        | napětí  |
| $\varepsilon$   | deformace                                     |
| $\delta$        | ztrátový úhel                                 |
| $E_{\text{Im}}$ | imaginární část modulu pružnosti              |
| $E_{\text{Re}}$ | reálná část modulu pružnosti                  |
| $V_p$           | objem pórů                                    |
| $V_c$           | celkový objem                                 |
| $Z_a$           | komplexní charakteristická impedance          |

---

|          |                                  |
|----------|----------------------------------|
| $Z_0$    | Charakteristická impedance plynu |
| $Re$     | Reynoldsovo číslo                |
| $p$      | akustický tlak                   |
| $p_b$    | barometrický tlak                |
| $p_0$    | amplituda akustického tlaku      |
| $u$      | akustická výchylka               |
| $T$      | kmitočet                         |
| $\omega$ | úhlová rychlost                  |



## SEZNAM OBRÁZKŮ

|   |    |
|---|----|
| <i>Obr. 1. Šíření zvuku od zdroje .....</i>   | 11 |
| <i>Obr. 2. Průchod zvuku stěnou.....</i>  | 13 |
| <i>Obr. 3. Princip dvoumikrofonové měřící metody .....</i>  | 17 |
| <i>Obr. 4. Hystereze v materiálu.....</i>   | 21 |
| <i>Obr. 5. Typy pórovitých materiálů .....</i>  | 23 |
| <i>Obr. 6 Neaxiální orientace pórů.....</i>   | 26 |
| <i>Obr. 7. Typy formy a ruční lis.....</i>  | 35 |
| <i>Obr. 8. Vzorky pod mikroskopem se 40ti násobným zvětšením. ....</i>  | 36 |
| <i>Obr. 9. Zapojení s velkou a malou měřící trubicí.....</i>  | 37 |
| <i>Obr. 10. Metodika měření.....</i>  | 39 |
| <i>Obr. 11. Schéma měřící aparatury .....</i>   | 40 |
| <i>Obr. 12. Detail vzorku a rotační olejová vývěva .....</i>  | 42 |
| <i>Obr. 13. Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci pro tloušťku vzorků <math>t=2</math><br/>cm s polohou pístu <math>x=0</math> cm.....</i>                                  | 45 |
| <i>Obr. 14. Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci pro tloušťku vzorků <math>t=3</math><br/>cm s polohou pístu <math>x=0</math> cm.....</i>                                  | 46 |
| <i>Obr. 15. Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci pro tloušťku vzorků <math>t=3</math><br/>cm s polohou pístu <math>x=10</math> cm.....</i>                                 | 46 |
| <i>Obr. 16. Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci vzorku N2529 pro<br/>tloušťky <math>t=2,3,5</math> cm s polohou pístu <math>x=0</math> cm a <math>x=10</math> cm.....</i> | 47 |
| <i>Obr. 17. Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci vzorku RE80 pro tloušťky<br/><math>t=2,3,5</math> cm s polohou pístu <math>x=0</math> cm a <math>x=10</math> cm.....</i>  | 47 |
| <i>Obr. 18. Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci vzorku N2529 pro <math>t=2</math> cm<br/>s polohou pístu <math>x=0,1,2,5</math> a <math>10</math> cm. ....</i>            | 48 |
| <i>Obr. 19. Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci vzorku RE80 pro <math>t=2</math> cm<br/>s polohou pístu <math>x=0,1,2,5</math> a <math>10</math> cm. ....</i>             | 48 |
| <i>Obr. 20. Závislost útlumu na frekvenci pro vzorek N2529 při <math>t=2</math> cm s 5 různými<br/>zátěžemi .....</i>   | 49 |
| <i>Obr. 21. Závislost útlumu na frekvenci pro vzorek RE80 při <math>t=2</math> cm s 5 různými<br/>zátěžemi .....</i>  | 50 |
| <i>Obr. 22. Závislost útlumu na frekvenci vzorku N2529 při <math>t=2,3,5</math> cm a zátěžemi <math>M0</math><br/>a <math>M4</math>.....</i>  | 50 |

|  |    |
|--|----|
| Obr. 23. Závislost útlumu na frekvenci vzorku S3535F při $t=2,3,5$ cm a zátěžemi M0 a M4.....  | 51 |
| Obr. 24. Závislost útlumu na frekvenci vzorku RE80 při $t=2,3,5$ cm a zátěžemi M0 a M4.....  | 51 |
| Obr. 25. Závislost útlumu na frekvenci pro všech 5 vzorků při $t=3$ cm se zátěží M0.....   | 52 |
| Obr. 26. Závislost útlumu na frekvenci pro všech 5 vzorků při $t=3$ cm se zátěží M4.....   | 52 |
| Obr. 27. Závislost útlumu na frekvenci pro všech 5 vzorků při $t=5$ cm se zátěží M0.....   | 53 |
| Obr. 28. Závislost útlumu na frekvenci pro všech 5 vzorků při $t=5$ cm se zátěží M4.....   | 53 |
| Obr. 29. Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci vzorku N2529 pro $t=2,3,5$ cm s polohou pístu $x=0,1,2,5$ a 10 cm.....  | 70 |
| Obr. 30. Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci vzorku N 2538 pro $t=2,3,5$ cm s polohou pístu $x=0,1,2,5$ a 10 cm..... | 71 |
| Obr. 31. Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci vzorku N 2130 pro $t=2,3,5$ cm s polohou pístu $x=0,1,2,5$ a 10 cm..... | 72 |
| Obr. 32. Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci vzorku S3535F pro $t=2,3,5$ cm s polohou pístu $x=0,1,2,5$ a 10 cm..... | 73 |
| Obr. 33. Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci pro tloušťku vzorků $t=5$ cm s polohou pístu $x=0$ cm.....              | 74 |
| Obr. 34. Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci pro tloušťku vzorků $t=2,5$ cm s polohou pístu $x=10$ cm.....           | 74 |
| Obr. 35. Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci pro tloušťku vzorků $t=2,3,5$ cm s polohou pístu $x=0$ a $x=10$ cm..... | 75 |
| Obr. 36. Závislost útlumu na frekvenci u vzorků $t=2$ cm se zátěžemi M0 až M4.....   | 77 |
| Obr. 37. Závislost útlumu na frekvenci u vzorků $t=3$ cm se zátěžemi M0 až M4.....   | 79 |
| Obr. 38. Závislost útlumu na frekvenci u vzorků $t=5$ cm se zátěžemi M0 až M4.....   | 81 |
| Obr. 39. Závislost útlumu na frekvenci pro vzorek S3535F při $t=2,3,5$ cm se zátěžemi M0 až M4.....                                  | 82 |
| Obr. 40. Závislost útlumu na frekvenci pro vzorek N2130 při $t=2,3,5$ cm se zátěžemi M0 až M4.....                                   | 83 |
| Obr. 41. Závislost útlumu na frekvenci pro vzorek N 2538 při $t=2,3,5$ cm se zátěžemi M0 až M4.....                                  | 84 |
| Obr. 42. Závislost útlumu na frekvenci pro vzorek N 2529 při $t=2,3,5$ cm se zátěžemi M0 až M4.....                                  | 85 |

|   |           |
|---|-----------|
| <i>Obr. 43. Závislost útlumu na frekvenci pro vzorek N 2529 při <math>t=2,3,5</math> cm se zátěžemi M0 až M4.....</i> | <i>86</i> |
| <i>Obr. 44. Závislost útlumu na frekvenci vzorku RE80 při <math>t= 2,3,5</math> cm a zátěžemi M0 a M4.....</i>        | <i>87</i> |
| <i>Obr. 45. Závislost útlumu na frekvenci vzorku N2130 při <math>t= 2,3,5</math> cm a zátěžemi M0 a M4.....</i>       | <i>87</i> |
| <i>Obr. 46. Závislost útlumu na frekvenci vzorku N2130 při <math>t= 2,3,5</math> cm a zátěžemi M0 a M2.....</i>       | <i>87</i> |
| <i>Obr. 47. Závislost útlumu na frekvenci pro všech 5 vzorků při <math>t= 2</math> cm se zátěží M0.....</i>           | <i>88</i> |
| <i>Obr. 48. Závislost útlumu na frekvenci pro všech 5 vzorků při <math>t= 2</math> cm se zátěží M4.....</i>           | <i>88</i> |

**SEZNAM TABULEK**

|  |    |
|--|----|
| <i>Tab. 1. Parametry komerčních vzorků.....</i>  | 34 |
| <i>Tab. 2. Hmotnosti jednotlivých zátěží.....</i>  | 41 |
| <i>Tab. 3. Naměřené hodnoty pórovitosti .....</i>  | 43 |
| <i>Tab. 4. Hodnoty činitele zvukové pohltivosti pro vzorek N2529 .....</i>   | 44 |
| <i>Tab. 5. Maximální pohltivost jednotlivých vzorků v závislosti na .....</i>  | 55 |
| <i>Tab. 6. Závislost maximálního <math>\alpha</math> na pórovitosti pro posunutí pístu <math>x=0</math> cm a <math>x=10</math> cm ....</i> | 56 |
| <i>Tab. 7. Maximální hodnoty útlumu v závislosti na frekvenci pro .....</i>  | 58 |
| <i>Tab. 8. Vliv pórovitosti na přenosový útlum.....</i>  | 58 |

## SEZNAM PŘÍLOH

V příloze budou pro *činitel zvukové pohltivosti* k dispozici tyto frekvenční charakteristiky:

- pohltivost jednoho vzorku při všech tloušťkách a všech posunutích pístu (Obr. 27-30)
- pohltivost všech materiálů se třemi tloušťkami s posunutím pístu  $x=0$  cm a  $x=10$  cm (Obr. 31-33)

Pro *přenosový útlum* budou k dispozici tyto frekvenční charakteristiky:

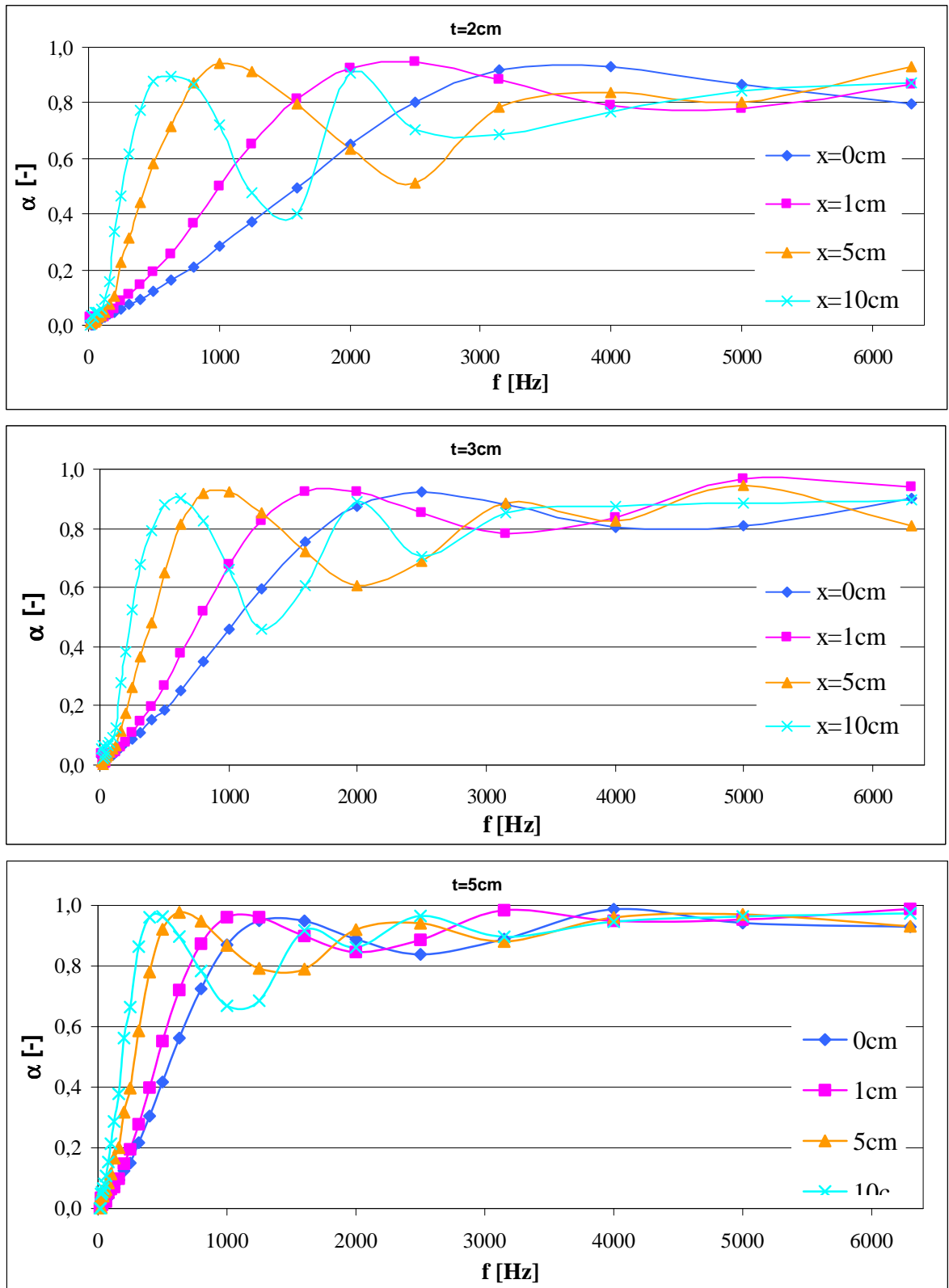
- útlum jednoho vzorku při jedné tloušťce a všech zátěžích (Obr. 34-36)
- pohltivost všech vzorků při všech tloušťkách o zátěžích M0 a M4 (Obr. 37-41)
- pohltivost jednoho vzorku při všech tloušťkách se zátěžemi M0 a M4 (Obr. 42-44)

Vysvětlivky:

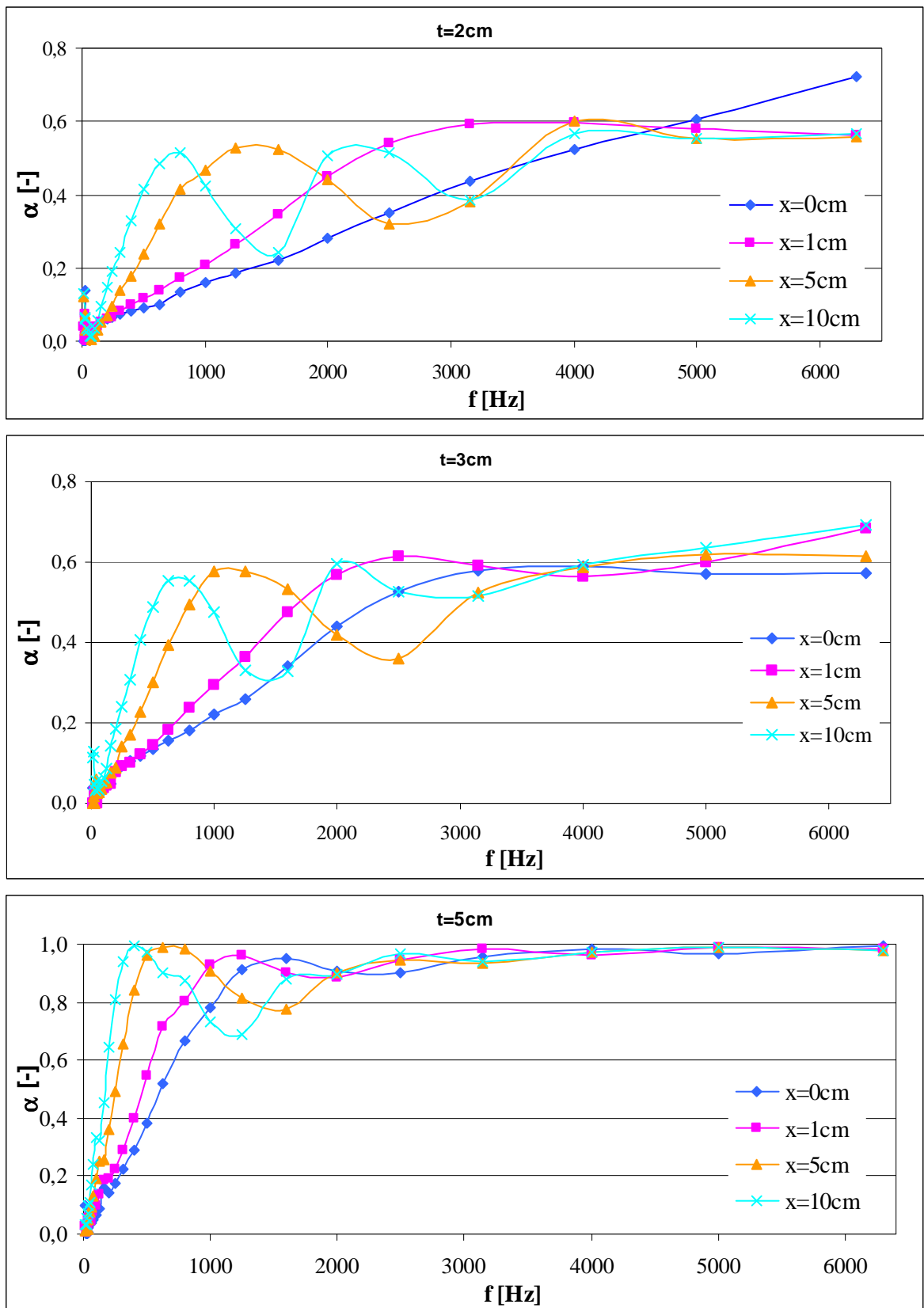
t- značí tloušťku vzorku

x- posunutí pístu v trubici

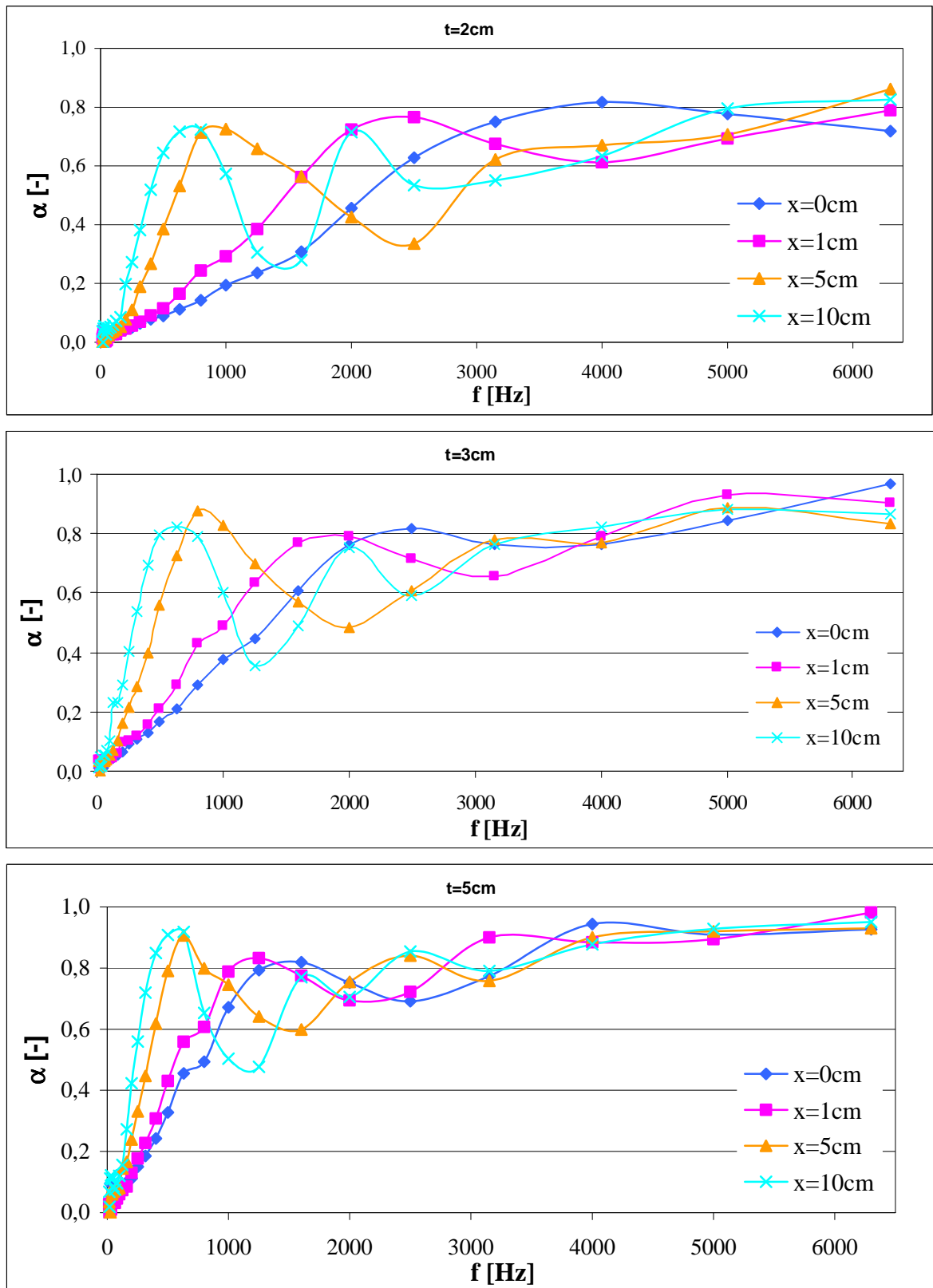
**FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKY ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI**



Obr. 29. Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci vzorku N2529 pro  $t=2,3,5\text{ cm}$  s polohou pístu  $x=0,1,2,5$  a  $10\text{ cm}$ .

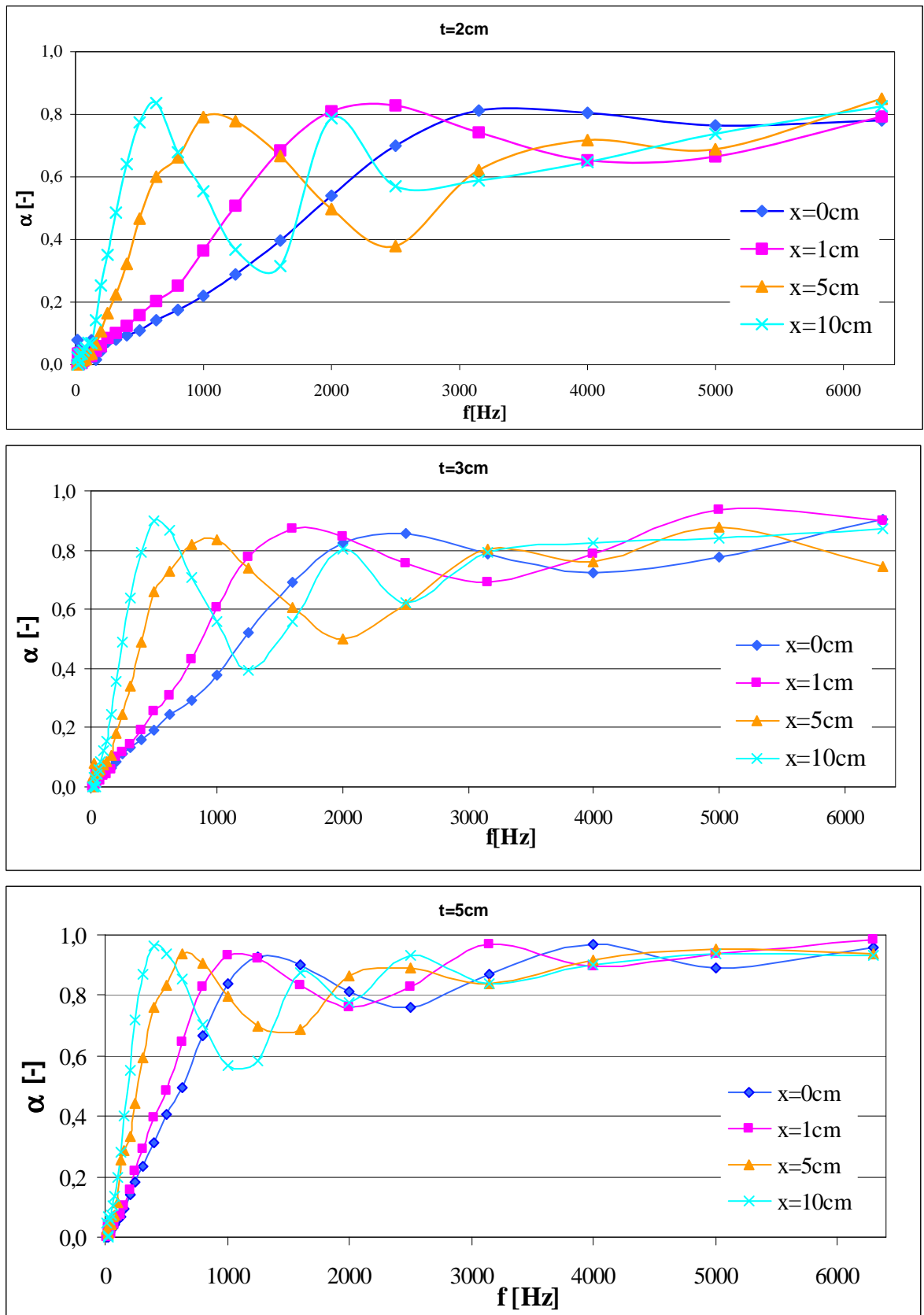


Obr. 30. Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci vzorku N 2538 pro  $t=2,3,5$  cm s polohou pístu  $x=0,1,2,5$  a 10 cm.

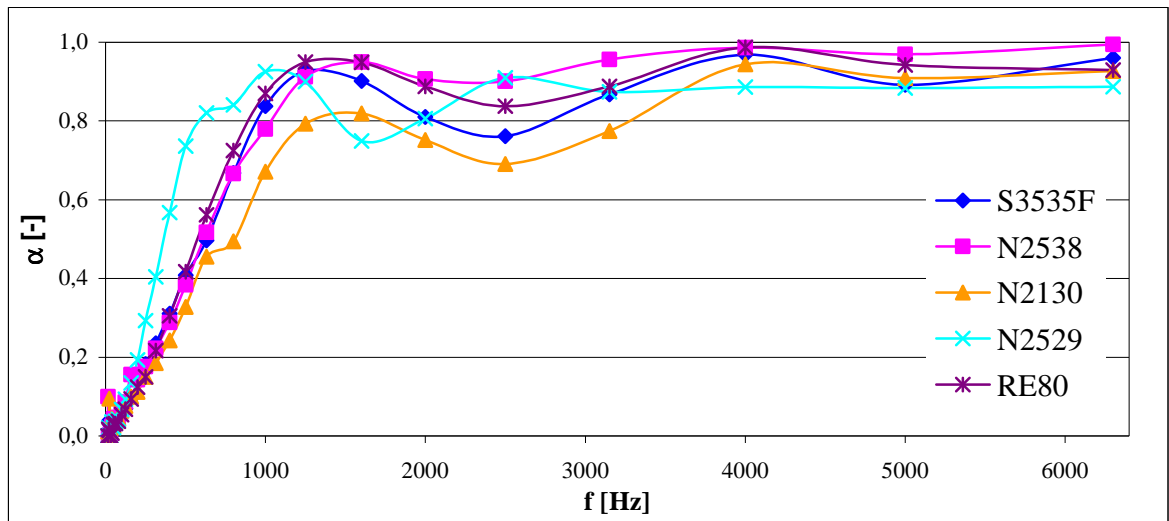


Obr. 31. Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci vzorku N 2130 pro  $t=2,3,5$  cm s polohou pístu  $x=0,1,2,5$  a 10 cm.

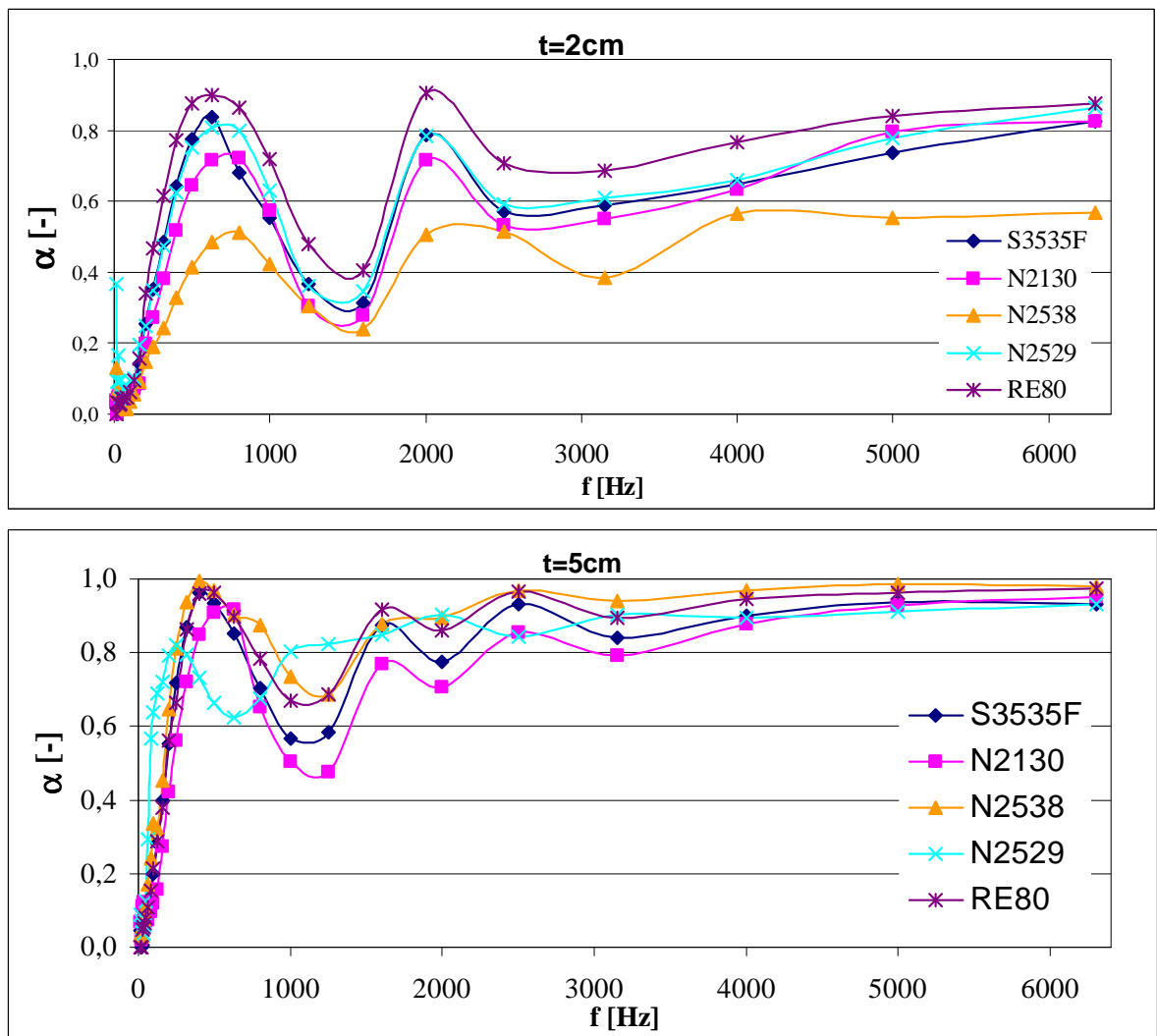




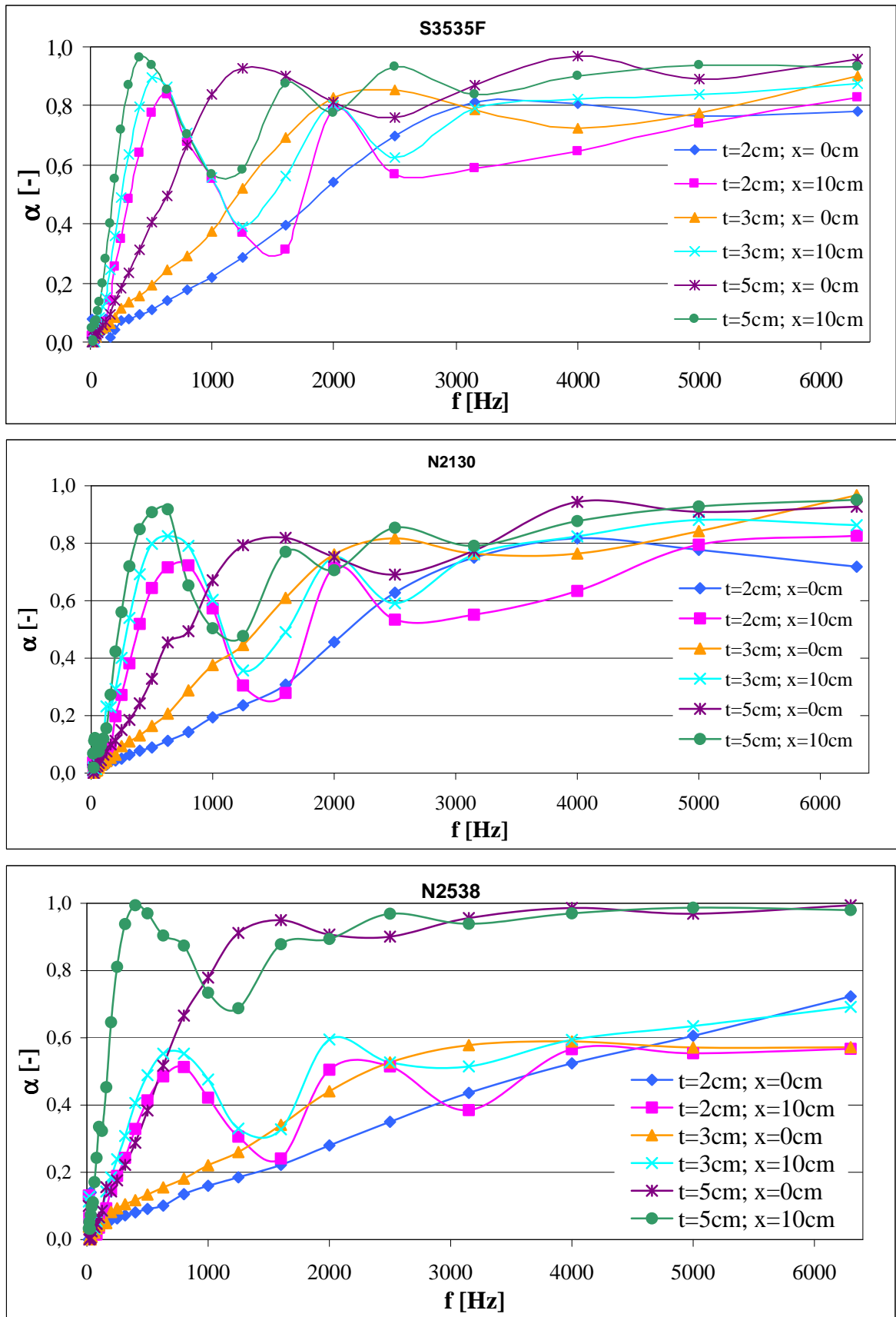
Obr. 32. Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci vzorku S3535F pro  $t=2,3,5$  cm s polohou pístu  $x=0,1,2,5$  a 10 cm.



Obr. 33. Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci pro tloušťku vzorků  $t=5$  cm s polohou pístu  $x=0$  cm

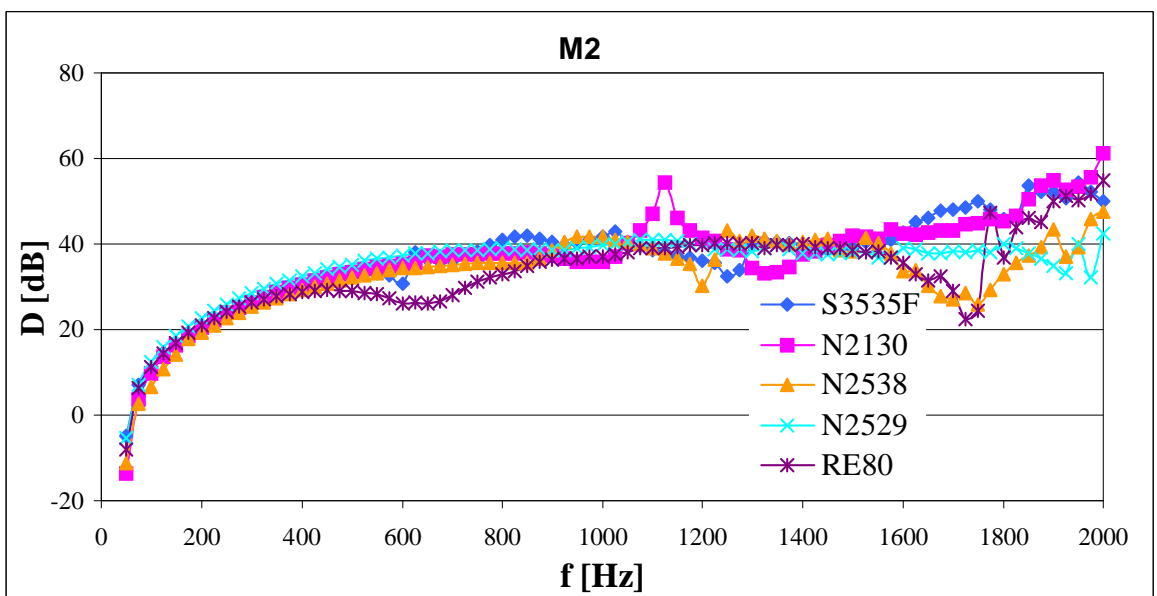
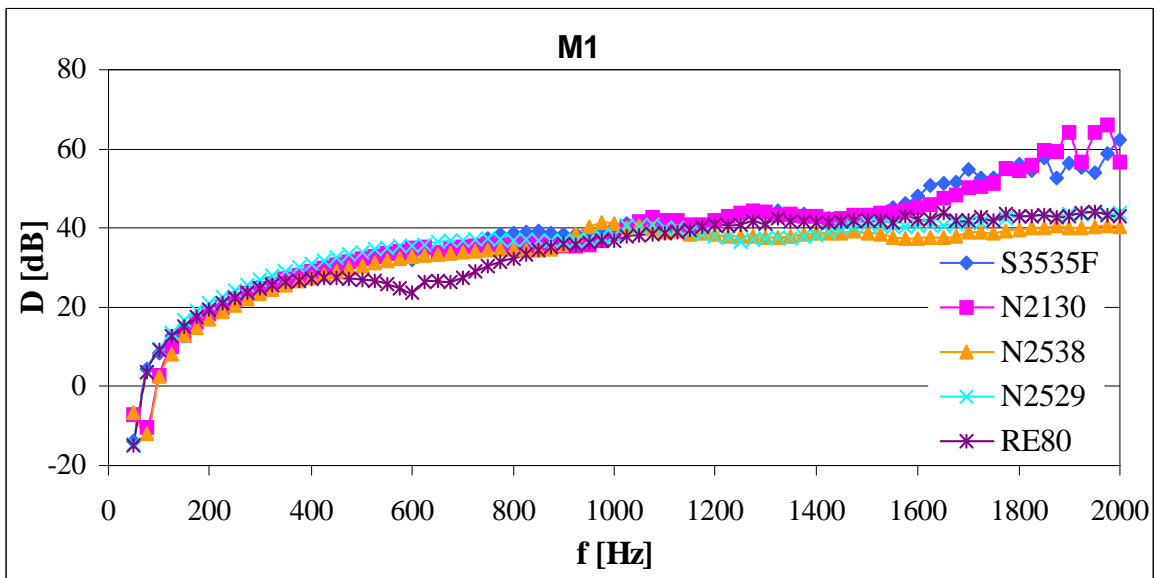
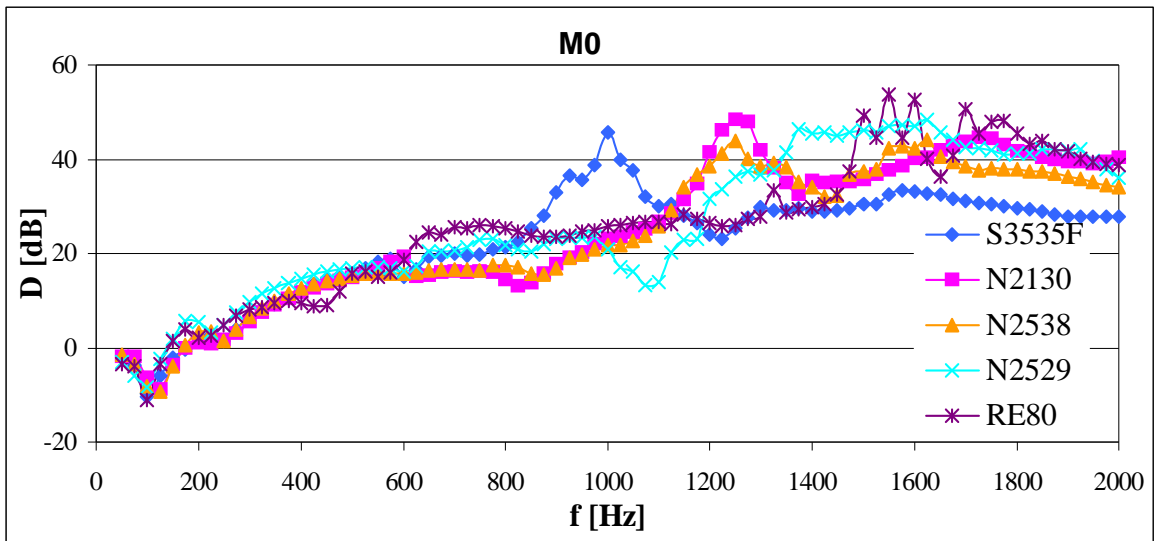


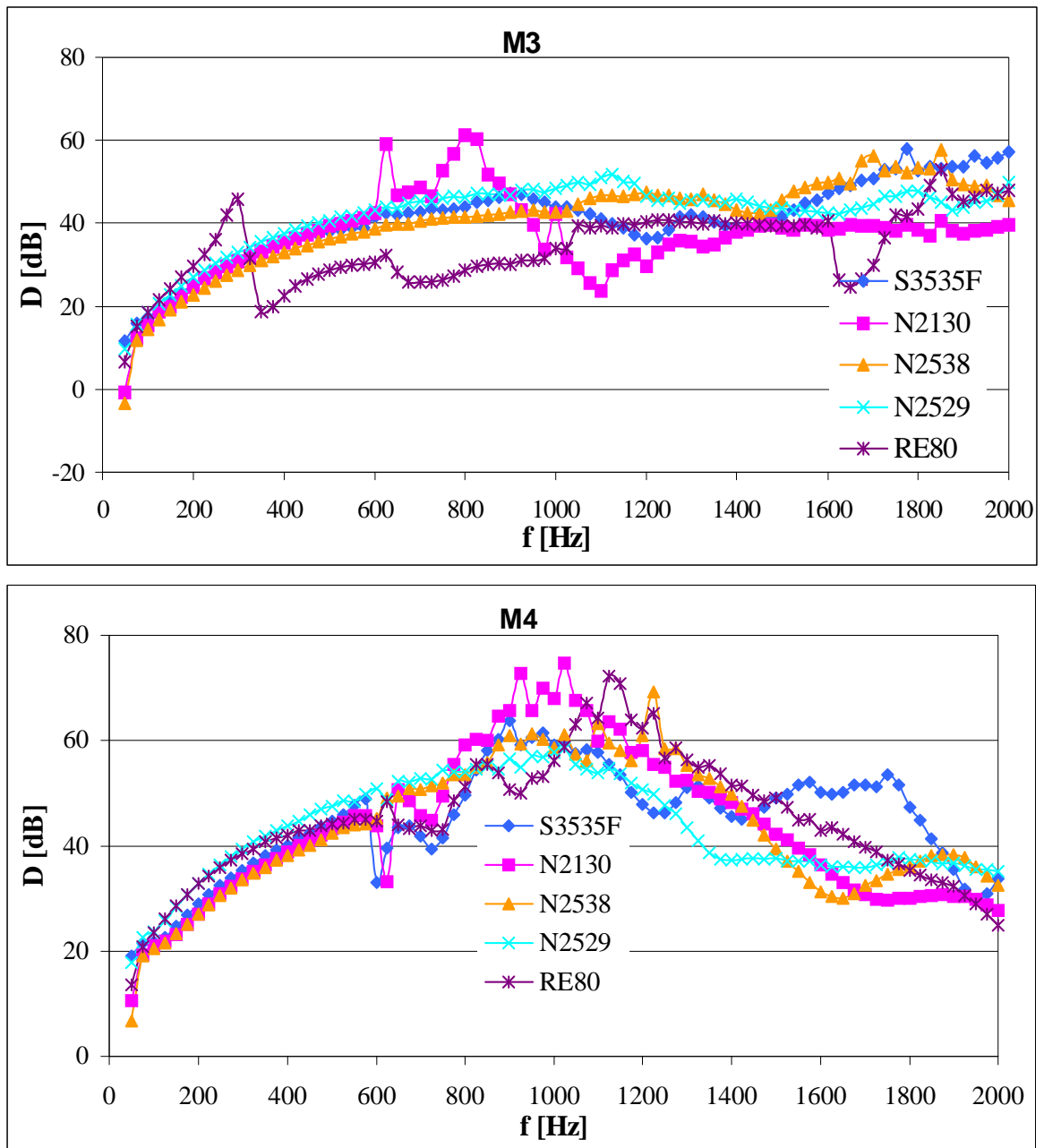
Obr. 34. Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci pro tloušťku vzorků  $t=2,5$  cm s polohou pístu  $x=10$  cm



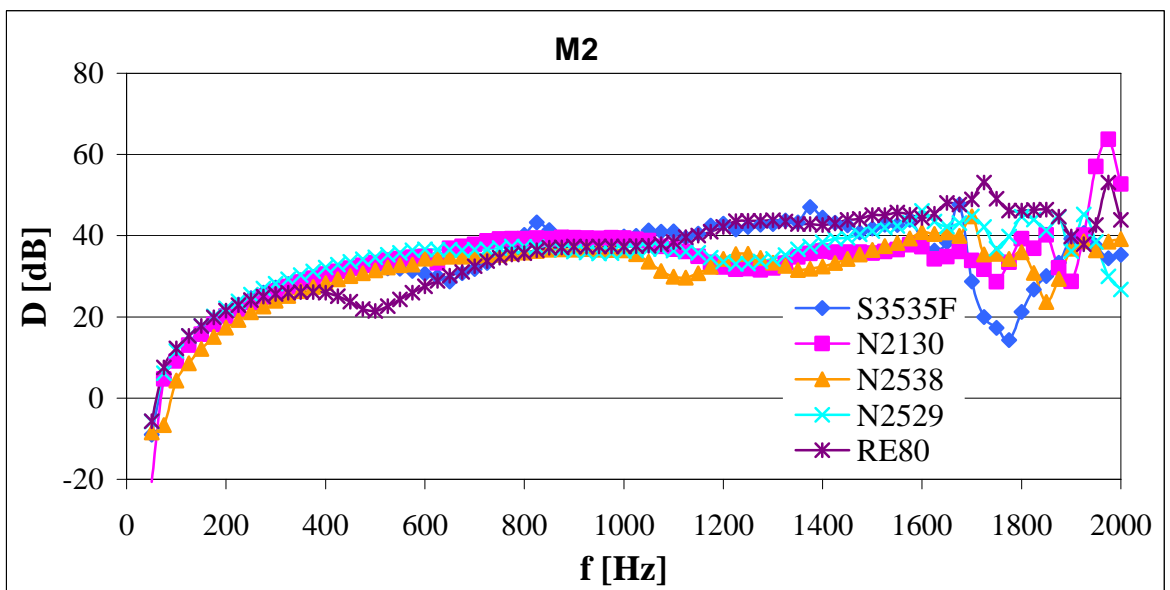
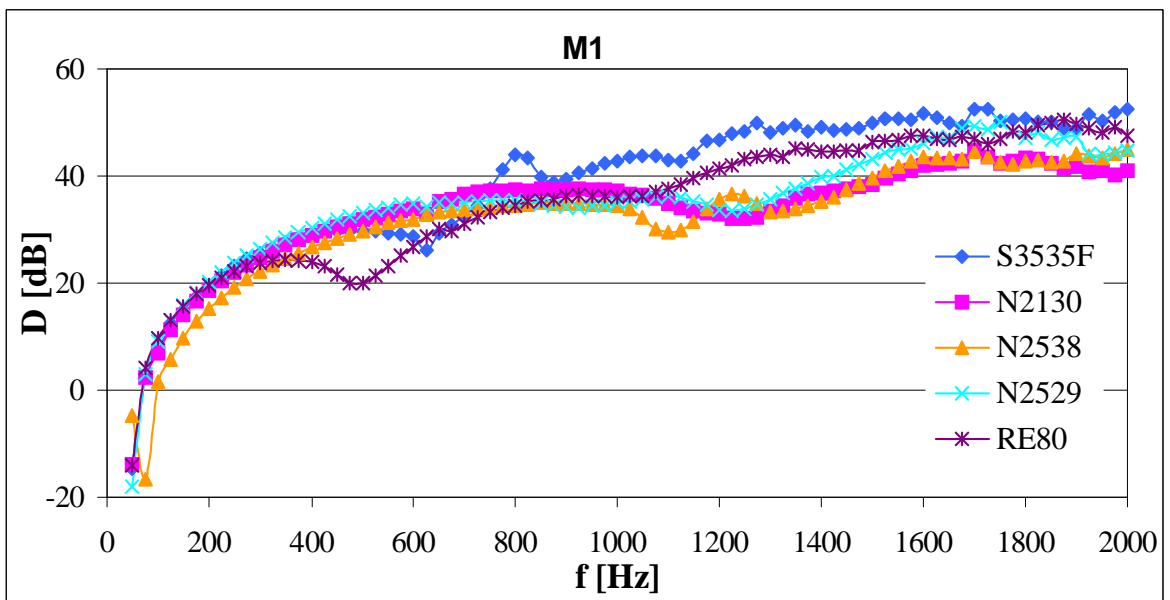
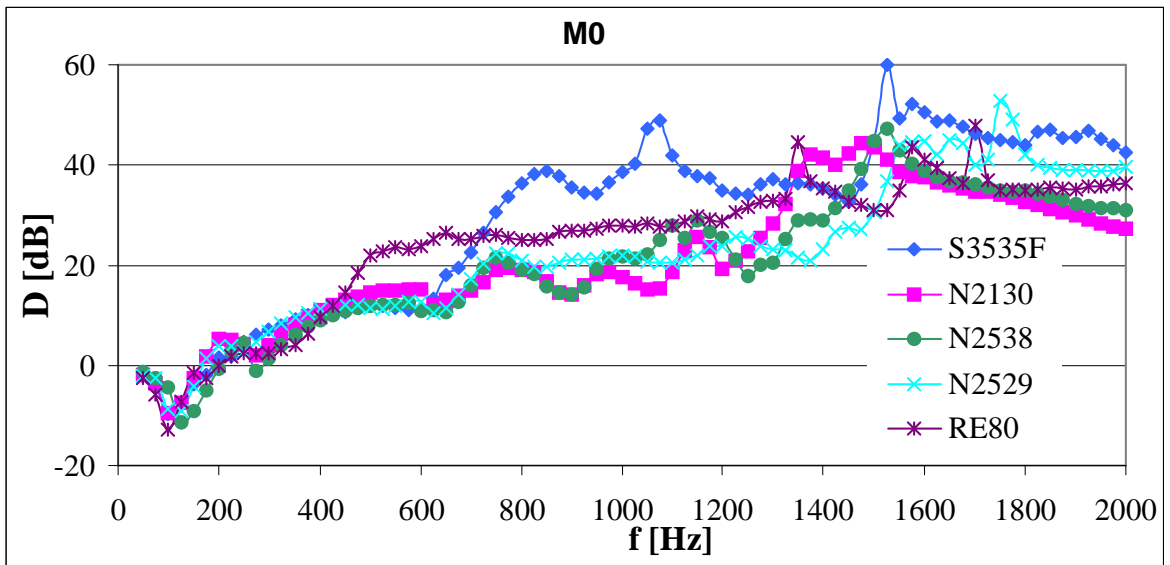
Obr. 35. Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci pro tloušťku vzorků  $t=2,3,5$  cm s polohou pístu  $x=0$  cm a  $x=10$  cm

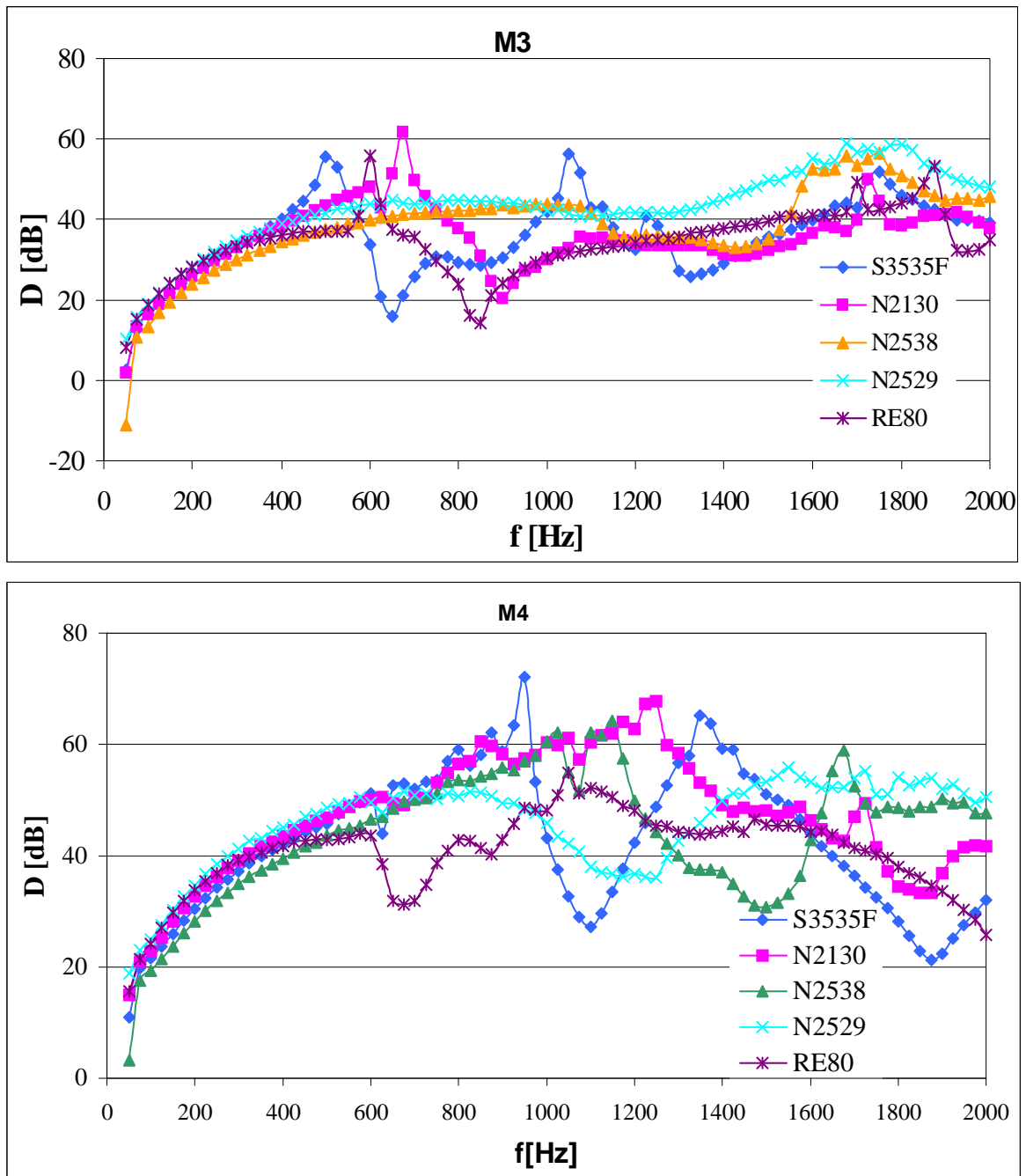
**FREKVENČÍ CHARAKTERISTIKY ÚTLUMU**



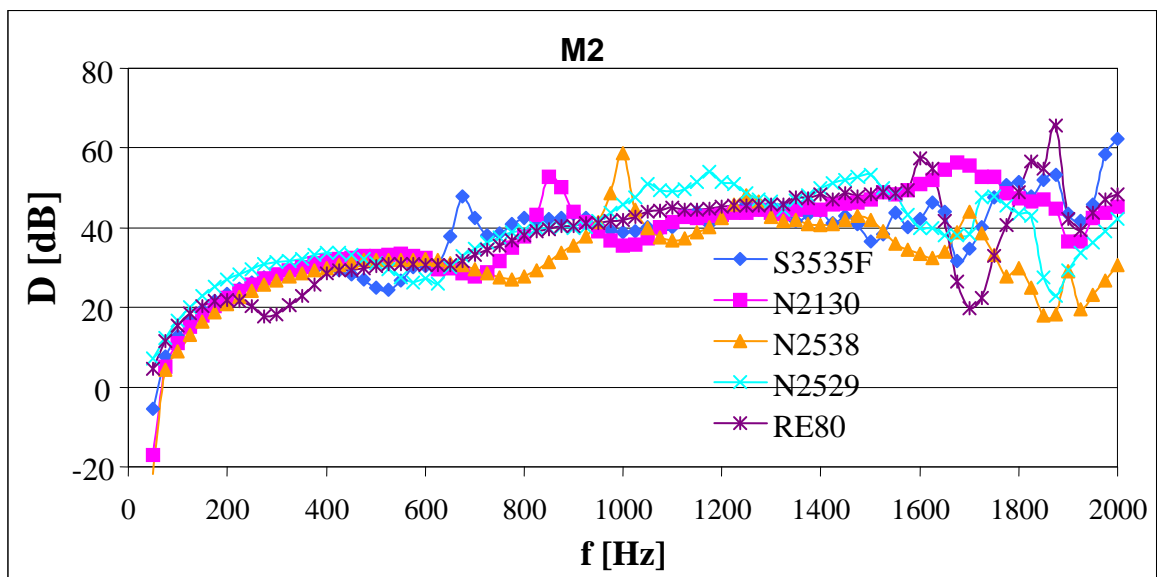
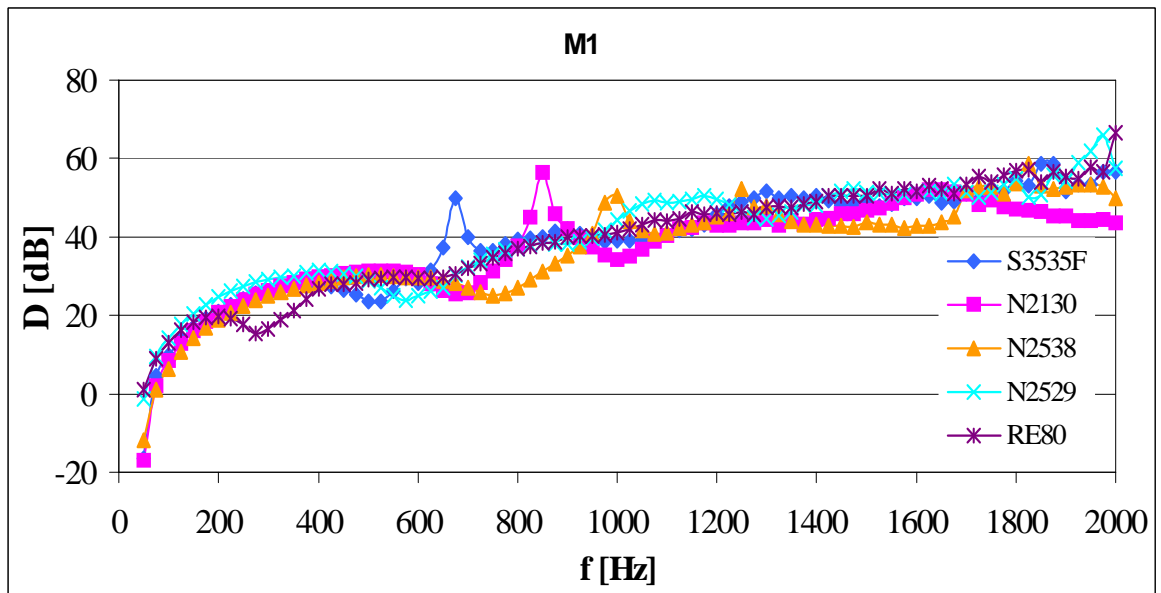
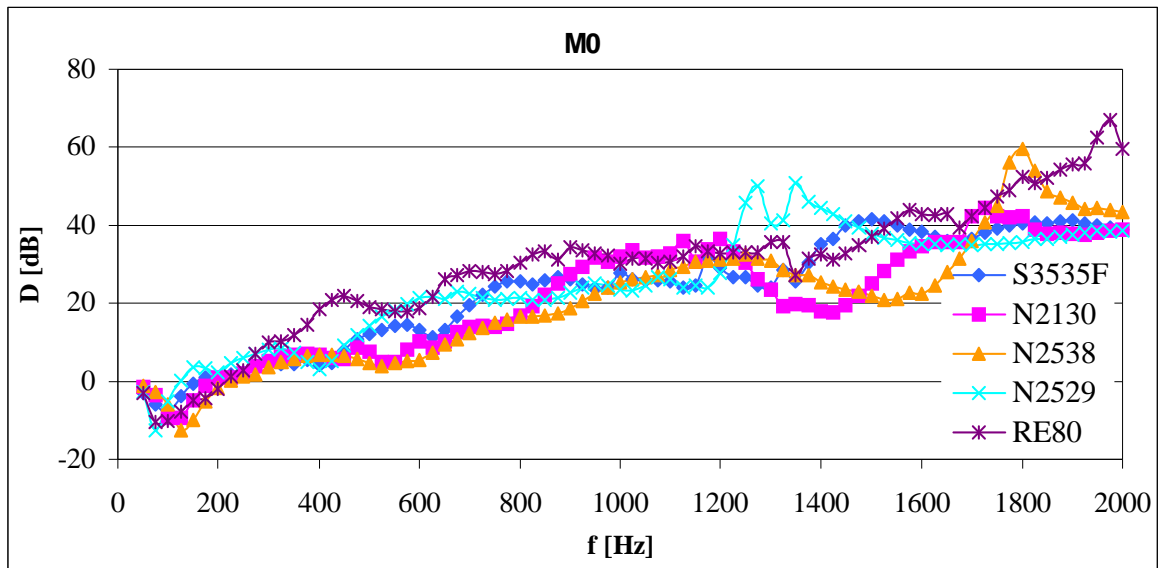


Obr. 36. Závislost útlumu na frekvenci u vzorků  $t=2$  cm se zátěžemi M0 až M4

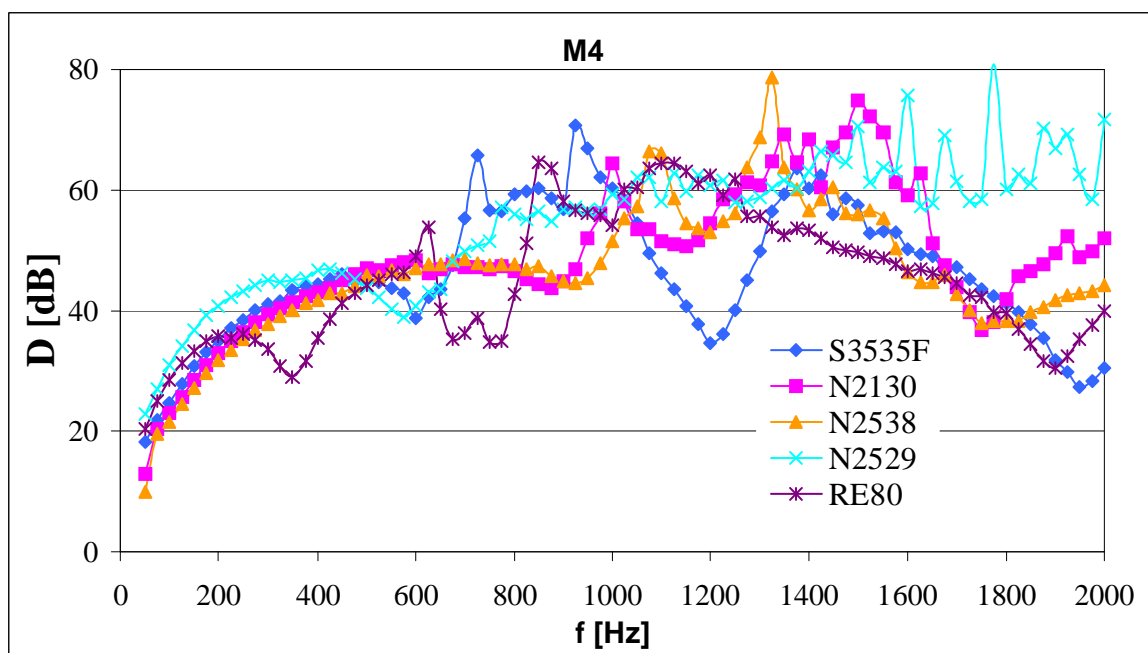
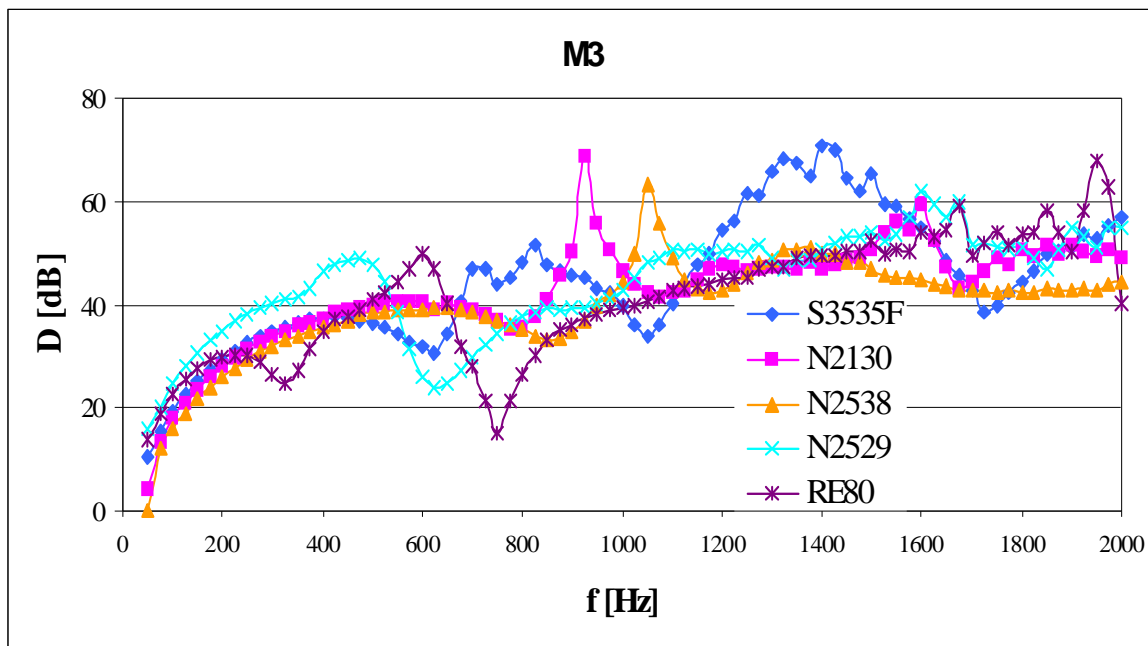




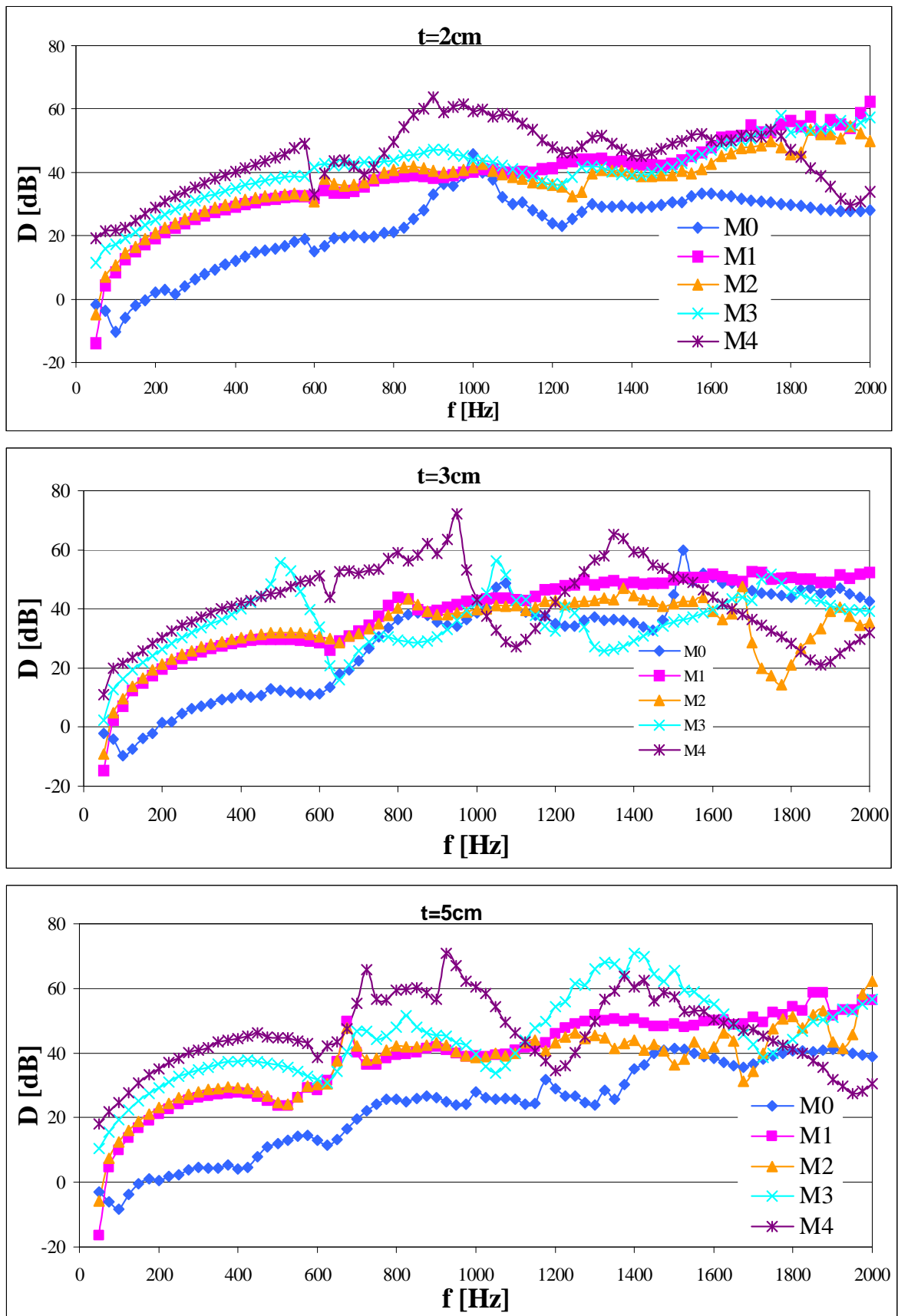
Obr. 37. Závislost útlumu na frekvenci u vzorků  $t=3$  cm se zátěžemi M0 až M4



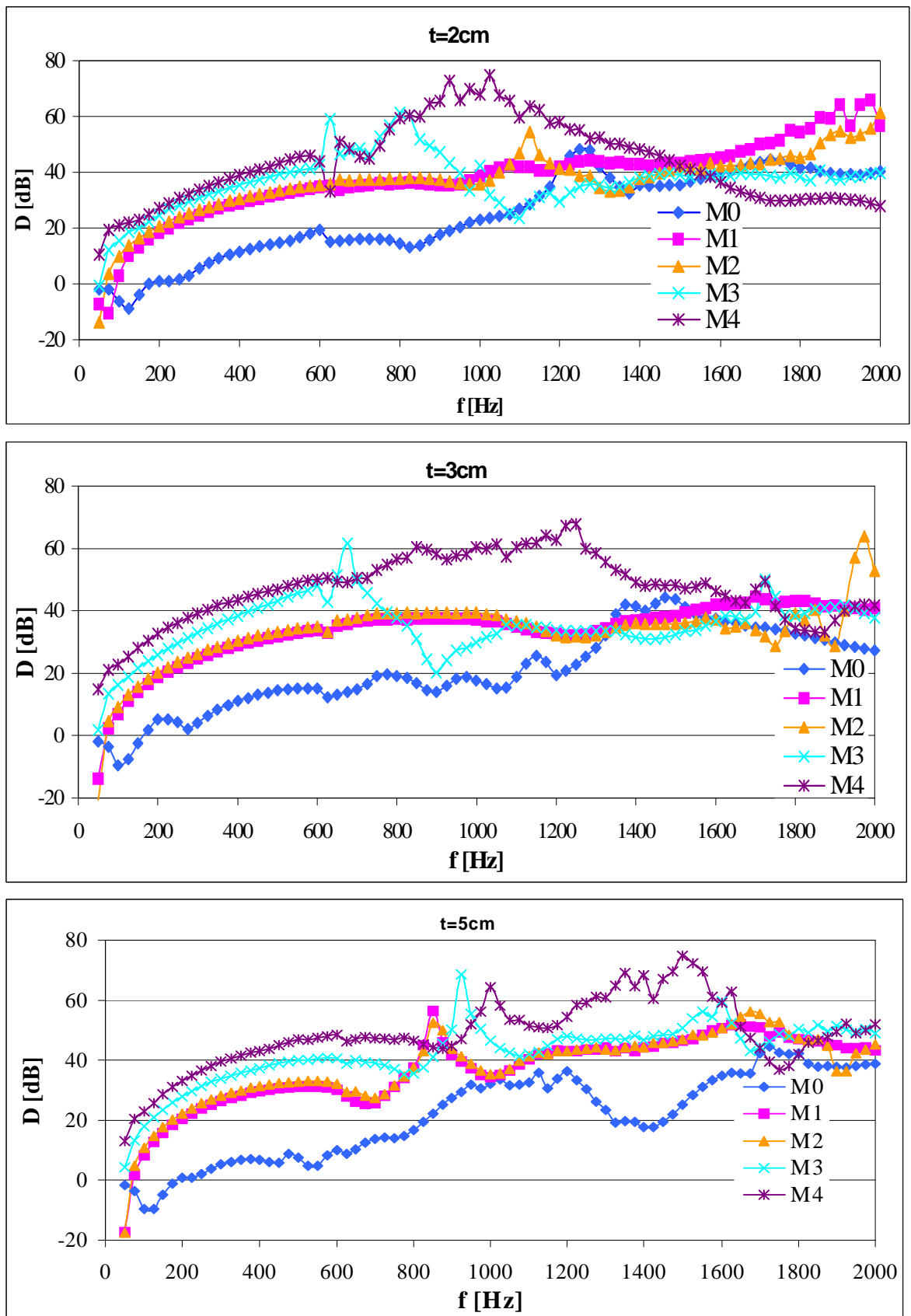




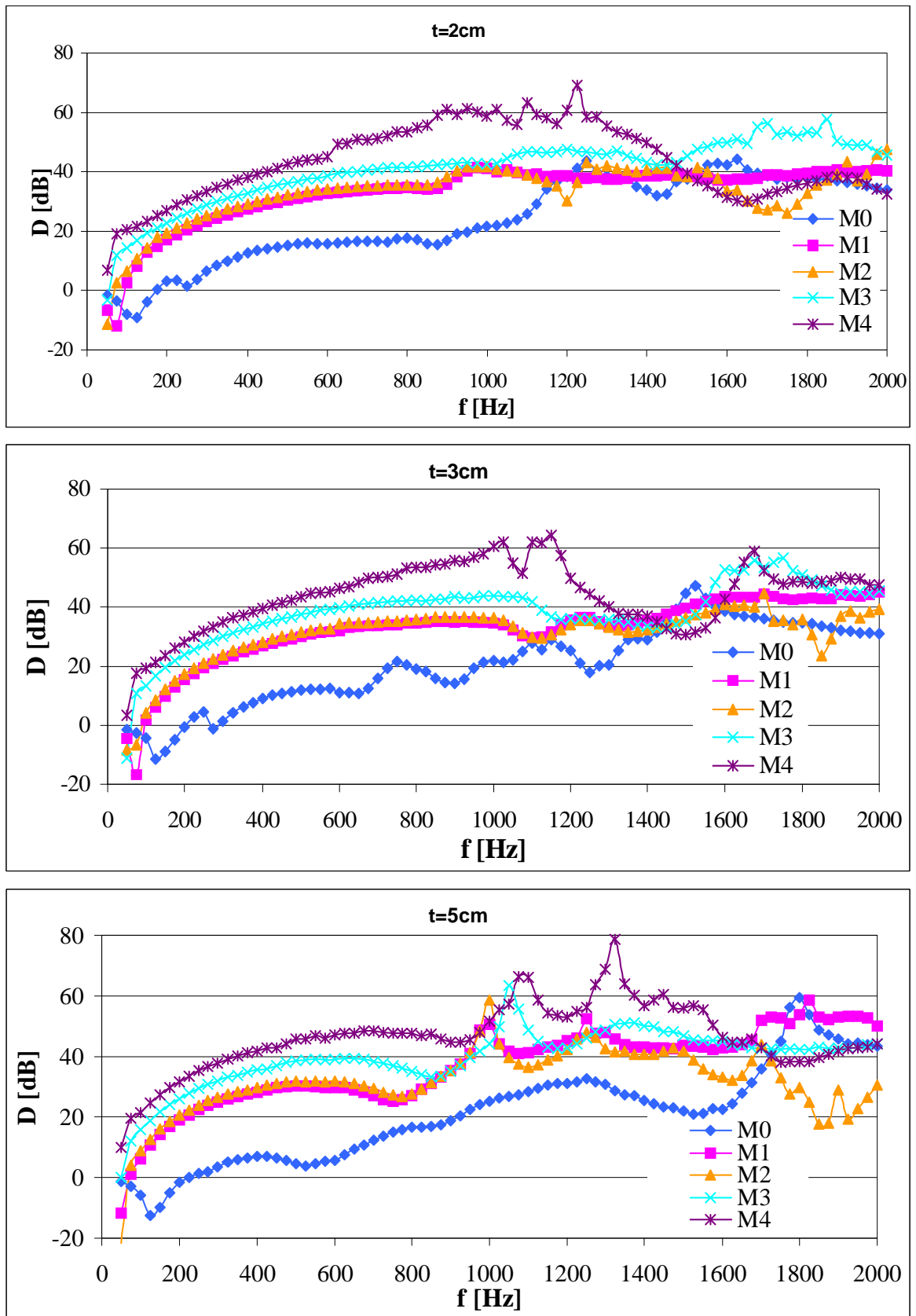
Obr. 38. Závislost útlumu na frekvenci u vzorků  $t=5$  cm se zátěžemi M0 až M4



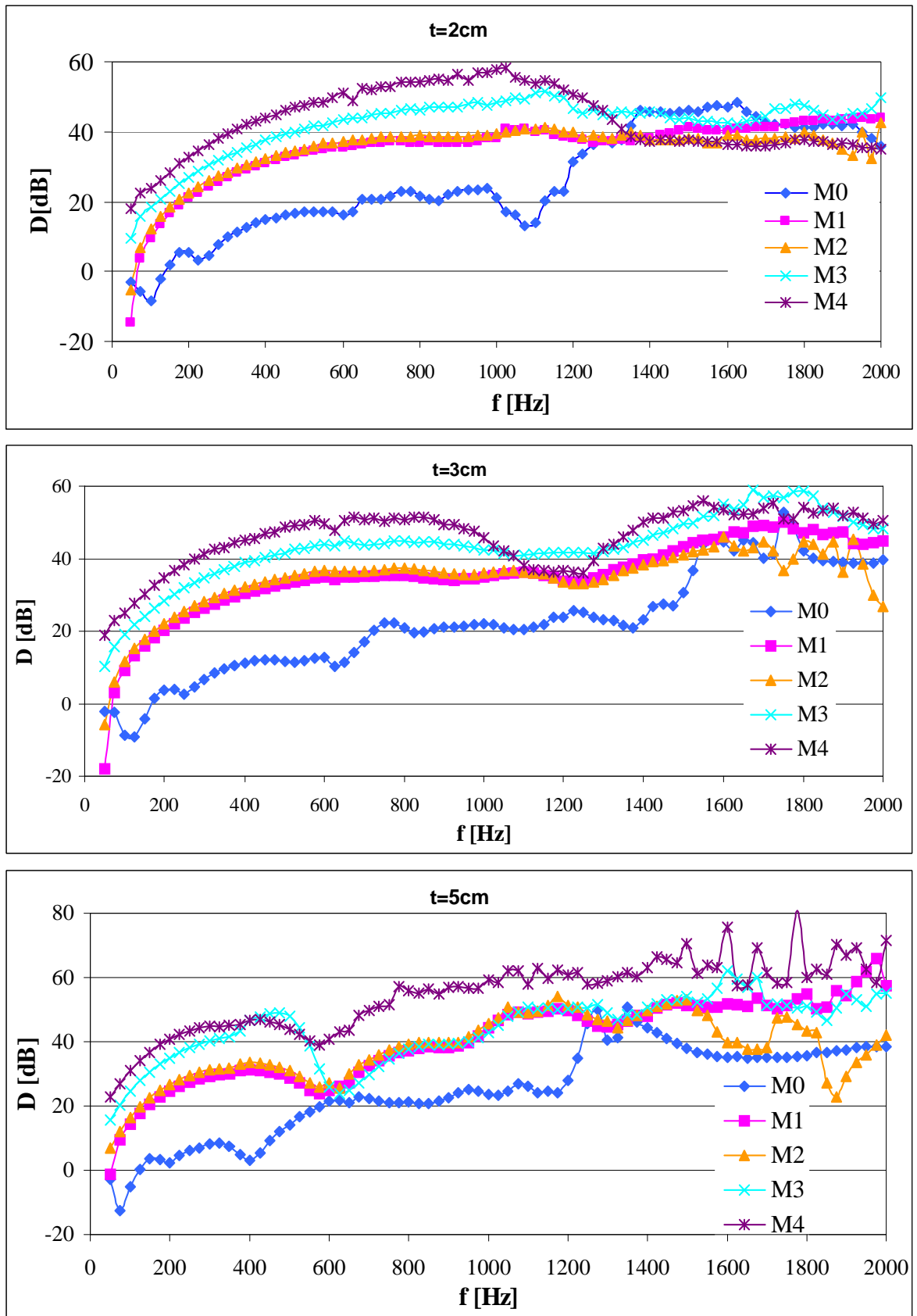
Obr. 39. Závislost útlumu na frekvenci pro vzorek S3535F při  $t=2,3,5$  cm se zátěžemi M0 až M4



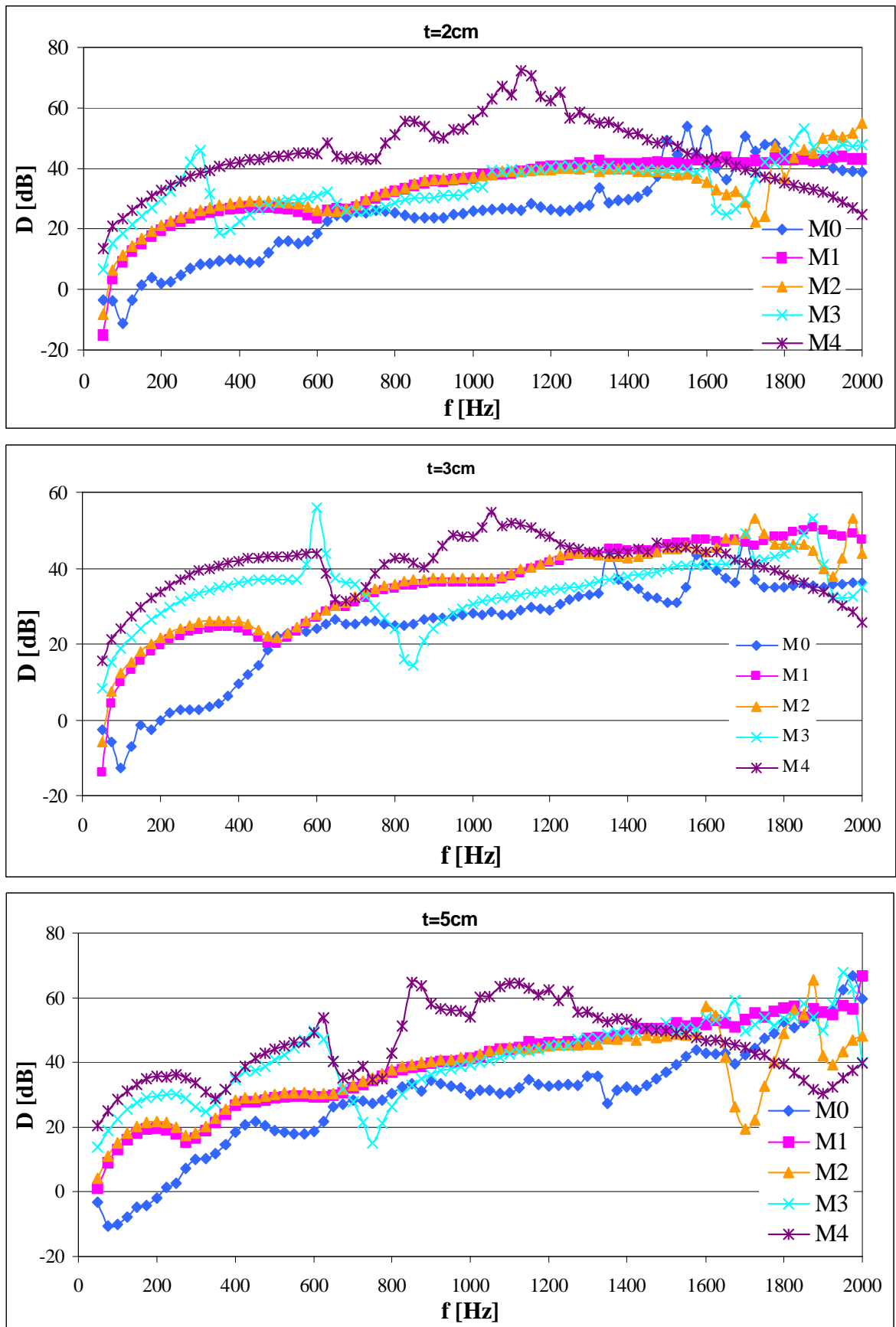
Obr. 40. Závislost útlumu na frekvenci pro vzorek N2130 při  $t=2,3,5$  cm se zátěžemi M0 až M4



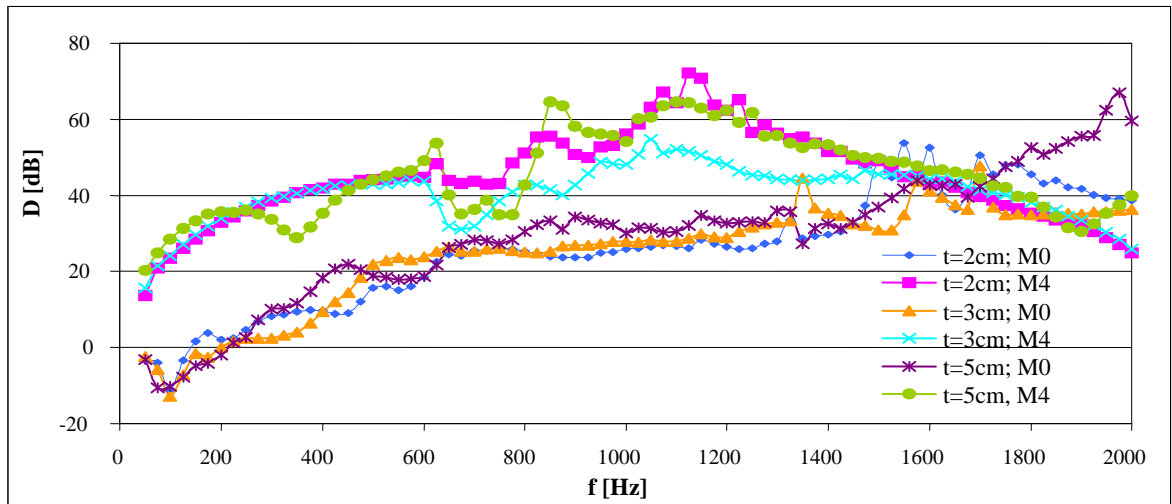
Obr. 41. Závislost útlumu na frekvenci pro vzorek N 2538 při  $t=2,3,5$  cm se zátěžemi M0 až M4



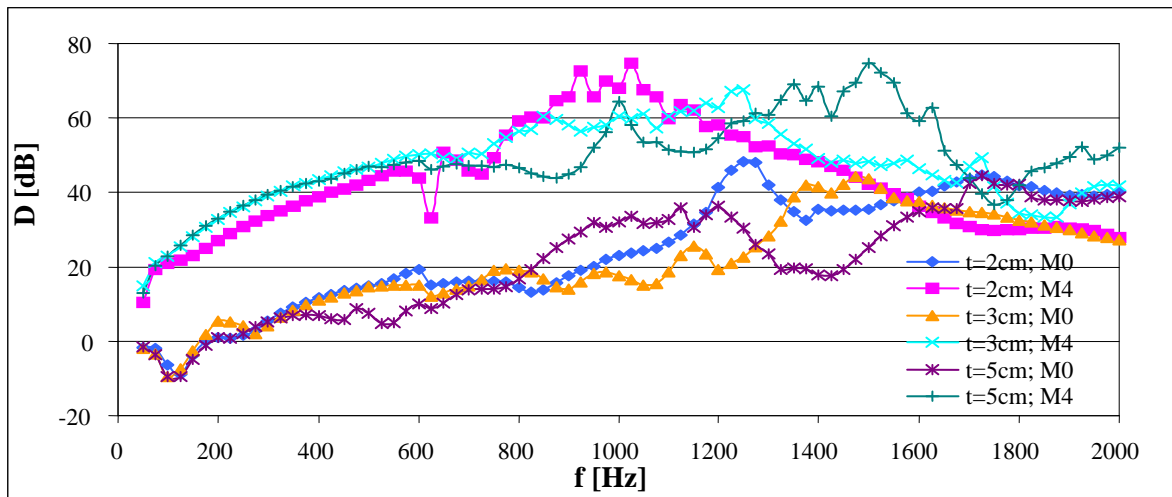
Obr. 42. Závislost útlumu na frekvenci pro vzorek N 2529 při  $t=2,3,5$  cm se zátěžemi M0 až M4



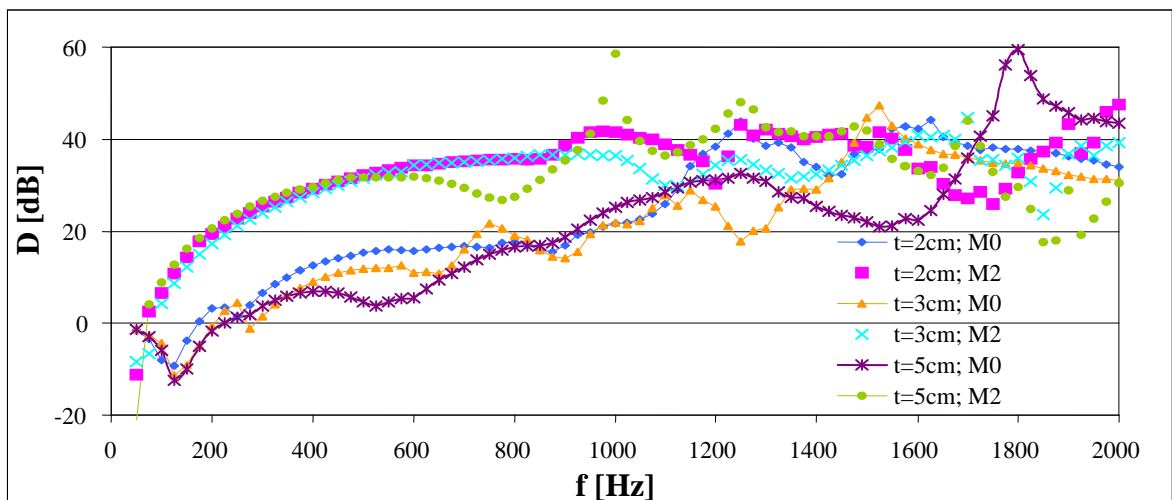
Obr. 43. Závislost útlumu na frekvenci pro vzorek N 2529 při  $t=2,3,5$  cm se zátěžemi M0 až M4



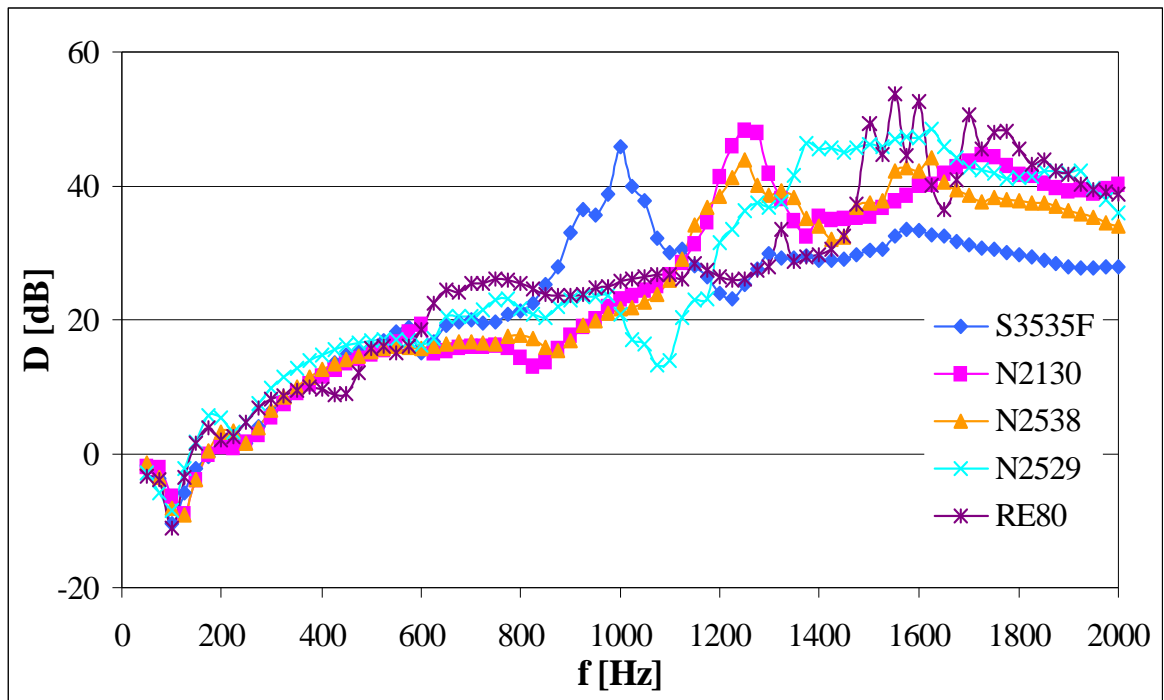
Obr. 44. Závislost útlumu na frekvenci vzorku RE80 při  $t = 2, 3, 5$  cm a zátěžemi M0 a M4



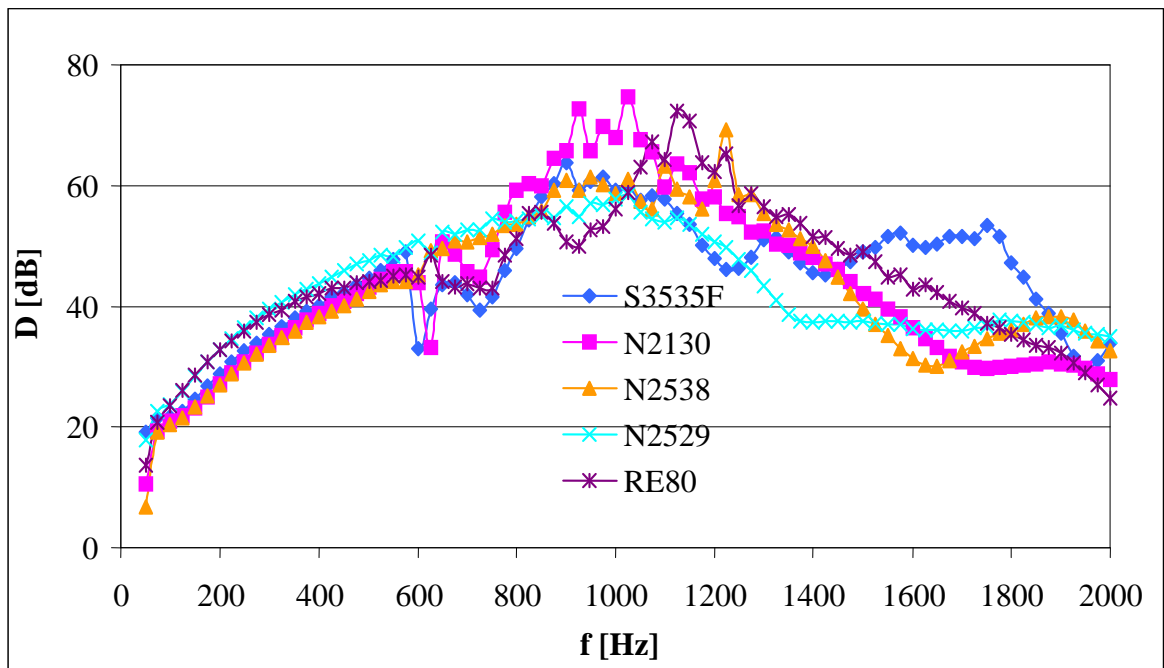
Obr. 45. Závislost útlumu na frekvenci vzorku N2130 při  $t = 2, 3, 5$  cm a zátěžemi M0 a M4



Obr. 46. Závislost útlumu na frekvenci vzorku N2130 při  $t = 2, 3, 5$  cm a zátěžemi M0 a M2



Obr. 47. Závislost útlumu na frekvenci pro všech 5 vzorků při  $t=2$  cm se zátěží  $M_0$



Obr. 48. Závislost útlumu na frekvenci pro všech 5 vzorků při  $t=2$  cm se zátěží  $M_4$