

MENDELOVA UNIVERZITA V BRNĚ

Lesnická a dřevařská fakulta

Ústav nauky o dřevě

Analýza chování dřevěného akustického panelu

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2016

Jan Dostál



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Autor práce: Jan Dostál
Studijní program: Stavby na bázi dřeva
Obor: Stavby na bázi dřeva

Vedoucí práce: Ing. Jan Tippner, Ph.D.

Název práce: **Analýza chování dřevěného akustického panelu**

Zásady pro vypracování:

1. Cílem práce je simulovat akustické chování vybrané konstrukce dřevěného akustického panelu pomocí metody konečných prvků. V první části literárního přehledu práce stručně pojedná o problémech stavební akustiky a možnostech konstrukce akustického panelu, dále se bude věnovat analýze akustických vlastností stavebních konstrukcí, využití výpočetních metod v této oblasti, postupně se zaměří na možnosti využití metody konečných prvků k simulování akustického chování akustických panelů, zejm. z pohledu absorpce zvuku.
2. V prostředí ANSYS budou sestaveny numerické modely několika konstrukcí panelu a na základě výstupů simulací budou tyto konstrukce porovnány zejm. z pohledu odrazu resp. absorpce zvukových vln. Zhotoveny budou funkční vzorky panelu konstrukčně vycházející z analýzy akustických vlastností a možností výroby (estetika, technologie, ekonomika). Provedena bude pravděpodobnostní numerická citlivostní analýza sledující posouzení vlivu jednotlivých faktorů na chování desky (materiál, skladba, geometrie apod.), výstupy budou diskutovány.
3. Dokument práce bude dodržovat standardní strukturu vědecké práce a respektovat směrnici děkana LDF č. 4/2014 "O úpravě písemných prací a o citaci dokumentů užívaných v kvalifikačních pracích podávaných na LDF"

Rozsah práce: 60 stran

Literatura:

1. MOAVENI, S. *Finite element analysis : theory and application with ANSYS*. 3. vyd. Upper Saddle River, N.J.: Pearson Prentice Hall, 2008. 861 s. ISBN 978-0-13-241651-1.
2. KAŇKA, J. *Akustika stavebních objektů*. 1. vyd. Brno: ERA, 2009. 145 s. ISBN 978-80-7366-140-3.
3. ZIMMERMAN, W B J. *Process modelling and simulation with finite element methods*. Singapore : World Scientific, 2004. 382 s. Series on stability, vibration, and control of systems. ISBN 981-238-793-5.
4. MECHEL, F. *Formulas of Acoustics*. Berlin: Springer, 2002. 1175 s.
5. FICKER, T. *Handbook of building thermal technology, acoustics and daylighting : Příručka stavební tepelné techniky, akustiky a denního osvětlení*. 1. vyd. Brno: CERM, 2004. 266 s. ISBN 80-214-2670-5.

6. VAVERKA, J. *Akustika. Souhrn kritériálních požadavků a výpočtových metod v oboru : stavební a prostorové akustiky*. Brno: VUT, 1996. 156 s. ISBN 80-214-0743-3.
7. MADENCI, E. -- GUVEN, I. *The finite element method and applications in engineering using ANSYS*. New York: Springer, 2006. 686 s. ISBN 0-387-28289-0.
8. TOPPING, B H V. *Advances in finite element technology*. Edinburgh: Civil-Comp, 1996. 453 s. ISBN 0948749415.
9. TOPPING, B H V. -- KUMAR, B. *Developments in analysis and design using finite element methods*. Edinburgh: Civil-Comp, 1999. 282 s. ISBN 0-948749-61-X.
10. ZIENKIEWICZ, O. -- TAYLOR, R. *The finite element method : Solid and fluid Mechanics, dynamics and non-linearity . Volume 2.4*. vyd. Berkshire: McGraw-Hill, 1991. 807 s. ISBN 0-07-084175-6.
11. BUCUR, V. *Acoustics of Wood*. Boca Raton: CRC Press, 1995. 284 s. ISBN 0-8493-4801-3.
12. VAVERKA, J. a kol. *Stavební fyzika I*. 1. vyd. Brno: VUTIUM, 1998. 343 s. Učebnice. ISBN 80-214-1283-6.
13. MRLÍK, F. *Stavební tepelná technika a stavební akustika*. 3. vyd. Brno: VUT, 1992. 172 s. ISBN 80-214-0481-7.

Datum zadání: listopad 2014

Datum odevzdání: duben 2016

Jan Dostál
Autor práce

Ing. Jan Tippner, Ph.D.
Vedoucí práce

doc. Ing. Vladimír Gryc, Ph.D.
Vedoucí ústavu

doc. Ing. Radomír Klvač, Ph.D.
Děkan LDF MENDELU

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem práci: **Analýza chování dřevěného akustického panelu** zpracoval samostatně a veškeré použité prameny a informace uvádím v seznamu použité literatury. Souhlasím, aby moje práce byla zveřejněna v souladu s § 47b Zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách ve znění pozdějších předpisů a v souladu s platnou Směrnicí o zveřejňování vysokoškolských závěrečných prací.

Jsem si vědom, že se na moji práci vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, a že Mendelova univerzita v Brně má právo na uzavření licenční smlouvy a užití této práce jako školního díla podle §60 odst. 1 autorského zákona.

Dále se zavazuji, že před sepsáním licenční smlouvy o využití díla jinou osobou (subjektem) si vyžádám písemné stanovisko univerzity, že předmětná licenční smlouva není v rozporu s oprávněnými zájmy univerzity a zavazuji se uhradit případný příspěvek na úhradu nákladů spojených se vznikem díla, a to až do jejich skutečné výše.

V Brně, dne: 20. 4. 2016

podpis studenta:

Poděkování

Chtěl bych poděkovat rodičům za určitý druh finanční podpory, díky které jsem se mohl realizovat i na jiných polích, než ve škole a v práci. Vedoucímu své práce Ing. Janu Tippnerovi, Ph.D. za odborné vedení, praktické rady a za trpělivost, kterou se mnou měl. Svým spolužákům, zvláště některým, ale i jiným, kteří mi vždy v pravou chvíli pomohli táhnout lano. V neposlední řadě také svému spolubydlícímu Viktorovi, vždyť činil po tři roky můj pobyt v Brně o tolik příjemnějším.

Autor

Jan Dostál

Název práce

Analýza chování dřevěného akustického panelu

Abstrakt

Bakalářská práce se v první části zabývá zhotovením numerického modelu v prostředí ANSYS za využití skriptovacího jazyka APDL pro dřevěný akustický panel, který by měl sloužit k zlepšení akustického komfortu v hudebních zkušebnách, veřejných budovách, přednášecích sálech či v dílnách. Je zde popsán současný stav této problematiky a jeho obvyklá řešení. V druhé části se práce zabývá vlastní výrobou panelu. Jsou zhotoveny tři varianty panelu: A, B a C, z nichž u každé jsou popsány její výhody i nevýhody. Panely jsou pak krátce konfrontovány s ostatními materiály dostupnými na trhu. Jsou diskutovány možné varianty zlepšení vlastností panelu, možnosti nastavení a možnost maximální customizace výrobku.

Klíčová slova

Akustika, akustické vlastnosti dřeva, index přenosu řeči, rozptylový koeficient, absorpční koeficient, srozumitelnost, odraz, modální analýza, harmonická analýza, ANSYS, APDL.

Autor

Jan Dostál

The title of work

Analysis of the behavior of a wooden acoustic panel

Abstract

In its first part, bachelor thesis investigates making of numerical model of wooden acoustic panel, using scripting language APDL. This panel should improve acoustic comfort in music rooms, public buildings, auditorias or in workrooms. Actual situation of this issue and common solutions are described. In the second part, thesis contains process of producing the panel. Three types of panels are made: A, B, C, for each of them, advantages and disadvantages are described. Panels are confront with another commonly available panels. Another options how to improve properties of panel, adjustability and possibilities of maximum customization of product, are discussed.

Key words

Acoustics, acoustic properties of wood, speech transmission index, scattering coefficient, absorption coefficient, intelligibility, reverberation, modal analysis, harmonic analysis, ANSYS, APDL.

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Cíl práce.....	2
3	Literární přehled	3
3.1	Akustika dřeva	3
3.2	Akustika ve veřejných budovách	3
3.3	Akustika stavebních objektů	7
3.4	Nejčastější akustické materiály.....	9
3.4.1	Pórovité materiály na bázi akustických pěn	9
3.4.2	Basová past	10
3.4.3	Helmholtzův rezonátor	11
3.5	Schopnost materiálu rozptýlit zvukovou vlnu v závislosti na tvaru povrchu	12
3.5.1	Vliv tvaru prvku.....	14
3.5.2	Vliv výšky prvku	16
3.5.3	Vliv poměru mezi stranami obdélníku.....	17
4	Metodika	18
4.1	Numerický model.....	18
4.1.1	Metoda konečných prvků.....	18
4.1.2	Základní akustické rovnice	19
4.1.3	Tvorba numerického modelu	19
4.1.4	Tvorba funkčního vzorku.....	22
5	Výsledky a diskuse	24
5.1	Numerický model.....	24
5.1.1	Modální analýza.....	24
5.1.1.1	Panel A.....	24
5.1.1.2	Panel B	30
5.1.1.3	Panel C.....	35
5.1.2	Harmonická analýza	41
5.1.2.1	Panel A.....	41
5.1.2.2	Panel B.....	42
5.1.2.3	Panel C.....	43
5.2.2	Panel B	48
5.2.3	Panel C.....	49
5.3	Posouzení modelu v konfrontaci s výzkumem Leeho a Sakumy	52
5.4	Customizace.....	53
5.5	Montáž	56

5.5.1	Instalace na svislou konstrukci	56
5.5.2	Instalace na vodorovnou konstrukci	58
5.6	Náklady	59
5.7	Srovnání cen	61
5.8	Expedice, doprava.....	63
6	Závěr	65
7	Summary	66
8	Seznam literatury	67
9	Přílohy.....	68

1 Úvod

V dílnách, zkušebnách, přednášecích místnostech i jiných prostorech se často vyskytuje problém dozvuku. Vzniká nadměrný hluk nebo dochází k nepříjemnému dozvuku. Prostor tak přestává komfortně plnit funkci, ke které byl určen.

Již dříve jsem si v hudebních studiích, a díky internetu i ve zkušebnách špičkových hráčů, všiml po stěnách náhodně rozestavěných dřevěných tělísek, většinou kvádrového tvaru. Tato tělesa byla zvláště zintenzivněna v oblasti bicích nástrojů,

Když jsem se však ptal, bylo mi vesměs odpovídáno, že dřevěná tělíska jsou rozestavěna víceméně náhodně a žádný systém v tom není. Navíc šlo o drahá dřeva, splňující kromě této funkce i funkci designovou. Vystala tedy otázka, na kolik se na potlačování dozvuku podílí druh dřeva, na kolik tvar tělesa, jeho povrch a hustota, dále vztah mezi výškou a základnou, četnost prvků na m^2 , vzdálenosti základen, druh rozestavění. A kdybychom tyto vstupy dále ještě vztahovali k poměrům stěn místnosti vůči stropu, musela by se tato práce stát dlouholetým výzkumem.

Nakonec tedy zvítězila myšlenka sestavit jednoduchý, co nejobecnější dřevěný akustický panel a na něm vyzkoušet jeho funkci. Důležitým faktorem byla také cena, protože akustické materiály běžně dostupné na současném trhu nejsou z nejlevnějších a výbava středně velkého prostoru stojí řádově desítky tisíc korun. Toto se navíc týká materiálů na bázi akustických pěn, ne panelů dřevěných. Tam jsou ceny už tak závratné, že stojí za uvažování, zda jde o pouhé funkční akustické panely nebo snad o umělecká díla. Pěnové materiály navíc nepracují s usměrňováním zvuku, spíše ho pohlcují a ztlumují. A to například pro hudební produkci není úplně vhodné.

Panely byly nakonec sestaveny tři. Jako výchozí tvar, který bude tvořit povrch panelu, byl vybrán kvádr. Je to nejjednodušší prvek na výrobu (na rozdíl od sinusoidy či jehlanu). A jako měnící se parametr ovlivňující akustické prostředí byla zvolena výška kvádrů.

2 Cíl práce

Cílem práce je sestavit numerický model akustického dřevěného panelu pomocí metody konečných prvků v prostředí programu ANSYS, pomocí skriptovacího jazyka APDL. Výstupem bude popis simulace, popis jednotlivých modelů, vyhodnocení výsledků navrhovaných konstrukcí, posouzení vlivu jednotlivých faktorů na chování desky (materiál, skladba, geometrie apod.), výstupy budou diskutovány.

Cílem práce je zhotovit funkční vzorky panelu konstrukčně vycházející z analýzy akustických vlastností a možností výroby (estetika, technologie, ekonomika). Takového panelu, který by v přednášecích sálech, hudebních sálech nebo hudebních zkušebnách snižoval dobu dozvuku a tím vytvářel prostředí, kde je možno se zvukem komfortně pracovat, tvořit, ale zároveň (na rozdíl od akustických ošetření, která zvuk pohlcují) nutil hráče nezapomínat na dynamiku, ale naopak s ní pracovat.

3 Literární přehled

3.1 Akustika dřeva

Bucur (1995) podrobně pojednává v knize *Acoustics of Wood* o vlivech dřeva na akustické vlastnosti prostoru. Tyto vlivy jsou srovnány z hlediska anatomické stavby dřeva a jeho následného vlivu. V kapitole zabývající se absorpcí zvuku dřevem, jsou zdůrazňovány tyto vlastnosti: anatomická stavba dřeva, ošetření povrchu, typ montáže, geometrie, aj. Například překližky a dřevotřískové desky jsou dobrými absorbenty nižších frekvencí zvuku (500 Hz a méně), zato těžší dřeva absorbují frekvence vyšší. Absorpční koeficient je také spjat s úhlem, pod kterým se dřevo podél hlavní osy řeže. Nejvyšších hodnot koeficientů dosahuje dřevo řezané kolmo na osu. Hodnota klesá pozvolna, jak se úhel blíží nule. Byly zastoupeny úhly 90°, 67°, 45°, 23°, 0°. Je zajímavé pozorovat, že absorpční koeficient napříč vzorky svolně klesal od hodnoty 800 Hz, mezi hodnotami 2000 – 3300 Hz pak došlo k rapidnímu propadu a v intervalu 3300 – 4000 Hz opět k masivnímu nárůstu absorpčního koeficientu. Tento skok se konal v rozmezí až 80%. Frekvenci 3300 Hz bych tedy označil za kritickou a zkoumání akustických vlastností dřeva by se mělo odehrávat i okolo této frekvence. Průměrná hodnota absorpčního koeficientu byla okolo 40%. Hodnota koeficientu 100% se rovná útlumu otevřeného okna v místnosti. Dřevo řezané rovnoběžně s osou bez jakéhokoli odklonu, nereagovalo na frekvenční změny. V tom případě nemá cenu brát výšku tónu jako důležitou součást výpočtu absorpčních vlastností dřeva.

Co se týče kvality zvuku v místnostech, například koncertních sálích, dostává výpočtový model trhliny. Nejenže chování prostoru je často nevyzpytatelné, vnímání kvality zvuku je také značně subjektivní záležitost. Stojí zde proti sobě dvě skupiny vlivů: vznik a propagace zvukové vlny, fyziologické a psychologické faktory.

3.2 Akustika ve veřejných budovách

Pokud je uvažováno nad instalací panelu do veřejné budovy (např. kulturního zaměření), měly by se před konkrétní volbou zvážit tyto 4 faktory:

1. K jakému konkrétnímu účelu se bude prostor využívat. Zda půjde o divadlo, koncertní sál, sportovní halu, zasedací místnost, atd.

2. Jaký bude tvar tohoto prostoru a jaké bude zastoupení vybavení v místnosti (stoly, sedadla) a jaká bude jejich četnost. Kde budou umístěny zdroje zvuku, uspořádání podlahy a stropu. To bude hrát zásadní roli při odrazu vlny.

3. Materiály využití pro konstrukci a jejich uspořádání. Například akustické dřevěné panely, které se osazují do prostoru tak, aby za nimi vznikla určitá vzduchová mezera, se používají k zachytávání nízkých frekvencí. Dobrým pohlcovačem frekvencí vyšších je často samo obecnstvo. Tento efekt se odborně nazývá The effects of clothing fabrics. Akustická kvalita prostoru závisí silně na počáteční časové prodlevě, která by měla být nižší než 20 ms.

4. Subjektivní požadavky na zvuk vychází z psychoakustických parametrů: preferovaná počáteční časová prodleva, preferovaná hlasitost, rozsah korelace vnitřního ucha, aj.

Co se týče tvaru místností, nejčastější 4 tvary, se kterými se můžeme setkat, jsou tvar obdélníkový (Vídeňská opera), vějířovitý, dále segmentovaný nesymetrický tvar připomínající amfiteátr (Berlínská filharmonie) a také síně oválného tvaru. Slavným představitelem síní obdélníkového tvaru je právě vídeňská síň Musikvereinsaal. Její kvality bylo docíleno zvukově difusními povrchy na stěnách a stropu. Podle několika testů, jež byly prováděny i v dalších síních podobného tvaru, se ukázalo, že doba dozvuku se zkracuje s přibývajícím frekvencí zvuku a opět okolo hodnoty 3000 Hz dochází ke zřetelnějšímu poklesu. Nicméně podle těchto studií klesá s frekvencí jak absorpční koeficient, tak doba dozvuku. K maximálnímu tlumení dřevem dochází okolo 200 Hz. Což je vítanou vlastností vzhledem ke schopnosti publika zachytávat vysoké frekvence.

Z tohoto lze udělat závěr, že zkoušky akustických vlastností dřeva pro veřejná místa jsou smysluplnější při nižších frekvencích, o ty vyšší se už postará lidský faktor. Navíc výše zmíněné kritické frekvence 3000 Hz dosahuje jen malé procento hudebních nástrojů. Tato frekvence není kritická pro budovy s kulturním zaměřením, ale spíše pro průmyslové budovy.

Escobar a Morillas (2015) se přímo zabývají problémem akustiky v přednášecích sálech. Sami vyzdvihují akustiku místnosti (její dozvuk) na přední místo při projektování škol či jiných vzdělávacích zařízení. Poslechový komfort má přímý dopad na množství pochopené látky studenty. Zajímavou veličinou je STI (Speech Transmission Index), což je objektivní veličina udávající kvalitu přenosu mluveného slova a je dobrým ukazatelem srozumitelnosti. Vědci ale také pracovali se subjektivními

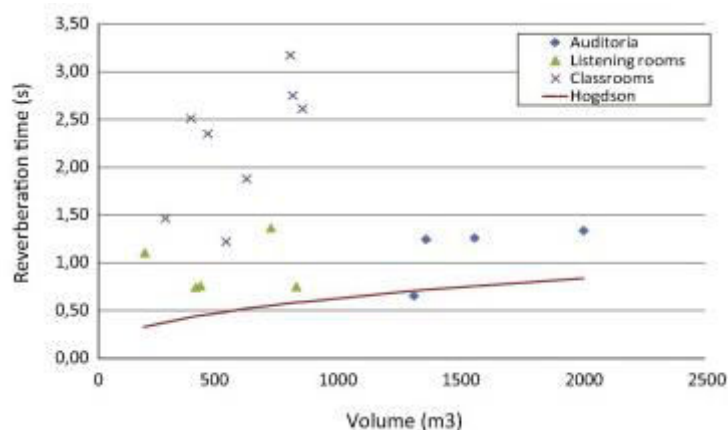
dojmy žáků z různých poslucháren. Ukázalo se, že frekvence zvuku jako taková má vliv na dobu dozvuku při nižších frekvencích (do 250 Hz), od této hodnoty směrem nahoru už vlivu ubývá a vliv se stává pro tuto práci zanedbatelným.

Tab. 1: Vliv frekvence na dobu dozvuku (Escobar a Morillas 2015).

Aula č.:	V(m ³)	RT(s) 1000Hz	RT(s) 2000 Hz	RT(s) 4000 Hz	RT(s) 1000Hz	RT(s) 2000 Hz	RT(s) 4000 Hz
AU1	2000	1.70	1.23	1.19	1.36	1.35	1.21
AU2	1550	1.17	1.15	1.22	1.37	1.42	1.24
AU3	1350	0.95	1.16	1.32	1.47	1.44	1.15
AU4	1300	0.77	0.65	0.59	0.65	0.69	0.60

Úbytek RT (reverberation time) je vždy nejvýraznější v rozmezí frekvencí 125 – 250 Hz.

Také objem místnosti má nepříznivý vliv na dobu dozvuku.



Obr. 1: Vliv objemu místnosti na dobu dozvuku (Escobar a Morillas 2015).

Tvar místnosti jen slabě ovlivňuje dobu útlumu, což je však podle Heerema (1997) nesnadné započítat při měření kvality tlumení hluku, jsou důležité jiné aspekty místnosti např. rozestavění vybavení v místnosti a jeho povrch (absorpční koeficient). Ve většině vzorců pracujících s výpočtem hluku v místnosti se pracuje s obecnou formou průmyslové místnosti, jako je betonová podlaha, cihlové stěny, sádkartonové příčky. Heeremův nový model počítá s různými variantami místnosti, zahrnuje taky hustotu a absorpční koeficienty vybavení.

Propagační zvuková vlna v místnosti (the workroom sound propagation curve) $SP(r)$ je proměnná r vzdálenosti od všesměrného zdroje zvuku $LP(r)$ a L_w je hodnota vysílaného zvuku.

$$SP(r) = LP(r) - L_w \quad (\text{Db})$$

Propagační zvuková vlna byla vysílána v oktávách ve frekvencích od 125 Hz do 4000 Hz. Zvuková vlna byla snímána na půlce vzdálenosti mezi propagačním zařízením a stěnou.

Absorpční koeficienty nebyly přisuzovány jednotlivým materiálům, jednotlivé průmyslové místnosti byly rozděleny do tří skupin:

1. těžká konstrukce – betonové podlahy, cihlové stěny
2. akusticky ošetřená konstrukce
3. panelová konstrukce - ta zahrnovala sádkokartonové příčky, rolovací dveře, zasklení, aj.

$\alpha_{\text{eff}} = C_{\alpha 0} + C_{\alpha 1}Q$ je absorpční koeficient vybavení místnosti,

kde Q je definováno jako

$$Q = S_f / 4V$$

S_f je uvažovaná celková plocha zastavěná vybavením v m^2 a V je objem místnosti v m^3 . Hodnota S_f je brána jako nejmenší možný čtverec či kruh, do kterého by se vešlo konkrétní těleso na ploše podlahy.

Tab. 2: Hodnoty absorpčních koeficientů v závislosti na druhu konstrukce (Heerema 1997).

Druh kce	Oktávová skupina					
	125 (Hz)	250 (Hz)	500 (Hz)	1000 (Hz)	2000 (Hz)	4000 (Hz)
Tvrdá	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04
Panelová	0,22	0,22	0,15	0,10	0,09	0,10
Ošetřená	0,08	0,09	0,04	0,04	0,04	0,09

Zde jsou hodnoty absorpčních koeficientů. Můžeme vidět, že se vzrůstající zastavěností podlahy vzrůstá průměrná absorpce místnosti vůči propagaci zvukové vlny. Zajímavé je, že vliv frekvence se nechová stejně v jednotlivých konstrukcích. V tvrdých konstrukcích jsou nejnáchylnější nízké frekvence, v panelových naopak frekvence

vysoké. Důvodem je velká vlnová délka zvukové vlny o nízké frekvenci, která se tříští v panelových konstrukcích.

3.3 Akustika stavebních objektů

Kaňka (2009) ve své knize *Akustika stavebních objektů* udává vztah pro ztrátu akustického tlaku se vzdáleností od zdroje.

$$L = L_w + 10 \log \frac{Q}{4\pi r^2}$$

kde $Q=1$ a L_w je hladina akustického výkonu.

Znamená to tedy, že akustický tlak klesá logaritmicky se vzdáleností od zdroje. To je velice důležité. Znamená to totiž, že pokud je vnímán hluk o hodnotě 30 dB a ten vzroste o pouhé 3 dB, bude tento hluk nyní vnímán jako dvojnásobný.

Vlivy jako vítr, teplota a vlhkost mají sice vliv na šíření zvuku, tato práce se však zabývá akustickými vlastnostmi vnitřních prostor. Co se týče útlumu zvuku ohybem, každé vlnění (i elektromagnetické) vykazuje schopnost ohýbat se kolem překážky v prostoru. Za překážku se považuje vše, co je větší než vlnová délka příslušného vlnění. Za překážkou vniká stín. V tomto případě akustický stín.

V uzavřeném prostoru dochází k odrazu akustické energie od stěn, podlahy a stropu zpět ke zdroji. To má za následek zvýšení akustického tlaku (v porovnání se stavem, který by vznikl v otevřeném prostoru). Takže se opět dostávám k nutnosti zvýšit absorpční koeficient povrchů. Při dopadu zvuku o akustickém výkonu P_0 [W] na překážku se část tohoto výkonu P_r [W] odrazí a část P_a [W] pohltí. Pohlcený výkon se pak rozdělí na část výkonu P_1 [W], která se ztratí (je odvedena konstrukcí mimo sledované místo nebo se promění v jiný druh energie), a na část P_t [W], která projde stěnou a je vyzářena do vedlejšího prostoru. Je možno definovat činitele odrazu $\rho = P_r/P_0$, činitele pohltivosti $\alpha = P_a / P_0$ a činitele prostupu (průzvučnosti) $\tau = P_t / P_0$.

Zvuková pohltivost A_i [m²] povrchu konstrukce je dána součinem plochy povrchu S [m²] a činitele pohltivosti α . Celková zvuková pohltivost místnosti A [m²] je součtem zvukové pohltivosti všech ploch, které místnost ohraničují, případně též zvukové pohltivosti předmětů a osob, které se v místnosti nacházejí. Je nutno poznamenat, že činitel pohltivosti α a tudíž i pohltivost A jsou veličiny závislé na kmitočtu zvuku. Proto by se zkoušky akustické pohltivosti měly provádět vždy v různých kmitočtových pásmech - obvykle oktávových. Pohltivost závisí také na odsazení od povrchu stěny či stropu, tj. tloušťce vzduchové mezery. Nejvyššího

tlumícího efektu totiž dosáhneme, když bude vzduchová mezera za akustickým panelem rovna čtvrtině vlnové délky šířeného zvuku. Tím dojde k takové interferenci vlnění, že vlny se budou navzájem vyrušovat.

V hudebních zkušebnách často bývá problém s nekonkrétností jednotlivých zvuků, tónů. Může za to dozvuková vzdálenost. Je to vzdálenost r_k [m], kde končí pole přímých vln. Pole přímých vln se nachází v bezprostředním okolí zdroje. Dalo by se zjednodušeně říct, že pozorovatel je v poli přímých vln schopen bez problému rozeznat směr, odkud zvuk přichází. Ve vzdálenějších místech uzavřeného prostoru (za dozvukovou vzdáleností) převládá akustické vlnění, které tam dospěje až po několikanásobném odrazu.

Hodnota hladiny akustického tlaku je závislá právě na pohltivosti povrchů stěn. Pole odražených vln předpokládá difusní charakter zvukového pole. Difusní zvukové pole je jen zjednodušený model představy, jakým způsobem se může zvuk v difusně pohybovat v uzavřeném prostoru.

Při hodnocení kvality zvuku v auditoriích jako jsou divadla, koncertní sály či přednáškové síně je nutný podrobnější popis zvukového pole. Následná tabulka ukazuje závislosti pohltivosti A (-) na kmitočtu.

Tab. 3: Hodnoty absorpčních koeficientů v závislosti na materiálu (Kaňka 2009).

Konstrukce	Kmitočet f (Hz)					
	125	250	500	1 000	2 000	4 000
Dřevotřísková deska	0,3	0,2	0,3	0,35	0,35	0,35
Dřevovláknitá měkká deska	0,10	0,15	0,55	0,52	0,50	0,45
Překližka	0,27	0,08	0,11	0,09	0,09	0,20

Akustický panel by také mohl pomáhat při odstraňování tzv. restauračního efektu (cocktail party effect). Ten vzniká v otevřených prostorách, kde hovoří současně více lidí. Zvuk se odráží a lidé si přestávají rozumět. Mluví tedy čím dál hlasitěji, čímž se celý problém pouze zhoršuje. Následně dojde k útlumu po rezignaci na hovor částí mluvících.

Řešit se to dá obkladem stropu. Kritická je pro nás hodnota ΔL , což je rozdíl akustického tlaku přijímaného signálu L_1 a hladiny zvukového pozadí L_2 . V tabulce 4 se můžeme podívat na hodnotu indexu srozumitelnosti.

Tab. 4: Závislost indexu srozumitelnosti na rozdílu akustickém tlaku přijímaného a akustického tlaku pozadí (Heerema 1997).

ΔL (dB)	Index srozumitelnosti (-)	Srozumitelnost je
Menší než - 12	0,0	nulová
- 12 až -1,5	0,00 až 0,35	nevyhovující
-1,5 až + 1,5	0,35 až 0,45	unavující
+1,5 až +6,0	0,45 až 0,60	dobrá
+6,0 až +18,0	0,60 až 1,00	velmi dobrá
Větší než 18,0	1,00	dokonalá

Situace začíná být snesitelná od okamžiku, kdy hladina přijímaného akustického tlaku (tedy jednoduše řečeno mluvené slovo) začíná být hlasitější než akustické pozadí. S posunem hodnoty ΔL do kladných poloh by nám mohl pomoci jeden z navržených panelů, panel typu A, který svou konstrukcí a vhodným uspořádáním brání přenosu hluku napříč místností.

3. 4 Nejčastější akustické materiály

3.4.1 Pórovité materiály na bázi akustických pěn

Populárním řešením v oblasti dozvuku bývají pórovité materiály, speciálně ty na způsob akustických pěn. Avšak jak uvádí Kaňka (2009), tyto pórovité materiály fungují hlavně za předpokladu, je-li pórovitý materiál umístěn alespoň ve vzdálenosti jedné čtvrtiny vlnové délky zvuku od tvrdého povrchu stropu nebo stěny. Pohlcují proto převážně ve vysokých kmitočtech, kde je vlnová délka malá.

Následuje tabulka, kterou ve své práci Effect of fundamental frequency uvádí Watson (2013), tam je vidět, že mluvené slovo se pohybuje u mužů v rozpětí 120 – 175 Hz a u žen v rozpětí 178 – 285 Hz, což není zdaleka možno označit za vysoký kmitočet.

Tím chci říct, že akustická pěna, která je dnes jedním z nejkomerčněji upřednostňovaných akustických materiálů, má ve svých vlastnostech mezery a existují situace, kdy je třeba ji vhodně nahradit materiálem jiným, například dřevem.

Tab. 5: Průměrný frekvenční rozsah ženských a mužských hlasů (Watson 2013).

Poloha hlasu	Průměrný frekvenční rozsah (Hz)
<i>Ženy</i>	
Vysoká	260 - 285
Střední	189 - 211
Nízká	178 - 202
<i>Muži</i>	
Vysoká	122 - 175
Střední	117 - 128
Nízká	102 - 120

3.4.2 Basová past

Jedno z řešení akustiky místností se nazývá basová past, anglicky *basstrap*. Ta se umísťuje v drtivé většině do rohů místnosti, kde dochází ke kumulaci basových vln. Jedním z nejproblematičtějších prvků v hudebních zkušebnách bývá basový buben, jehož frekvence je značně nízká - okolo 42 Hz. Když půjde o to dosáhnout absorpčního koeficientu alespoň 0,6, musela by tloušťka tlumícího materiálu být následující:

Tab. 6: Tloušťka materiálu nutná k dosažení absorpčního koeficientu 0,6 (zvukarina.cz 2001).

Frekvence (Hz)	Tloušťka tlumícího materiálu (cm)
200	17
100	34
50	68
42	82

Takové rozměry jsou nepraktické, navíc by měl být tlumící materiál vždy umístěn jednu čtvrtinu vlnové délky od stěny, tak dochází nejefektivněji k útlumu zvukové vlny. Což jsou například při problematické frekvenci 42 Hz cca 2m. Takové provedení izolace by navíc pohltilo střední i vyšší frekvence, místnost by se začala vlastnostmi blížit bezdozvukové místnosti. A to není třeba. Jak už jsem zmínil, nejde o to zvuk tlumit, je třeba ponechat možnost pracovat s dynamikou, ale přeci jen, frekvence 42 Hz basového bubnu a další basové tóny je vhodné svým způsobem pohltit. Vhodnější řešením než 82 cm izolace 2 m od stěny bude již zmíněná basová past. V rozích místnosti se totiž basy kumulují a jak ukazují výpočty, zvuk je tam o 6 – 12 dB silnější. Máme dva typy basových pastí:

- a) rezonanční pohlcovač
- b) porézní pohlcovač

Rozdíl není markantní, přitom však zásadní. Rezonanční pohlcovač pohlcuje jen úzký rozsah frekvencí, takový, na který je nadimenzován. Porézní basová past sice pohltí s určitou efektivností dlouhé vlny basových frekvencí, avšak stejně tak pohltí i frekvence střední a vyšší. Je však méně náročný na instalaci a díky tomu že funguje ve větším frekvenčním pásmu, působí efektivněji. To může být důvod, proč se obchodníkům s porézními pohlcovači daří na trhu lépe. Rád bych zmínil něco více o rezonančním pohlcovači, velmi zajímavém zařízení, jehož nejznámějším zástupcem je tzv. *Helmholtzův rezonátor*.

3.4.3 Helmholtzův rezonátor

To, že například při zafoukání na hrdlo lahve se ozve specifický zvuk, se nazývá Helmholtzova rezonance. Tlak vzduchu, který je vyvolán, a který působí na vzduch již

obsažený v lahvi, je možno přirovnat k závaží naléhajícímu na pružinu. Jakmile začne foukáním tlak vzduchu vzrůstat, vzduch, fungující jako pružina, se stlačí (dochází k přeměně energie na teplo). Při kompresi však dochází k postupnému vytrácení energie. V okamžiku, kdy se tato energie vytratí, začne se tlak v lahvi srovnávat s tlakem vzduchu v místnosti. Tento proces však díky dějové setrvačnosti způsobí, že tlak vzduchu v lahvi poklesne o něco víc, než je tlak vzduchu v místnosti, tím se tlak v lahvi začne opět vyrovnávat s okolím a začne se tím pádem znovu stlačovat. A tak to pokračuje dál a dál, dokud se tlak vzduchu v lahvi neustálí s tlakem vzduchu okolí, potom děj ustává. Jak popisuje Richou (2015) ve svém článku *Generation of acoustic solitary waves in a lattice of Helmholtzresonators*, toto stlačování a rozpínání vzduchu se děje v pravidelných periodách, tedy děj má stálou frekvenci.

Tato frekvence je učená vztahem:

$$f_H = \frac{v}{2\pi} \sqrt{\frac{A}{V_0 L_{eq}}}$$

v... rychlost vzduchu vnikajícího do lahve

A... plocha průřezu hrdla lahve

L_{eq} ... délka hrdla lahve

V_0 ... objem lahve (nezahrnuje část označovanou jako délka hrdla lahve)

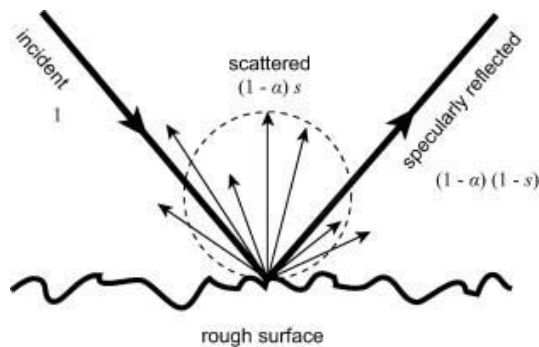
Tuto frekvenci, specifickou pro každý tvar nádoby, nazýváme Helmholtzova resonance.

Helmholtzův rezonátor má tu přednost, že je schopen velice účinně pohlcovat nízké frekvence. Konstrukce na jeho bázi, by mohla sloužit velice dobře jako doplněk akustického ošetření hudebních místností.

3.5 Schopnost materiálu rozptýlit zvukovou vlnu v závislosti na tvaru povrchu

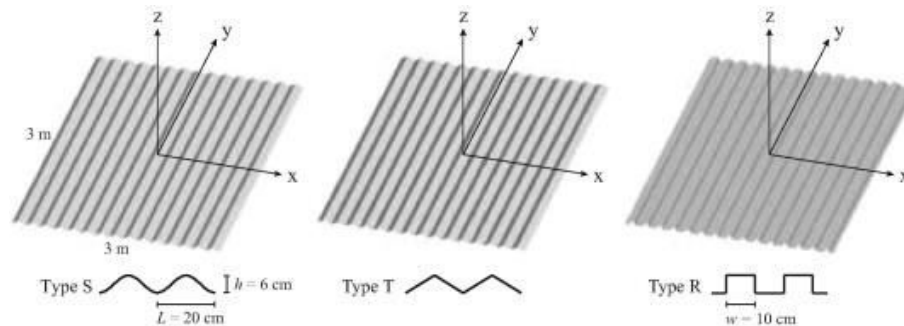
Lee a Sakuma (2015) se zabývali schopností povrchů rozptylovat zvukové vlny. V jeho práci *Numerical characterization of acoustic scattering coefficients of one-dimensional periodic surfaces* se věnuje posouzení koeficientů rozptylu v závislosti na tvaru prvku, jednotlivých vzdálenostech prvků od sebe, vztahu rozměrů prvku vůči sobě, tj. vliv poměru výšky k základně. Jako základní tvary byly zvoleny: sinusoidový profil, trojúhelníkový profil a obdélníkový profil. Koeficient rozptylu je definován jako

poměr mezi nesouměrně odraženou akustickou energií a celkově odraženou energií, jak ukazuje následující obrázek.



Obr. 2: Princip odrazu akustického signálu od běžného povrchu. Princip zrcadlově a náhodně odražených vln (Lee a Sakuma 2015).

Díky tomu je možno lépe pracovat s tvarem místnosti. Tato metoda byla již dříve popsána v ISO 17497-1, ale Lee a jeho tým metodu upravili, aby byla vhodnější k potlačení kmitání zvuku (jakožto nežádoucího jevu) mezi paralelními stěnami. Byly dány tři typy jedním směrem se periodicky opakujících povrchů s tvarem sinusoidy (typ S), trojúhelníku (typ T) a obdélník (typ R), jak ukazuje obrázek.



Obr. 3: Tři základní tvary povrchu v práci Leeho a Sakumy (Lee a Sakuma 2015).

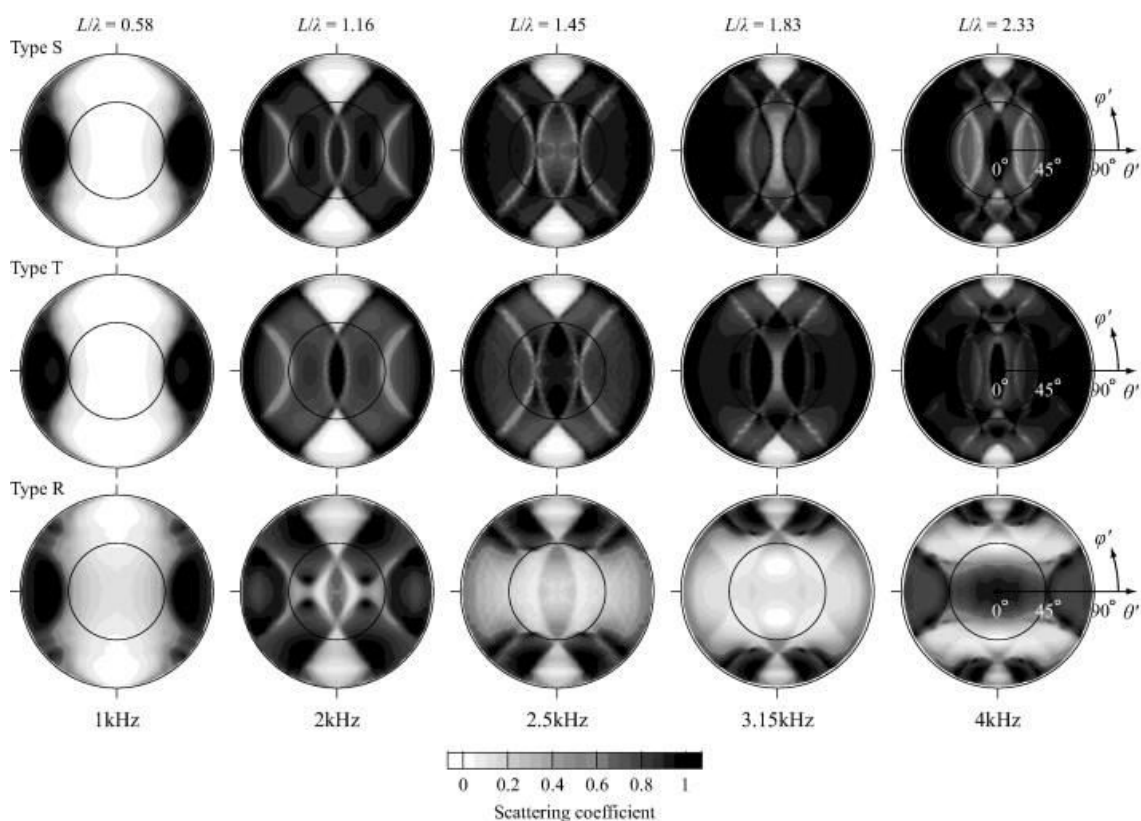
Vzorky jsou sestaveny z perfektně odrážejícího materiálu se zanedbatelnou tloušťkou, mají patnáct period a jsou čtvercového tvaru o hraně 3m. Provedeny byly tři typy zkoušek:

1. Nejprve byl zkoušen vliv jednotlivých tvarů při konstantním poměru hrany, výšky a osové vzdálenosti prvků ($L = 20 \text{ cm}$)
2. Byl testován vztah výšky prvku k osové vzdálenosti prvku, kdy se výška měnila při hodnotách 2, 4, 6, 8 a 10 cm (poměr $h/L = 10\%, 20\%, 30\%, 40\%, 50\%$)

3. Nakonec se v případě typu R, tedy obdélníku, měnil poměr jedné strany ke druhé. Začalo se na délce, která se může označit 0 (tedy extrémně úzká), potom 5, 10 a 15 cm ($w/L = 0\%, 25\%, 50\%, 75\%$) až do 20 cm.

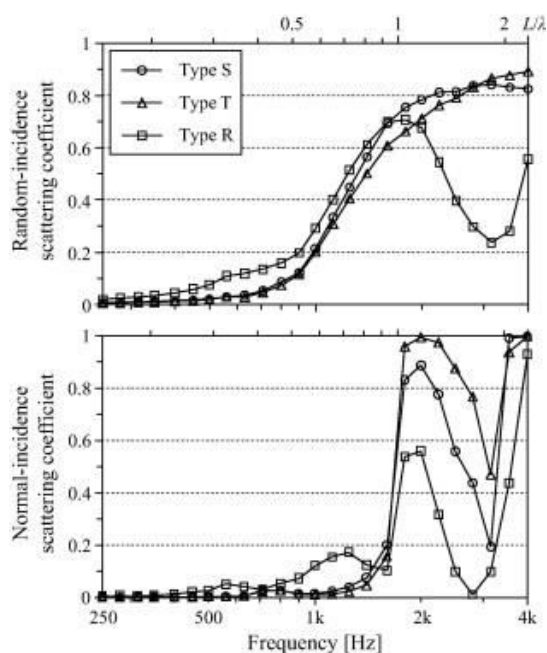
3.5.1 Vliv tvaru prvku

Rozdíly mezi vzorky jsou na 1 kHz a také jak bylo očekáváno, jsou menší na nižších frekvencích. Zatímco ve vyšších frekvencích si držely typy S a T víceméně podobný rozptyl, začal se typ R v této frekvenční škále odlišovat. Obecně řečeno: typ R je silně závislý na úhlu dopadu a to vzhledem k fázovému posunu jednotlivých vlnových délek a jejich vzájemnému rušení. Tato závislost roste s frekvencí, jak ukazuje následující obrázek:



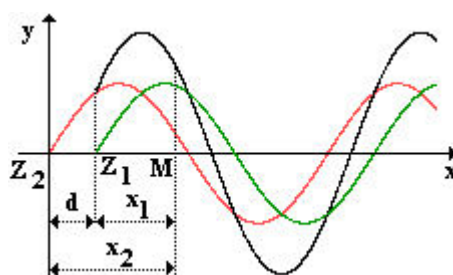
Obr. 4: Závislost rozptylového koeficientu na tvaru prvku a frekvenci (Lee a Sakuma 2015).

Další graf ukazuje, jak se mění rozptylový koeficient vzorků v závislosti na frekvenci. Graf je navíc uveden zvlášť pro vlny dopadající kolmo na vzorek a pro vlny dopadající náhodně.



Obr. 5: Závislost rozptylových koeficientů kolmo i volně dopadajících zvukových vln na frekvenci. Uvedeno pro tři studované tvary (Lee a Sakuma 2015).

Všechny tři typy rozptylových koeficientů víceméně rovnoměrně rostou s frekvencí (materiál je tedy účinnější s rostoucí frekvencí), avšak značný propad účinnosti nastává kolem frekvence 3.15 kHz, kde je výška prvku o něco málo větší než polovina vlnové délky dopadajícího zvuku. Důvodem je fázové skládání vln odražených z každého žlabu, vznikajícího mezi periodicky se opakujícími prvky.



Obr. 6: Skládání vlnění (Reichl 2007).

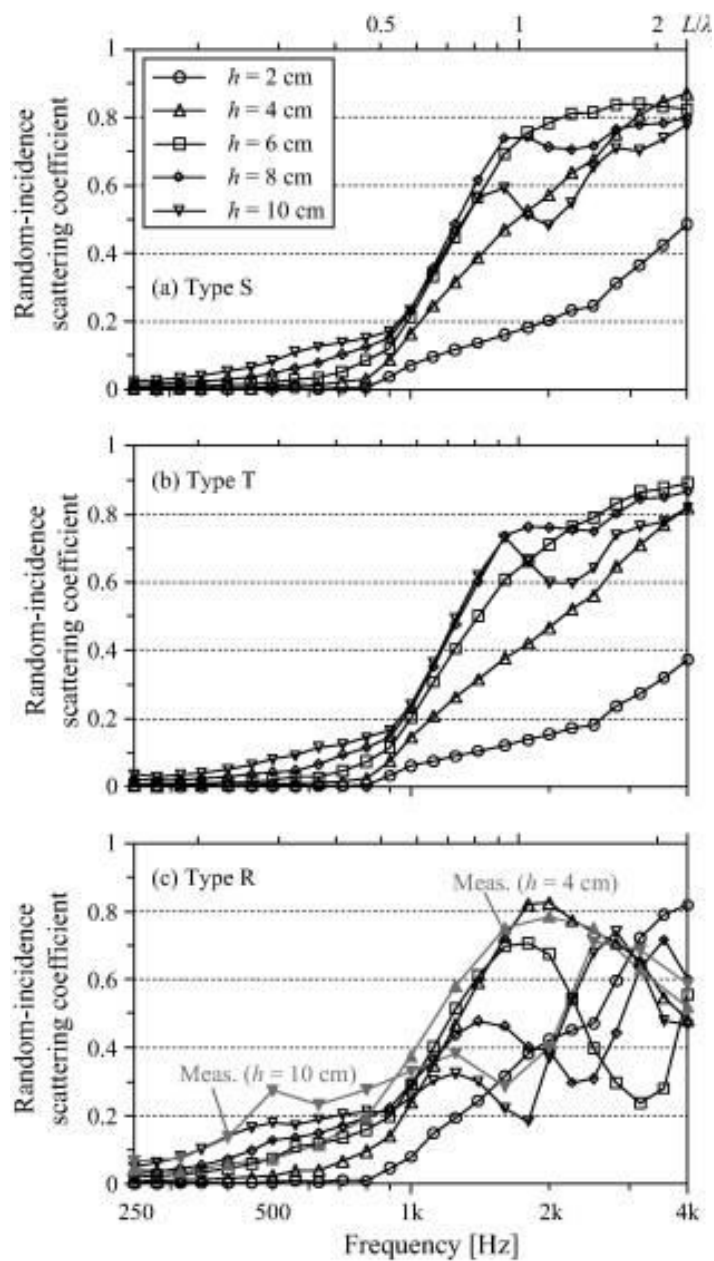
d ... šířka žlabu, díky které dojde k fázovému posunu

Naopak neúčinnější je vzorek, když začne výška prvků odpovídat polovině

vlnové délky. V tomto případě ($h = 8$ cm) frekvenci 2,83 kHz. K dalšímu nárůstu účinnosti dochází okolo frekvence 4 kHz, kdy začne výška prvku odpovídat třem čtvrtinám vlnové délky.

3.5.2 Vliv výšky prvku

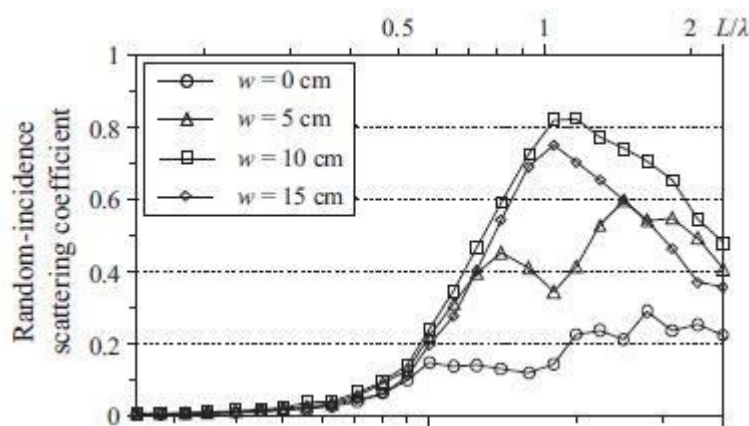
Další graf ilustruje, jak se rozptylové koeficienty chovaly s měnící se výškou prvku. Pokus byl prováděn pro typy S, T a R ve frekvenčním pásmu 1 kHz, 2 kHz a 4 kHz. Výška se měnila po 2 cm v rozmezí 2 – 10 cm ($h/l = 10 - 50$ %):



Obr. 7: Závislost hodnoty rozptylového koeficientu na měnící se výšce prvku. Uvedeno zvlášť pro tři studované tvary (Lee a Sakuma 2015).

U typu S a T dosahovaly nejlepších výsledků vzorky s výškou 6, 8 a 10 cm. Ale můžeme říct, že se konstantně zlepšovaly všechny výšky s rostoucí frekvencí. Typ R se chová opět specificky. Vykazuje vždy pozoruhodný propad na specifické frekvenci shodné s polovinou vlnové délky, tudíž se s rostoucí výškou jednotlivé propady i vrcholy přesouvají do čím dál nižších frekvencí.

3.5.3 Vliv poměru mezi stranami obdélníku



Obr. 8: Závislost rozptylového koeficientu na měnícím se poměru mezi stranami kvádru (Lee a Sakuma 2015).

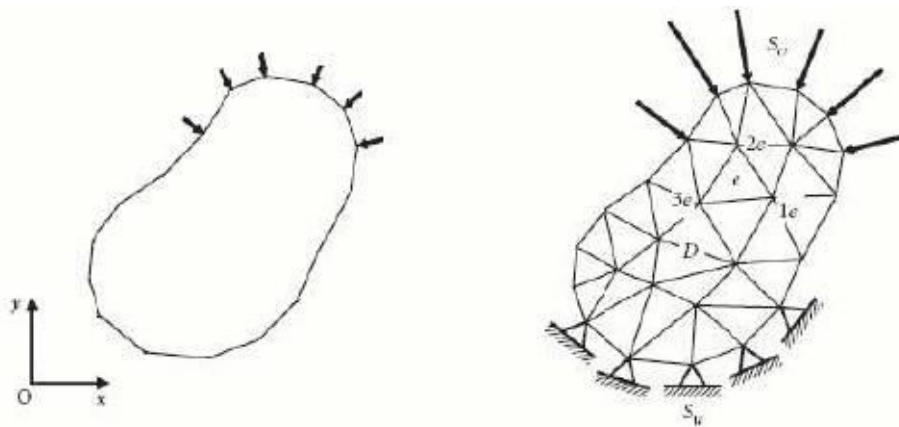
Na tomto grafu jsou vidět rozptylové koeficienty pro typ R s výškou 4 cm s měnící se šířkou jedné stěny obdélníku z 0 na 15 cm ku druhé, která byla konstantní (20 cm). Nejlépe je na tom poměr stěny 20:10, kdy byla rozptylová účinnost nejvyšší. Úzké prvky začaly reagovat až s rostoucí frekvencí, jinak byla jejich účinnost téměř nulová.

4 Metodika

4.1 Numerický model

4.1.1 Metoda konečných prvků

Metoda konečných prvků - MKP (z angl. Finite element method - FEM) představuje moderní, vysoce efektivní numerickou metodu pro řešení technických a vědeckých úkolů. V současnosti je považována za jednu z nejúčinnějších přibližných metod pro řešení problémů popsaných diferenciálními rovnicemi. První zmínky o metodě konečných prvků jsou z roku 1943 z práce R. Courante. Další rozvoj MKP byl omezený vývojem efektivního softwaru a hardwaru. Zhruba o deset let později byla tato metoda využita inženýry na pevnostní výpočty v leteckém průmyslu. V letech 1960 - 1980 vznikají velké programové balíky jako ANSYS, ADYNA a ABAQUS, pro lineární i nelineární analýzu konstrukcí a materiálů. Metoda vznikla pro potřeby výpočtu konstrukcí v leteckém, kosmickém, jaderném a vojenském průmyslu, odkud se rozšířila do akademického prostředí a později do průmyslové praxe. Podstatou metody konečných prvků je rozdělení (diskretizace) konstrukce, resp. řešené oblasti na konečný počet podoblastí - prvků. Pro každý typ prvku je kromě dimenze a tvaru charakteristický i počet a poloha jeho uzlů. Uzly jsou body, v nichž hledáme neznámé parametry řešení, například posuvy a natočení. Výsledky jsou ovlivněné hustotou, která ovlivňuje kapacitu potřebnou pro řešení.



Obr. 9: Rozdělení oblasti na konečné prvky (Králík 2009).

Výhodou MKP je možnost řešit složitější tělesa ve srovnání s analytickým přístupem. Nevýhodou je, že při změně vstupního parametru, jakým je například

zatížení, je nutné úlohu vyřešit znovu. Tuto nevýhodu je možné částečně vyvážit možnostmi automatizace výpočtového procesu. S tím je spojena i časová a hardwarová náročnost.

Proces výpočtu v MKP je možné rozdělit do pěti kroků:

1. Diskretizace konstrukce na konečný počet prvků
2. Sbližování deformačních nebo silových veličin na každém prvku zvlášť
3. Integrace konečných prvků v celek při zachování spojitosti deformací
4. Minimalizace energie - řešení podmínkových rovnic a určení neznámých uzlových parametrů
5. determinace neznámých po prvcích - výpočet vnitřních sil na jednotlivých prvcích.

4.1.2 Základní akustické rovnice

Při akustických analýzách je řešena jedna z následujících matic. Pro čistě akustické jevy řeší program konečně prvkovou dynamickou matici:

$$[M_F]\{\ddot{p}_e\} + [C_F]\{\dot{p}_e\} + [K_F]\{p_e\} = \{f_F\}$$

kde

$[M_F]$ matice hmotnosti

$[C_F]$ matice tlumení

$[K_F]$ matice tuhosti

$[f_F]$ externí budící vektor

4.1.3 Tvorba numerického modelu

Krok 1: Geometrie

Nejprve je potřeba sestavit geometrii. Ta se odvíjí od příslušného panelu.

Preprocessor → Modeling → Create → Volumes → Block → By dimensions

Nyní můžeme definovat hodnoty X, Y, Z.

Krok 2: Sjednocení geometrie

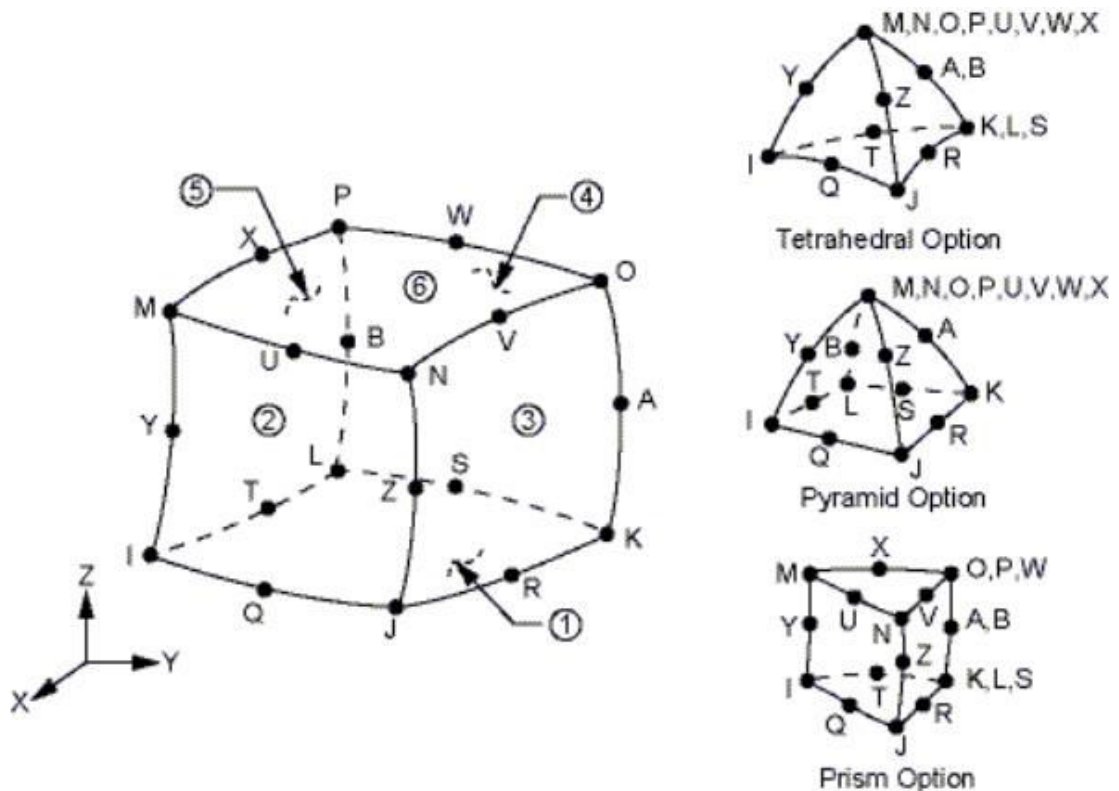
Nyní jednotlivé prvky spojíme dohromady tzv. slepením – gluing

Preprocessor → Modeling → Operate → Booleans → Glue → Volumes

Krok 3: Definice elementů

Preprocessor → Element type → Add/Edit/Delete

Pro analýzu byl vybrán SOLID186, což je 3-D element pro modelování pevných struktur, v tomto případě vyšetřované konstrukce. Prvek je definován dvaceti uzly v prostoru a v každém tomto uzlu mohou být vázány tři stupně volnosti UX, UY, UZ. Má ortotropní charakter a je možno definovat především hustotu, modul pružnosti a Poissonova čísla. Prvek je navržený pro namáhání elastické, plastické, smršťování, dotvarování, na velký průhyb a velké deformace. Zatížení je možno definovat na všech šesti plochách.



Obr. 10: Struktura materiálového elementu Solid186 (Kohnke 1999).

Krok 4: Definice materiálových vlastností

Preprocessor → Material properties → Material models

Zde se zadávají fyzikální vlastnosti materiálu. Panel se sestává ze dvou dominantních materiálů - ze smrkového řeziva a z dřevotřískové desky. DTD byla v modelu považována za izotropní, smrkové řezivo za ortotropní.

Tab. 7: Hodnoty jednotlivých materiálových vlastností (Horáček 2001).

Materiál. vlastnost	Směr	Smrkové řezivo	Dřevotřísková deska
Modul pružnosti	R	690 MPa	2050 MPa
	L	15 900 MPa	
	T	390 MPa	
Poissonovo číslo	RT	0.47	0.3
	LT	0.013	
	RL	0.028	
Modul pružnosti ve smyku	RT	36 MPa	-
	LT	770 MPa	
	RL	750 MPa	

Krok 5: Meshování

V tomto kroku dojde k rozdělení modelu panelu na malé díly, z nichž každý bude podroben výpočtu. Zvolena byla velikost jedné částice 1 cm.

Preprocessor → Meshing → Meshtool

Meshujeme zvlášť materiál 1 a zvlášť materiál 2. Poté dostáváme síť.

Krok 6: Vetknutí modelu

Model je třeba vetknout, tedy označit v programu místa, kde toto vetknutí předpokládáme. Pro nás to jsou protilehlé okraje panelu, které budou vešroubovány do instalačních lišt.

Preprocessor → Loads → Define loads → Apply → Structural → Displacement → On lines

Krok 7: Řešení

Solution → Analysis type → New analysis → Modalanalysis

Proběhne modální analýza.

Solution → Solve → Current LS

Proběhne výpočet.

Krok 8: Výsledky

General post processor → Results summary

General post processor → Read results → First set (next step)

Utility menu → Plot ctrls → Animate → Mode shape

Harmonická analýza se liší od kroku 7, kdy zadáme namísto Modal analysis harmonical analysis. Je také nutno navolit frekvenční škálu, v které bude harmonická analýza probíhat. Bylo zvoleno frekvenční pásmo 20 – 5020 Hz s krokem 2 Hz, tedy 2500 výpočtů. Poté je třeba vybrat bod, z něhož se bude brát amplituda panelu, tedy míra zakřivení, k níž pomocí vlastních kmitů došlo. Jako jeden byl vybrán středový bod na středovém prvku panelu a jako druhý byl vybrán bod u vetknutého okraje panelu ležící také na středové ose panelu. Tento bod se však již nacházel na dřevotřískové desce.

4.1.4 Tvorba funkčního vzorku

Ze smrkového prkna tloušťky 50 mm (+4mm na opracování) byly zhotoveny na formátovací pile hranolky o šířce 50 mm (+4mm na opracování). Délka závisela na délce prkna, avšak 500 mm je pro praktičnost dalšího postupu minimální vhodná délka. Těchto hranolků bylo třeba zhotovit dostatečný počet kusů.

Dále je třeba je srovnat. Nejprve je srovnána jedna strana na srovnávače (to platí pro každý hranolek). Srovnaná hrana je potom přiložena k pravítku, které je srovnané do úhlu 90° vzhledem k rovině stolu a celý hranolek je opět srovnáván podle již srovnané strany tažené po pravítku. Jakmile je toto provedeno u všech hranolků, může se přejít k protahovače. Změří se, na jaké šířce se ustanovila šířka hranolku po řezání na formátovací pile a na tuto hodnotu je nastavena průsvitnost protahovačky. Hodnota se obecně snižuje cca po 3 mm, až je dosaženo požadované hodnoty 50 mm.

Zkracování jednotlivých prvků je provedeno buď na zkracovací pile, nebo se může použít i formátovací pila. Je třeba mít však kotouč s větším počtem menších zubů, aby vlákna nebyla příliš vytrhávána. Takto se zhotoví požadované prvky s příslušnou délkou a hrany se zbrousí.

Následně je vyřezána dřevotřísková deska (opět na formátovací pile) o rozměrech 500 x 500 mm. Speciální kotouč není potřeba, avšak je třeba dát pozor na pravoúhlost řezu.

Nyní je třeba si (speciálně u varianty A a B) načrtnout šachovnici pro přesné rozmístění nařezaných hranolků. Z druhé strany je třeba naznačit místo pro budoucí umístění šroubu. To poté velmi usnadní práci.

Montáž jednotlivých prvků je výhodné dělat již ve dvou. Jeden drží, druhý šroubuje. Takto postupně instalujeme jednotlivé prvky. Poté je panel hotov.

5 Výsledky a diskuse

5.1 Numerický model

5.1.1 Modální analýza

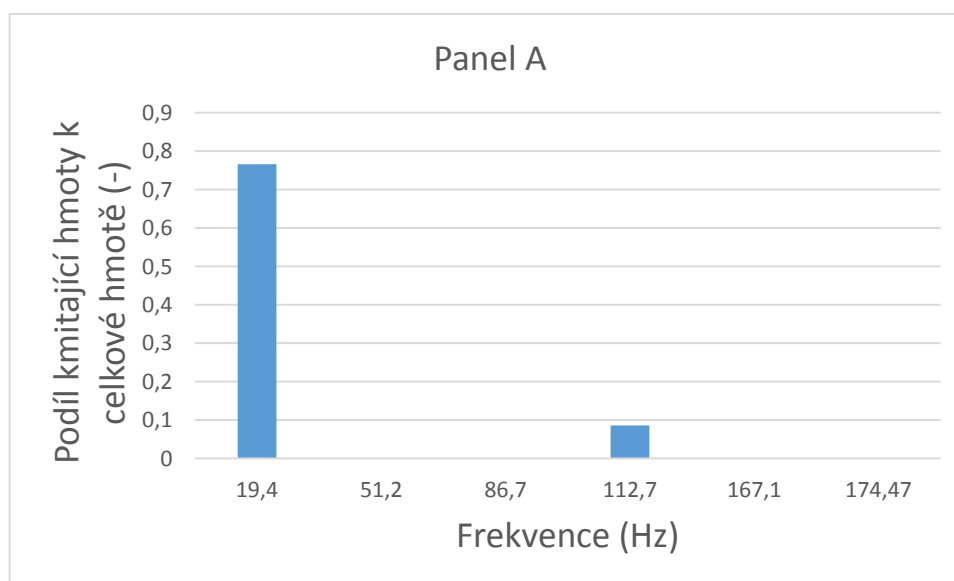
Modální analýza dává přehled o vlastních frekvencích panelu a vykresluje tvary vlastních kmitů. Tak je možno rozeznat, při kterých frekvencích dochází k rezonanci panelu a které frekvence jsou tudíž nevhodné.

5.1.1.1 Panel A

Tab. 8: Výstupní data z modální analýzy panelu A.

PANEL A						
frekvence	19,4	51,2	86,7	112,7	167,1	174,47
podíl kmitající hmoty	0,766	-	-	$8,62 \cdot 10^{-02}$	-	-
frekvence	253,51	312,89	326,17	332,88	339,6	391,77
podíl kmitající hmoty	-	-	-	$2,46 \cdot 10^{-2}$	-	-

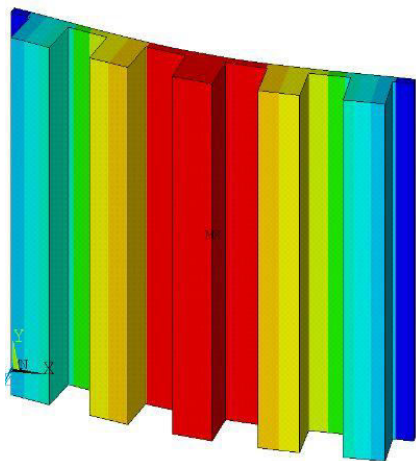
Tabulka obsahuje data z modální analýzy panelu A. Po přenesení dat do grafu získáme následující:



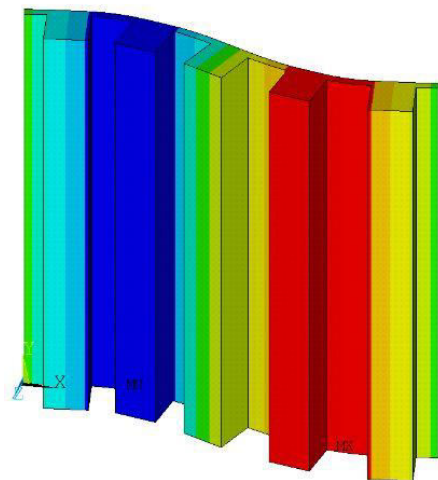
Obr. 11: Výstupní data z modální analýzy panelu A.

Pro panel A je kritická frekvence okolo 20 Hz. K vlastním kmitům, i když řádově méně, dochází okolo frekvence 113 Hz.

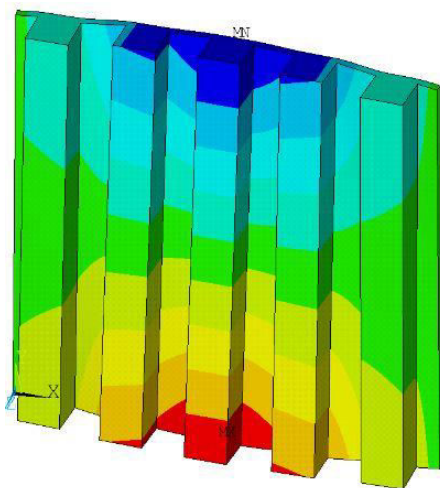
Následují animace, zobrazující vlastní kmity desky při různých frekvencích a posuny jednotlivých bodů.



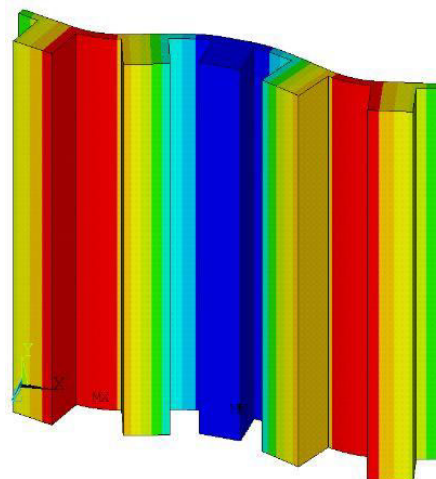
Obr. 12



Obr. 13



Obr. 14



Obr. 15

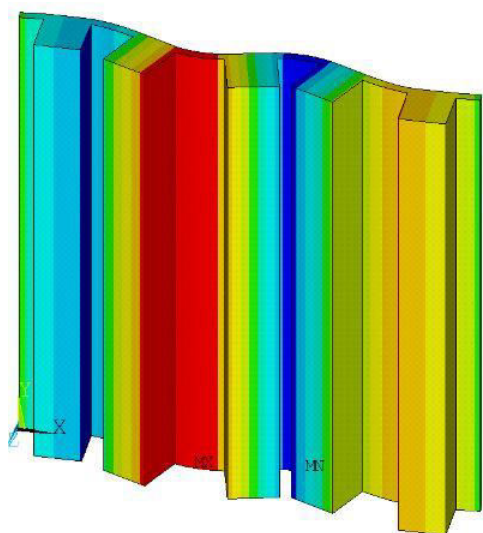
Obr. 12: Modální analýza panelu A. Posuny bodů panelu při frekvenci 19,5 Hz. K největšímu posunu dochází ve středu panelu. Deformace je značně středově

souměrná. Tak souměrná deformace (podle osy X a Y) se už v dalších krocích nevyskytuje. Vetknuté okraje mají až o dva řády nižší posuny.

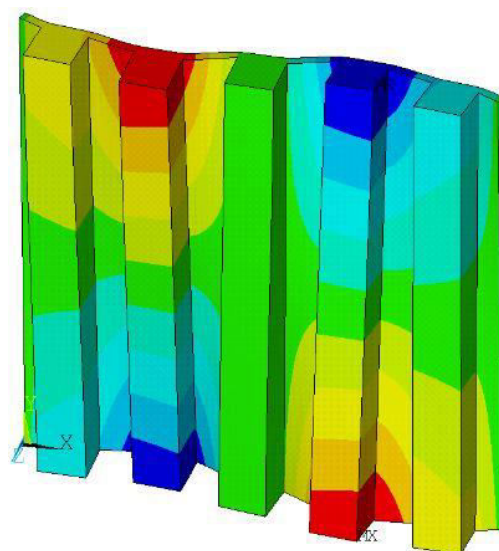
Obr. 13: Modální analýza panelu A. Posuny bodů panelu při frekvenci 51,2 Hz. Původní ve středu se vyskytující amplituda nyní přechází jako vlna k okraji. Největší posuny vykazují hranolky 2 a 4. Dochází též k namáhání vetknutých částí, které mají tendenci se vytrhnout.

Obr. 14: Modální analýza panelu A. Posuny bodů panelu při frekvenci 86,7 Hz. Deformace se posouvá i do osy Y. Panel má tendenci se zabalit do sebe. Vetknuté okraje jsou zatlačovány do konstrukce.

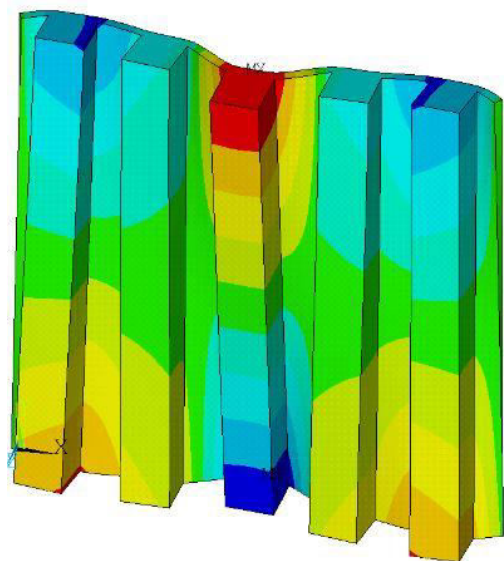
Obr. 15: Modální analýza panelu A. Posuny bodů panelu při frekvenci 112 Hz. Deformace se opět převážně posouvá do osy X a Z, kdy střed je tlačěn směrem k záporným posunům a okraje se snaží ho jakoby zabalit. Tomu ovšem brání vetknuté okraje, takže nejvyšších kladných posunů je dosaženo v mezerách mezi prvkem 1 a 2 a mezi prvkem 4 a 5. Poměr kmitající hmoty vzhledem k celkové hmotě je v tomto případě druhý nejvyšší.



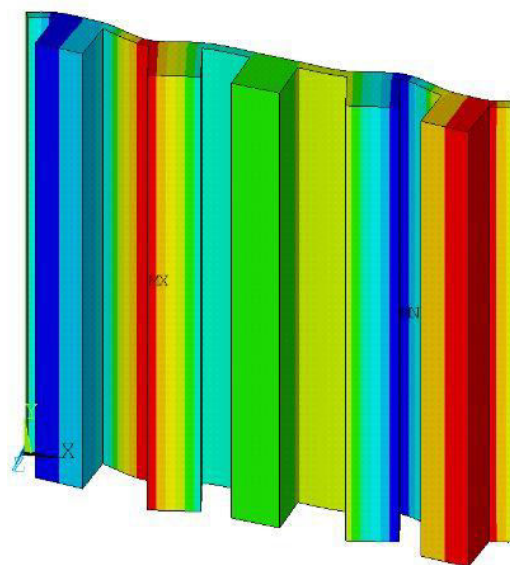
Obr. 16



Obr. 17



Obr. 18



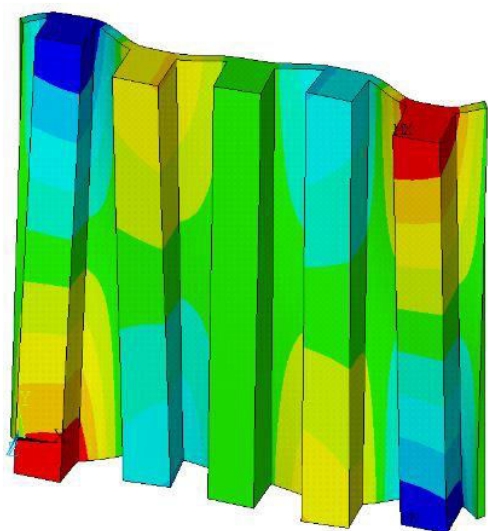
Obr. 19

Obr. 16: Modální analýza panelu A. Posuny bodů panelu při frekvenci 167 Hz. Deformační vlna putuje od krajů směrem ke středu panelu. Animace této deformace opravdu obsahuje několik viditelných vln, kdy i jednotlivé hranolky jsou ohýbány.

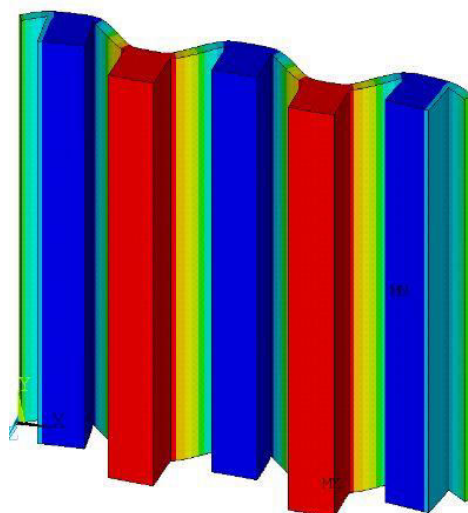
Obr.17: Modální analýza panelu A. Posuny bodů panelu při frekvenci 174,5 Hz. Panel se opět začíná deformovat i ve směru osy Y. Rohy panelu mají tendenci se přitahovat. Úhlopříčně ležící v kladném směru, další dvojice ve směru záporném. Panel se při této frekvenci přes úhlopříčnou osu kroutí. Panel je namáhán na krut.

Obr. 18: Modální analýza panelu A. Posuny bodů panelu při frekvenci 253 Hz. V porovnání s předchozím panelem opouští tento panel kroutivý pohyb a navrácí se opět k deformaci pouze ve směru osy X. K tomu ale úplně dojde až u následujícího panelu. Zde je ještě patrná i deformace ve směru osy Y.

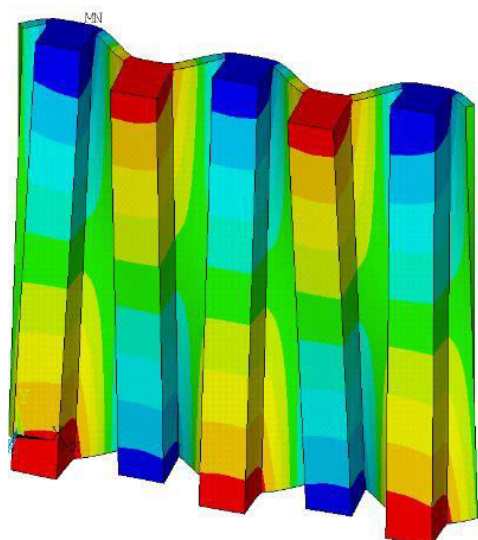
Obr. 19: Modální analýza panelu A. Posuny bodů panelu při frekvenci 312 Hz. Deformace zpět ve směru osy X a osy Z. V tomto směru vzniká několik kmiten a uzlů. Nejvyšších amplitud dosahují body u vetknutých okrajů, které jsou namáhány v tomto případě více než střed panelu.



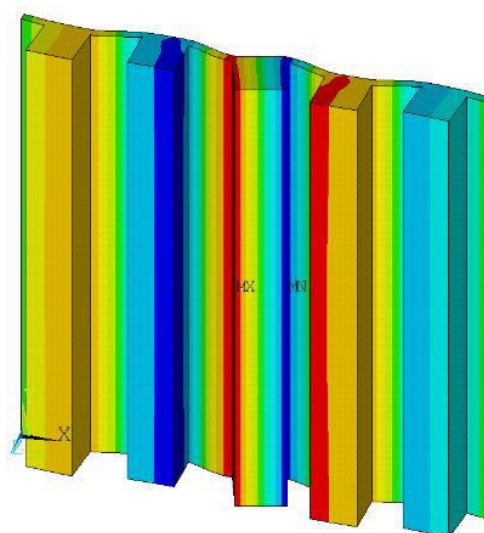
Obr. 20



Obr. 21



Obr. 22



Obr. 23

Obr. 20: Modální analýza panelu A. Posuny bodů panelu při frekvenci 326 Hz. Panel se opět začíná deformovat i ve směru osy Y a svým tvarem značně připomíná panel na obrázku 17. Rohy panelu mají tendenci se přitahovat, avšak kladných posunů nyní dosahují rohy, které na obrázku 17 dosahovaly hodnot záporných. Panel se při této frekvenci přes úhlopříčnou osu kroučí. Panel je namáhán na krut.

Obr. 21: Modální analýza panelu A. Posuny bodů panelu při frekvenci 332 Hz. Deformace je velmi souměrná. Pravidelné vzdálenosti mezi uzly a kmitnami. Panel v porovnání s ostatními při této frekvenci vykazuje nejpravidelněji rozmístěné zvlnění. Amplituda vždy vychází do hranolku a střídá se do záporných a kladných posunů v ose Z.

Obr. 22: Modální analýza panelu A. Posuny bodů panelu při frekvenci 339 Hz. Mezi tvarem této deformace a tvarem deformace u obrázku 21 je patrná souvislost. Každý hranolek vykazuje jasnou charakteristiku – zatímco jeden konec je tlačěn do záporných hodnot posunů v ose Z, druhý konec se chová přesně naopak. A stejně jako u předchozího vzorku je tomu přesně naopak mezi sousedními hranolky.

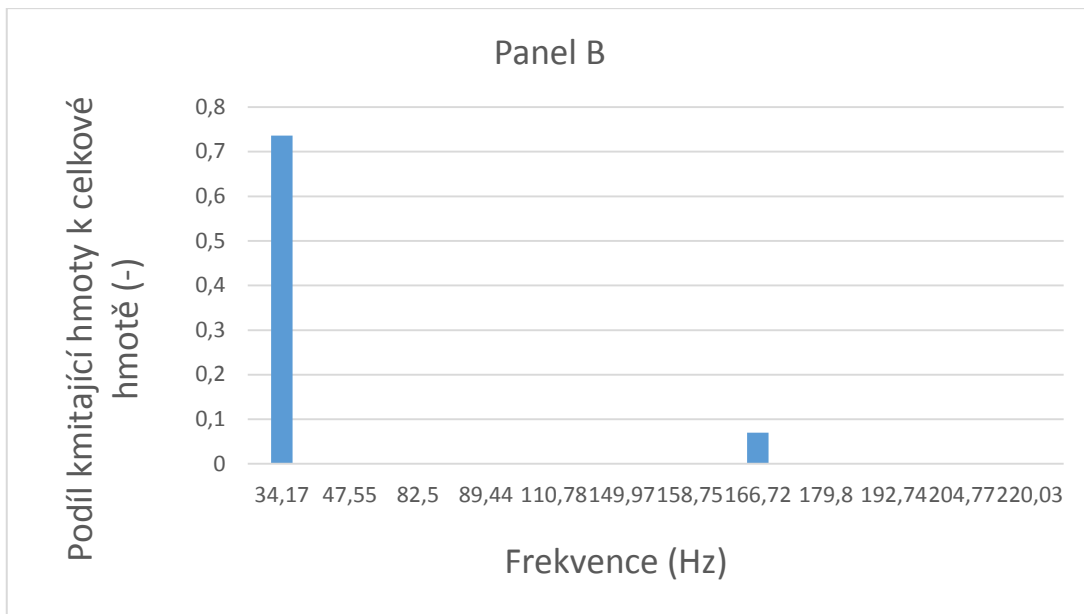
Obr. 23: Modální analýza panelu A. Posuny bodů panelu při frekvenci 391,7 Hz. Tato deformace je v porovnání s ostatními značně nesouměrná. Neobjevuje se zde takřka žádná pravidelnost. Amplitudy jsou v oblasti středu. Nejméně se pohybují mezery, tj. oblasti mezi hranolky.

5.1.1.2 Panel B

Tab. 9: Výstupní data z modální analýzy panelu B.

PANEL B						
frekvence	34,17	47,55	82,5	89,44	110,78	149,97
podíl kmitající hmoty	0,736	$5,20 \cdot 10^{-10}$	$1,04 \cdot 10^{-09}$	$3,59 \cdot 10^{-04}$	$2,00 \cdot 10^{-11}$	$5,23 \cdot 10^{-10}$
frekvence	158,75	166,72	179,8	192,74	204,77	220,03
podíl kmitající hmoty	$1,03 \cdot 10^{-08}$	$6,98 \cdot 10^{-02}$	$3,99 \cdot 10^{-08}$	$1,10 \cdot 10^{-09}$	$2,59 \cdot 10^{-04}$	$2,90 \cdot 10^{-11}$

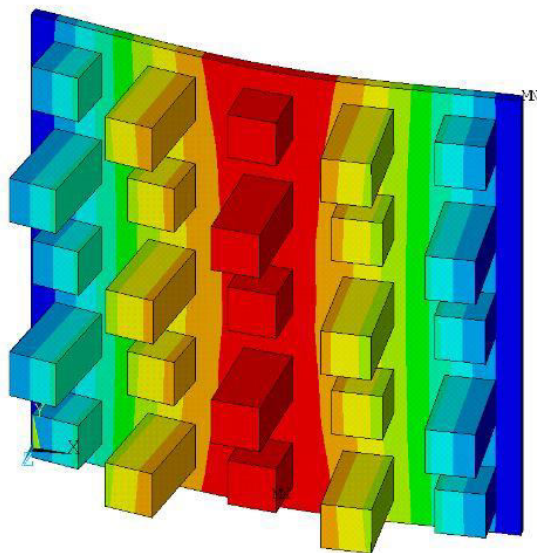
Tabulka obsahuje data z modální analýzy panelu B. Po přenesení dat do grafu získáme následující:



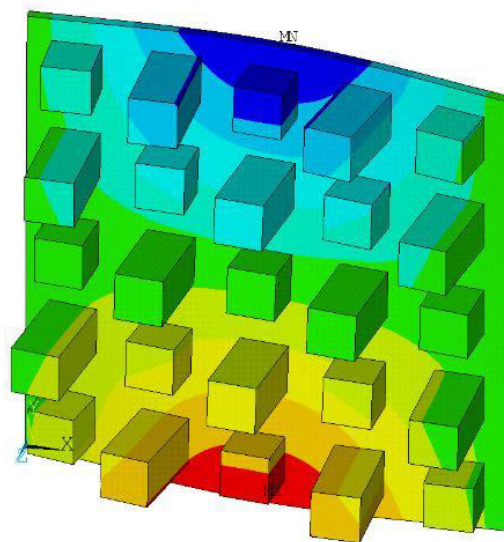
Obr. 24: Výstupní data z modální analýzy panelu B.

Pro panel B je kritická frekvence cca 35 Hz. K vlastním kmitům, i když řádově méně, dochází okolo frekvence 166 Hz, 90 Hz a 205 Hz.

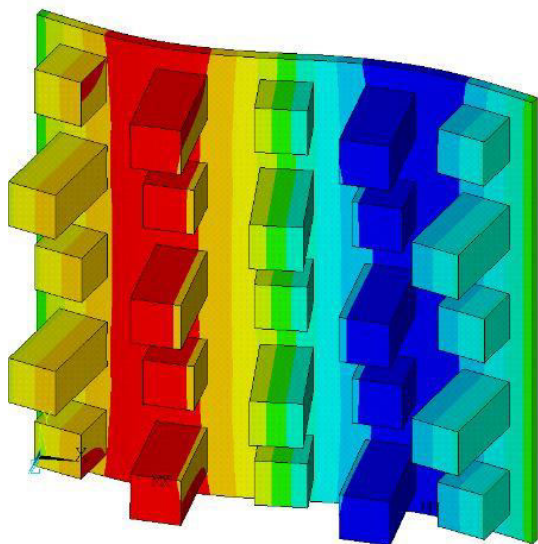
Následují animace, zobrazující vlastním kmity desky pod různými frekvencemi a posuny jednotlivých bodů.



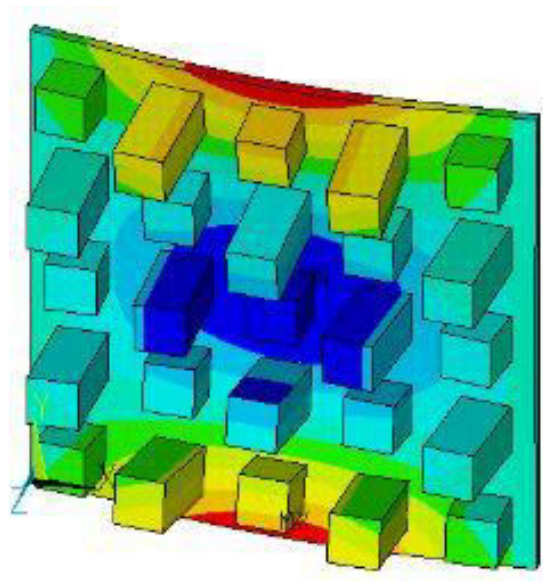
Obr. 25



Obr. 26



Obr. 27



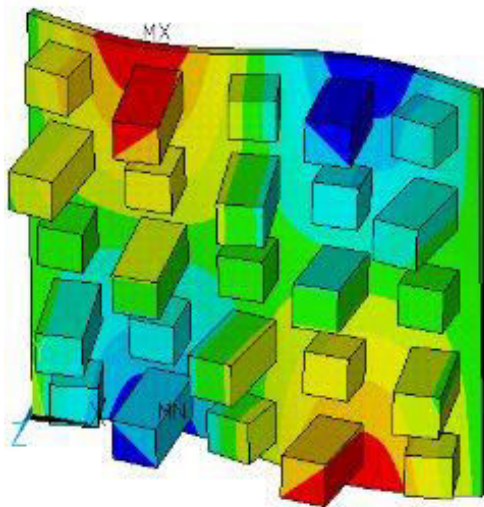
Obr. 28

Obr. 25: Modální analýza panelu B. Posuny bodů panelu při frekvenci 34, 2 Hz. Podobně jako u panelu A, je deformace při frekvenci, která má nejvyšší poměr kmitající hmoty k celkové hmotě, značně souměrná. Ve směru osy Y nejsou výrazné posuny. Nejvyšší posuny na ose Z jsou ve středové části panelu. Z této animace je též patrný vliv vetknutí na tvar deformace.

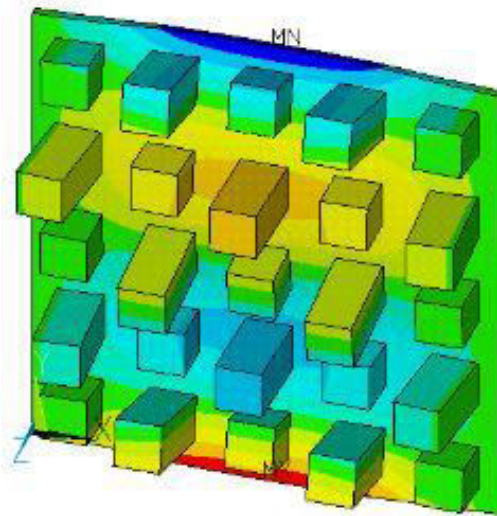
Obr. 26: Modální analýza panelu B. Posuny bodů panelu při frekvenci 47,6 Hz. Vzhledem k předchozímu panelu se posuny v ose Z přemisťují ze směru osy X do směru osy Y. Okraje zůstávají převážně bez posunu, pracuje hlavně středová část panelu, kdy se jeden její okraj dostává do kladných a druhý okraj do záporných hodnot posunů na ose Z.

Obr. 27: Modální analýza panelu B. Posuny bodů panelu při frekvenci 82,5 Hz. Panel se začíná otáčet okolo středové osy ve směru osy X. Vetknuté konce zůstávají ustálené, stejně tak střed. Druhá a čtvrtá řada prvků má nejvýraznější posun.

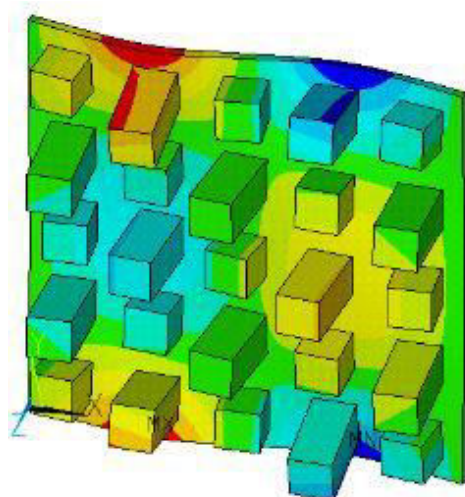
Obr. 28: Modální analýza panelu B. Posuny bodů panelu při frekvenci 89, 4 Hz. Nyní se okraje panelu ležící na středové ose (směr osy Y) snaží jakoby zabalit střed panelu. Ten se tedy přesouvá do záporných hodnot posunů v ose Z, zatímco jeho okraje do kladných hodnot.



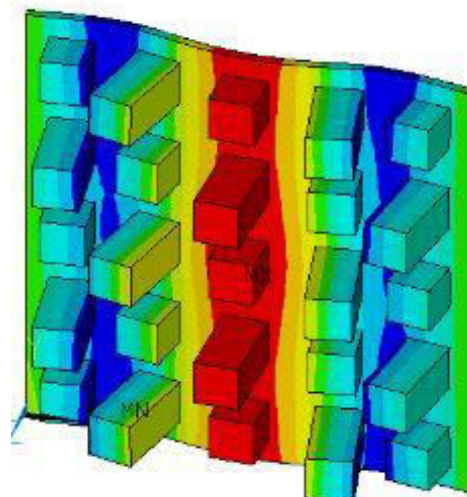
Obr. 29



Obr. 30



Obr. 31



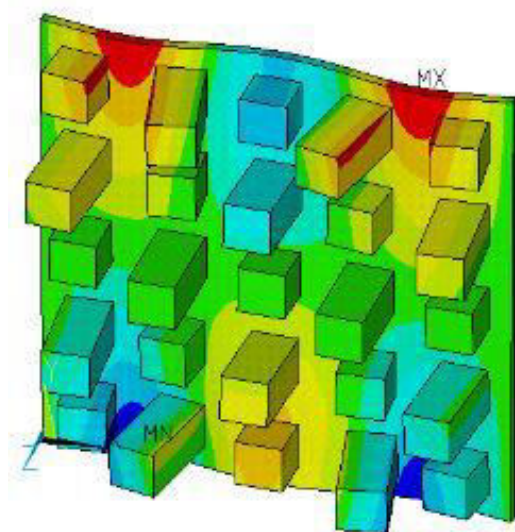
Obr. 32

Obr. 29: Modální analýza panelu B. Posuny bodů panelu při frekvenci 110 Hz. Rohy panelu ležící úhlopříčně naproti sobě se začínají přitahovat. Jedna dvojice k sobě kladným směrem, druhá dvojice směrem záporným. Střed panelu a vetknuté okraje jsou s minimálními posuny.

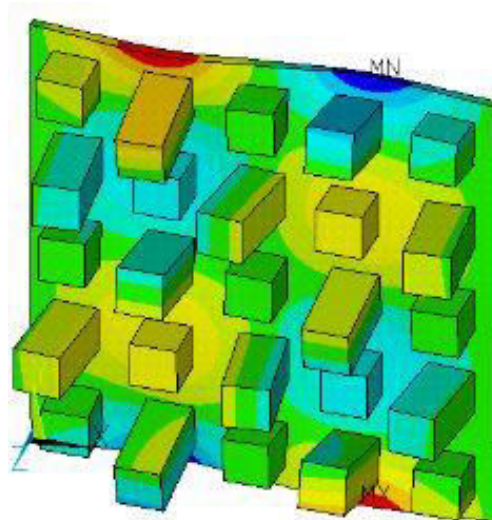
Obr. 30: Modální analýza panelu B. Posuny bodů panelu při frekvenci 150 Hz. Zatímco spodní okraj panelu se tlačí směrem do prostoru, horní okraj panelu je vtlačován do stěny. Panel se celkově vlní spíše po délce osy Y. Střed a vetknuté okraje zůstávají víceméně bez posunu.

Obr. 31: Modální analýza panelu B. Posuny bodů panelu při frekvenci 158,7 Hz. Posuny panelu při této frekvenci se liší od předešlých. Panel je jakoby rozdělen na šest polí, která pracují více méně nezávisle. Mezi poli dochází k střídání amplitud mezi kladnými a zápornými posuny. Pole jsou ohraničena oblastmi bez výrazného posunu.

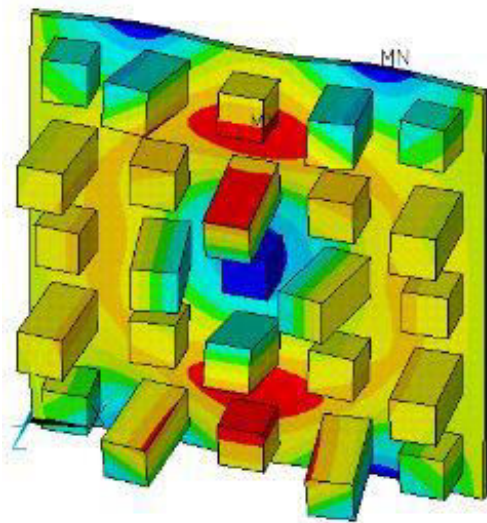
Obr. 32: Modální analýza panelu B. Posuny bodů panelu při frekvenci 166,7 Hz. Tato animace připomíná první vyšetřovanou deformaci panelu B (frekvence 34,2 Hz). Při pohledu na obrázek č. 24 zjistíme, že z grafu vyplývá, že právě při této frekvenci a při první vyšetřované frekvenci, dochází k nejvyššímu poměru kmitající hmoty k celkové hmotě. Proto jsou animace podobné.



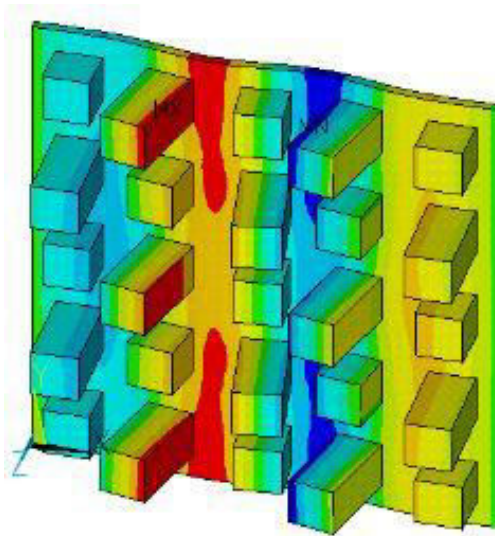
Obr. 33



Obr. 34



Obr. 35



Obr. 36

Obr. 33: Modální analýza panelu B. Posuny bodů panelu při frekvenci 180 Hz. Panel se při deformaci opět rozděluje na šest oddělených polí. Platí, že sousední pole vykazují vždy opačný posun po ose Z. Nejvyšších posunů je dosaženo při rozích panelu. Střed opět bez výraznějšího posunu.

Obr. 34: Modální analýza panelu B. Posuny bodů panelu při frekvenci 192, 7 Hz. Deformace připomíná předcházející obrázek. Rozdíl je v tom, že nejvyšších amplitud nedosahují protilehlé rohy, ale rohy naproti sobě úhlopříčně ležící.

Obr. 35: Modální analýza panelu B. Posuny bodů panelu při frekvenci 204, 7 Hz. Posuny jsou rozloženy jakoby v soustředném kruhu okolo středu. V tomto se tato konkrétní deformace panelu značně liší od těch předchozích. Střed panelu a okraje jdou do záporných hodnot, mezi tím leží oblast kladných posunů. Vše je odděleno oblastmi bez výraznějšího posunu.

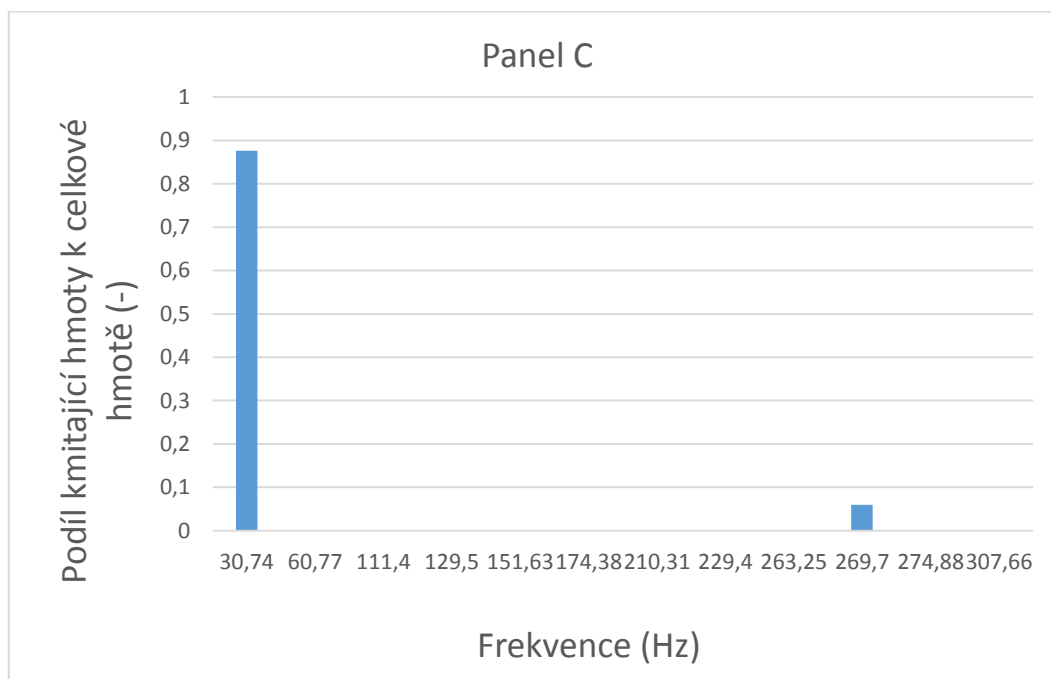
Obr. 36: Modální analýza panelu B. Posuny bodů panelu při frekvenci 220 Hz. Posuny bodů ve směru osy Z se opět přesouvají převážně do roviny X, v rovině Y zůstávají více méně konstantní. Hned za středovou osou, která je téměř bez posunu, vznikají dvě nejvýraznější amplitudy. Vetknuté konce jsou bez posunu.

5.1.1.3 Panel C

Tab. 10: Výstupní data z modální analýzy panelu.

PANEL C						
frekvence	30,74	60,77	111,4	129,5	151,63	174,38
podíl kmitající hmoty	0,876	$2,53 \cdot 10^{-10}$	$7,59 \cdot 10^{-04}$	$8,80 \cdot 10^{-05}$	$4,27 \cdot 10^{-11}$	$1,32 \cdot 10^{-11}$
frekvence	210,31	229,4	263,25	269,7	274,88	307,66
podíl kmitající hmoty	$3,17 \cdot 10^{-08}$	$1,58 \cdot 10^{-04}$	$1,06 \cdot 10^{-09}$	$6,00 \cdot 10^{-02}$	$2,40 \cdot 10^{-11}$	$6,74 \cdot 10^{-08}$

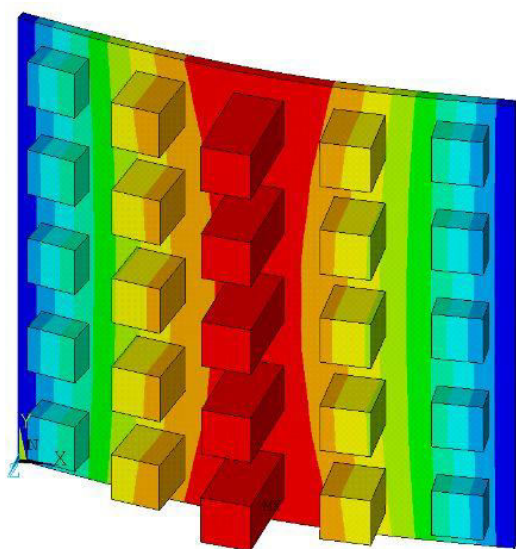
Tabulka obsahuje data z modální analýzy panelu C. Po přenesení dat do grafu získáme následující:



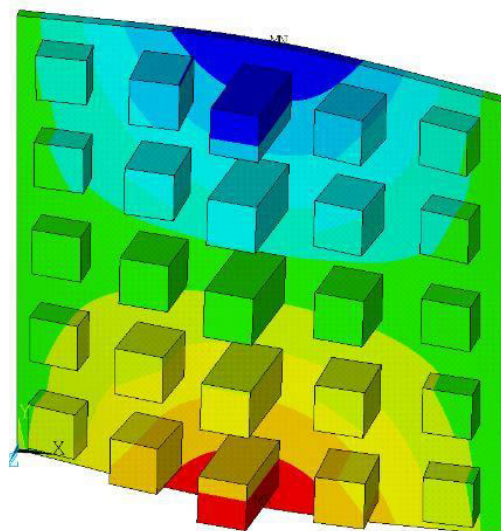
Obr. 37: Výstupní data z modální analýzy panelu.

Pro panel C je kritická frekvence okolo 31 Hz, kdy dochází k vlastním kmitům. To stejné, i když řádově méně, se děje okolo frekvence 270 Hz.

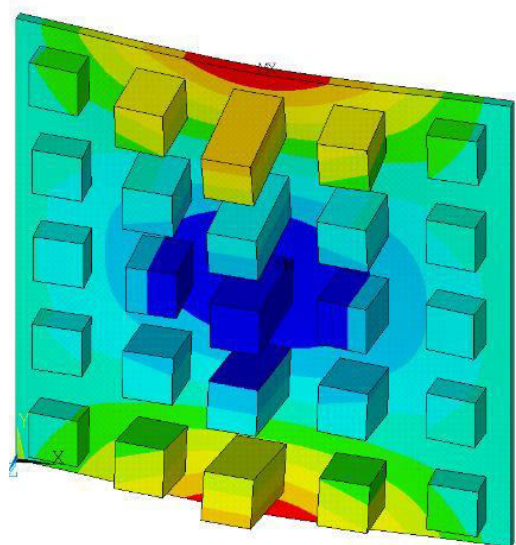
Následují animace, zobrazující vlastní kmity desky pod různými frekvencemi a posuny jednotlivých bodů. Příslušná frekvence je vždy uvedena v levém horním rohu animace.



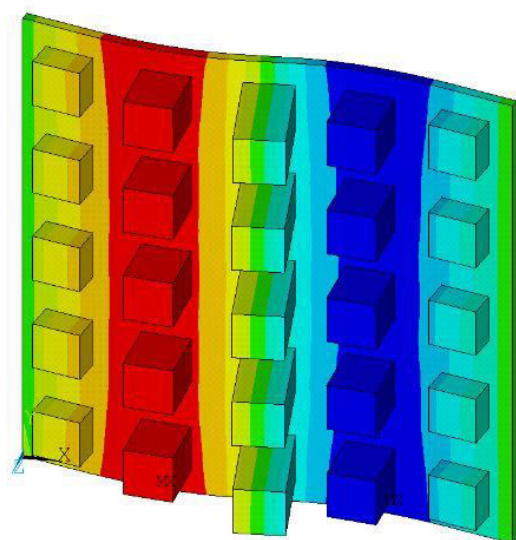
Obr. 38



Obr. 39



Obr. 40



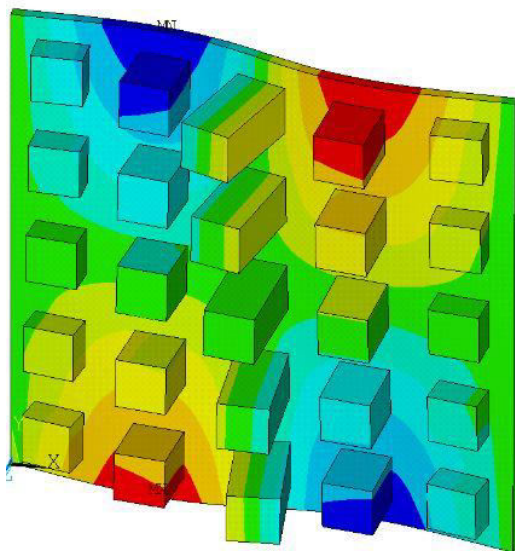
Obr. 41

Obr. 38: Modální analýza panelu C. Posuny bodů panelu při frekvenci 30,7 Hz. Podobně jako u předchozích panelů jsou posuny v ose Z u první vyšetřované frekvence převážně v rovině osy X. I zde je první vyšetřovaná frekvence tou, která dosahuje nejvyššího poměru mezi kmitající a celkovou hmotou.

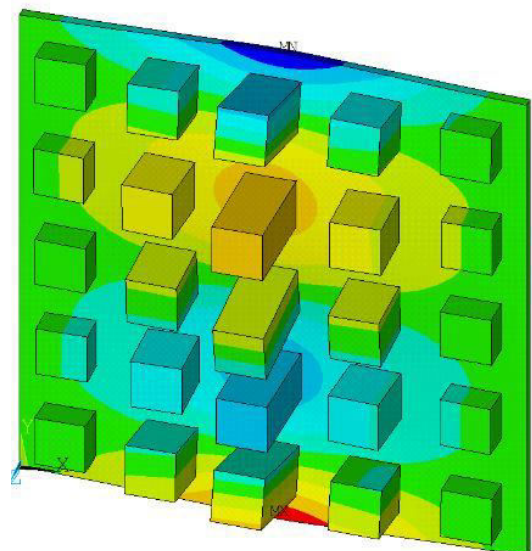
Obr. 39: Modální analýza panelu C. Posuny bodů panelu při frekvenci 60,7 Hz. Nyní přešla deformace i do roviny Y. Je stále velmi souměrná. Střed a okraje panelu tvoří jakýsi kříž, kde není skoro žádný posun bodů.

Obr. 40: Modální analýza panelu C. Posuny bodů panelu při frekvenci 111,4 Hz. Zde se deformace značně liší od ostatních v tom, že se vyskytuje na panelu ve třech polích, z nichž v každém jsou posuny bodů rovnoměrně rozmístěny v polích elipsovitého tvaru. Střed a okraje panelu se snaží přitáhnout a vtlačují směrem do středu panelu.

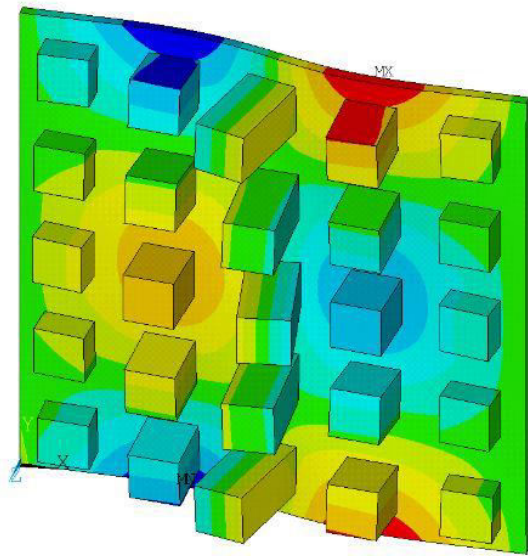
Obr. 41: Modální analýza panelu C. Posuny bodů panelu při frekvenci 129,4 Hz. Obrázek připomíná obr. 38. Posuny bodů jsou soustředěny ve svislých pruzích v rovině osy Y. Na rozdíl od obr. 38 se ale v největších posunech po ose Z nepohybuje střed panelu. Ten je v tomto případě spolu s vetknutými konci tím nejstabilnějším místem na panelu. A právě v polovině délky mezi středem a vetknutým koncem se nyní vyskytují dvě místa s největšími posuny.



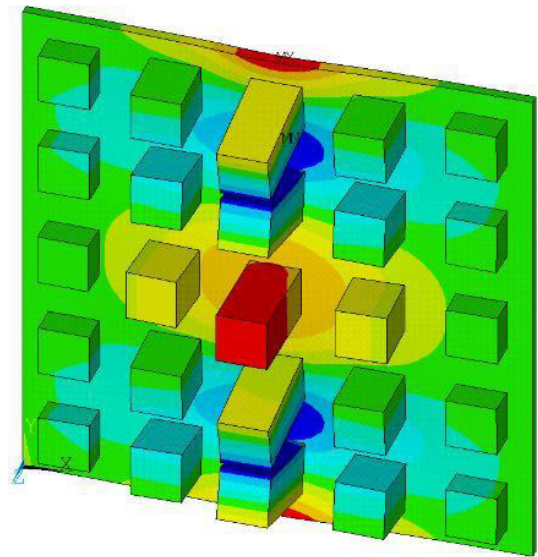
Obr. 42



Obr. 43



Obr. 44



Obr. 45

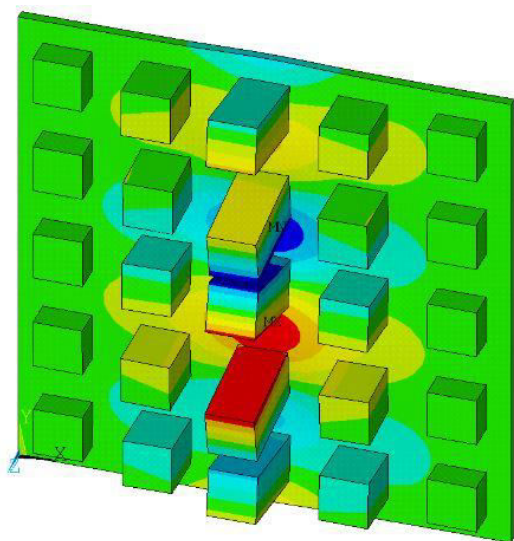
Obr. 42: Modální analýza panelu C. Posuny bodů panelu při frekvenci 151,6 Hz. Panel pracuje převážně ve 4 polích připomínajících polovinu elipsy. Ve středu každé takové poloviny elipsy se nachází místo s největším posunem a opět, jak tomu bylo už i u jiných animací, vždy sousední pole mají posuny do opačných hodnot na ose Z, i když v absolutním měřítku dosahují stejných hodnot.

Obr. 43: Modální analýza panelu C. Posuny bodů panelu při frekvenci 174,3 Hz. Aktivita panelu je soustředěna ve třech elipsách, z nichž jedna je rozdělena na dvě poloviny a ty působí při okraji panelu. Ve středech těchto polovin se nacházejí největší posuny. Elipsy jsou odděleny vždy určitou plochou s minimálními posuny. Minimální posuny mají též vetknuté konce panelu.

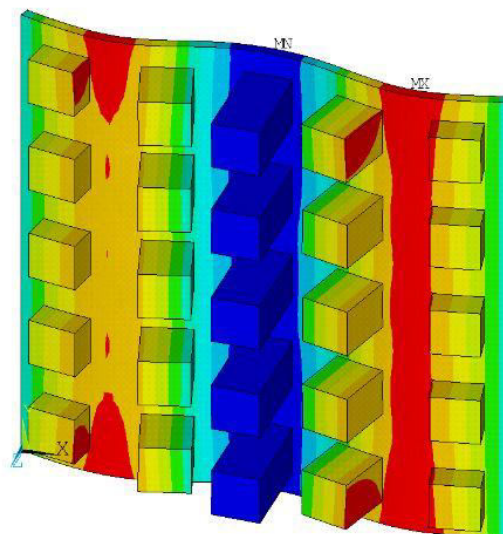
Obr. 44: Modální analýza panelu C. Posuny bodů panelu při frekvenci 210,3 Hz. Čtyři místa s největšími posuny leží ve středech půlkruhu při okrajích panelu. Ve středu panelu jsou umístěny další dva deformační kruhy, avšak ty nedosahují takových posunů. Střídání kladných a záporných posunů v jednotlivých polích na panelu má za následek, že hranolky ležící ve středu panelu jsou vychýleny do různých stran.

Obr. 45: Modální analýza panelu C. Posuny bodů panelu při frekvenci 229 Hz. Hranolek ležící ve středu dosahuje nejvyšší kladné amplitudy, opačná hodnota však

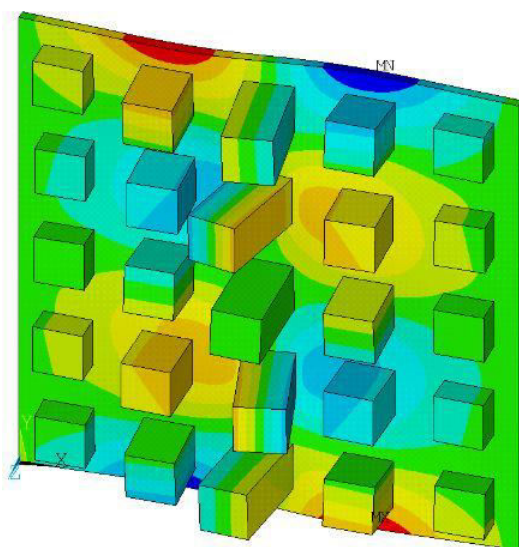
vychází mezi hranolky, takže se naklání k sobě. Posuny jsou opět centralizovány do elipsoidních polí. Značná část panelu je v tomto případě bez posunu.



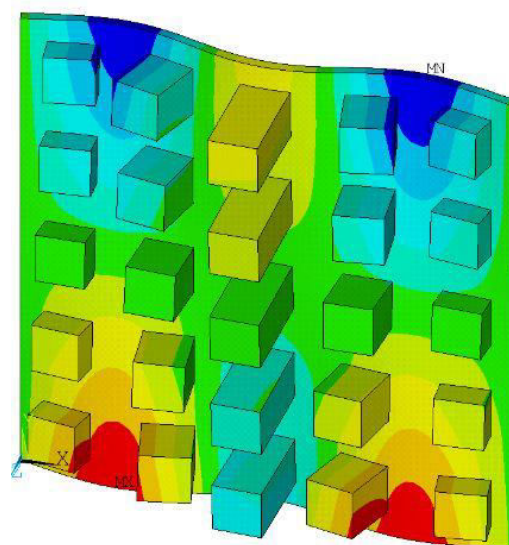
Obr. 46



Obr. 47



Obr. 48



Obr. 49

Obr. 46: Modální analýza panelu C. Posuny bodů panelu při frekvenci 263,2 Hz. V porovnání s ostatními frekvencemi dochází při této frekvenci k jednomu z nejmenších poměrů mezi kmitající hmotou a celkovou hmotou. Amplitudy leží opět mezi některými hranolky – ty se pak následkem toho přiklánějí k sobě.

Obr. 47: Modální analýza panelu C. Posuny bodů panelu při frekvenci 269,5 Hz. Po první vyšetřované frekvenci 30,7 Hz je při této frekvenci dosaženo druhého nejvyššího poměru mezi kmitající hmotou a celkovou hmotou. To je už patrné ze svislého uspořádání jednotlivých polí na panelu rovnoběžně s vetknutými konci.

Obr. 48: Modální analýza panelu C. Posuny bodů panelu při frekvenci 274,8 Hz. Šest aktivních elipsovitých polí, avšak v porovnání s předchozím panelem jsou posuny na ose Z minimální. Zelená plocha, zastupující místa s minimálním posunem, tvoří velkou část animace.

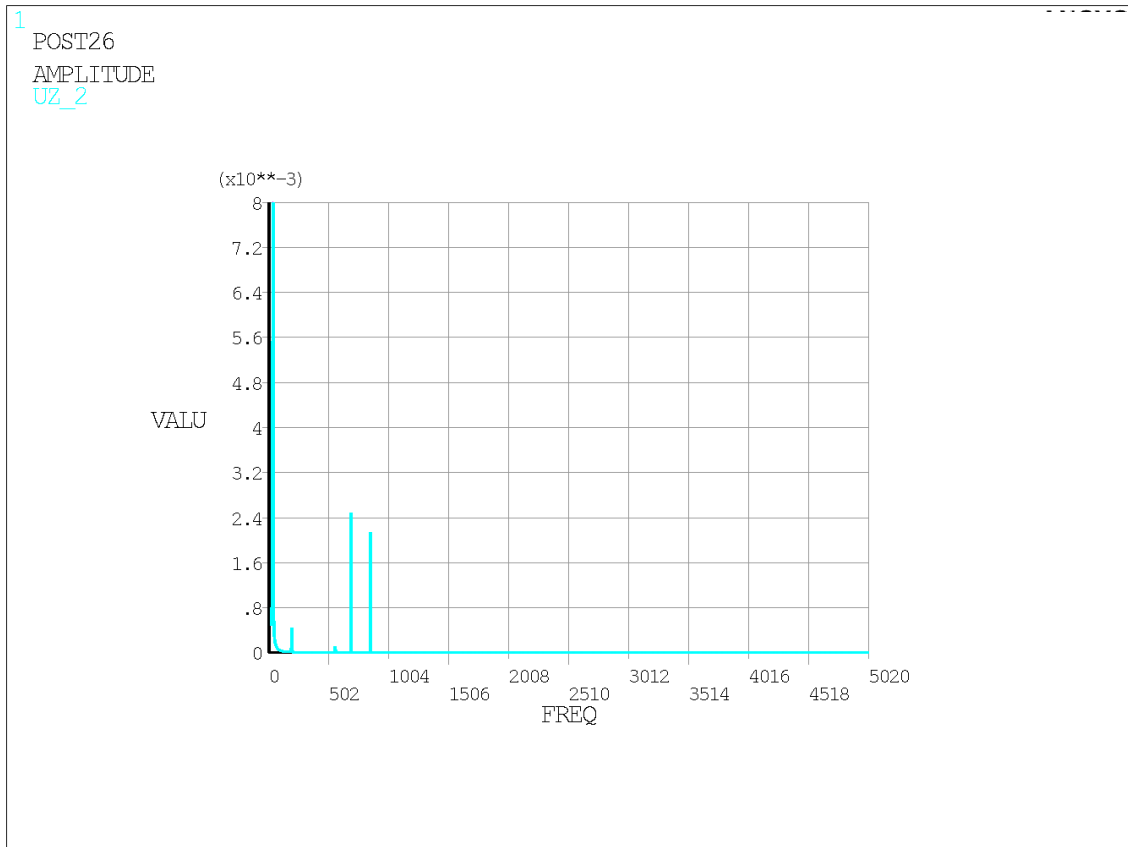
Obr. 49: Modální analýza panelu C. Posuny bodů panelu při frekvenci 307,6 Hz. Zelená plocha opět zastupuje značnou část panelu. To naznačuje, že při této frekvenci nereaguje panel příliš vlastní rezonancí. Jak už několikrát, amplitudy jsou čtyři a jsou s jistým odstupem umístěny v rozích. Úplnému umístění v rozích brání vetknutí panelu.

5.1.2 Harmonická analýza

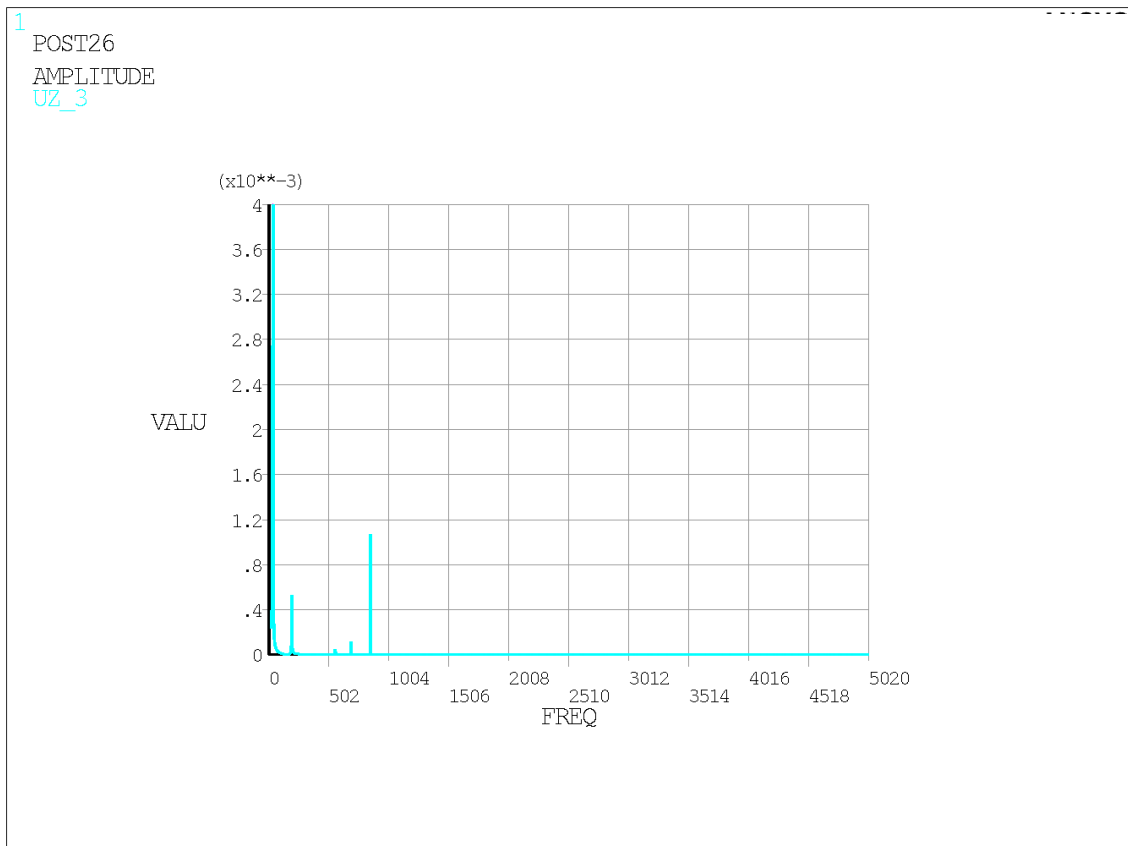
Harmonická analýza, která byla pro každý z panel provedena ve frekvenčním rozsahu 20 – 5020 Hz s krokem 2 Hz, přiřazuje každé zkoumané frekvenci (tedy 2500 kroků) amplitudu, které dosáhl každý jednotlivý bod panelu pod tlakem dané frekvence. Body byly vždy vybrány dva – ze středu a ze vzdálenosti 10 cm od vetknutého okraje (stále na středové ose). Středový bod je vždy uveden jako první. Krajiní jako druhý.

5.1.2.1 Panel A

U tohoto panelu mají díky jeho větší homogenitě oba body srovnatelný harmonický průběh. Největší amplitudy je dosaženo při nízké frekvenci okolo 50 Hz. Středový bod dosahuje vyšších posunů, než bod krajiní. To je dáno vetknutím krajů. Nad 1000 Hz už panel nevykazuje, co se týče vlastních kmitů, žádnou aktivitu.

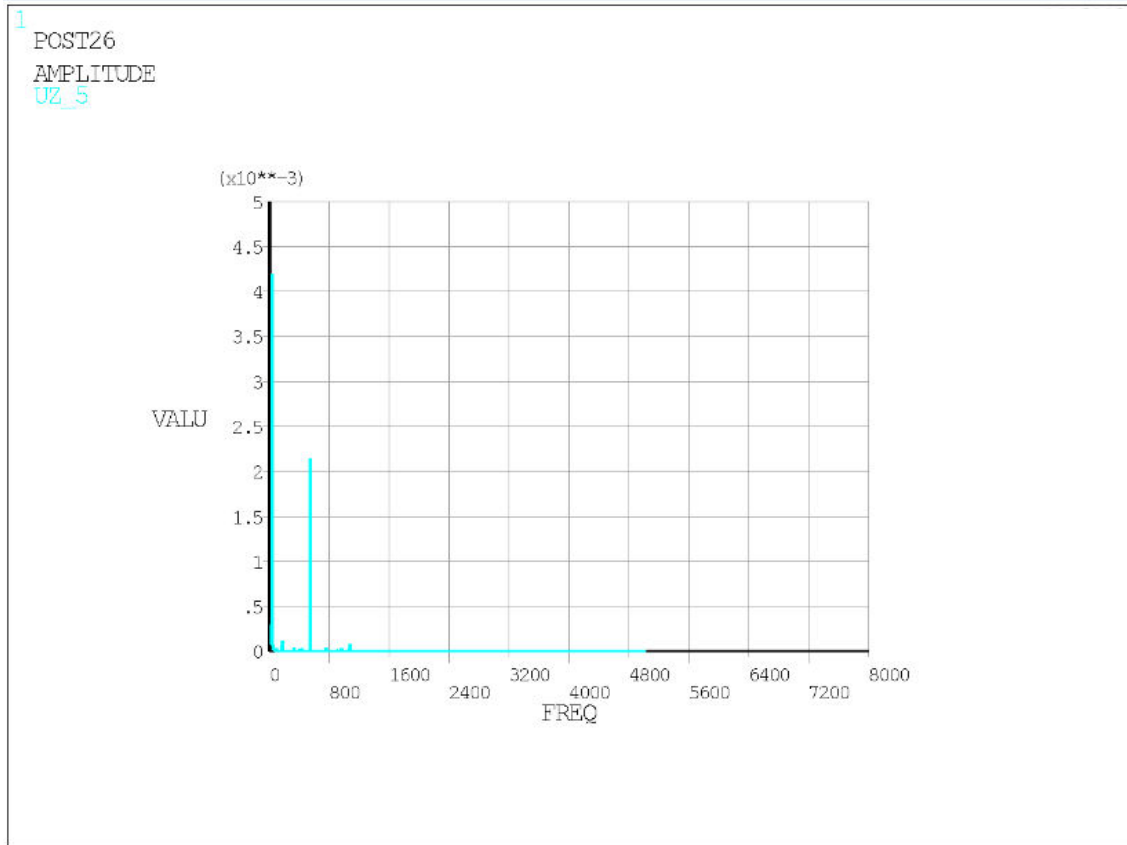


Obr. 50: Uzlová posunutí středového bodu (UZ_2) z harmonické analýzy panelu A.

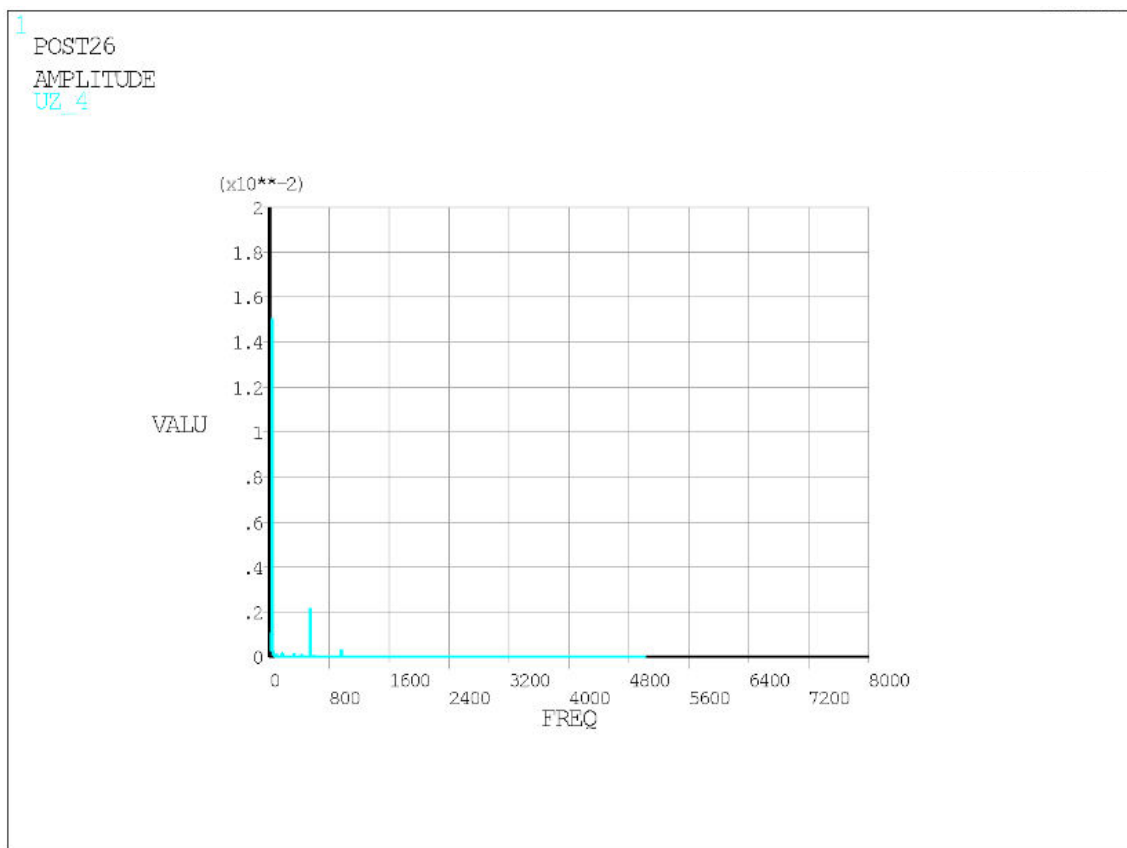


Obr. 51: Uzlová posunutí krajního bodu (UZ_3) z harmonické analýzy panelu A.

5.1.2.2 Panel B



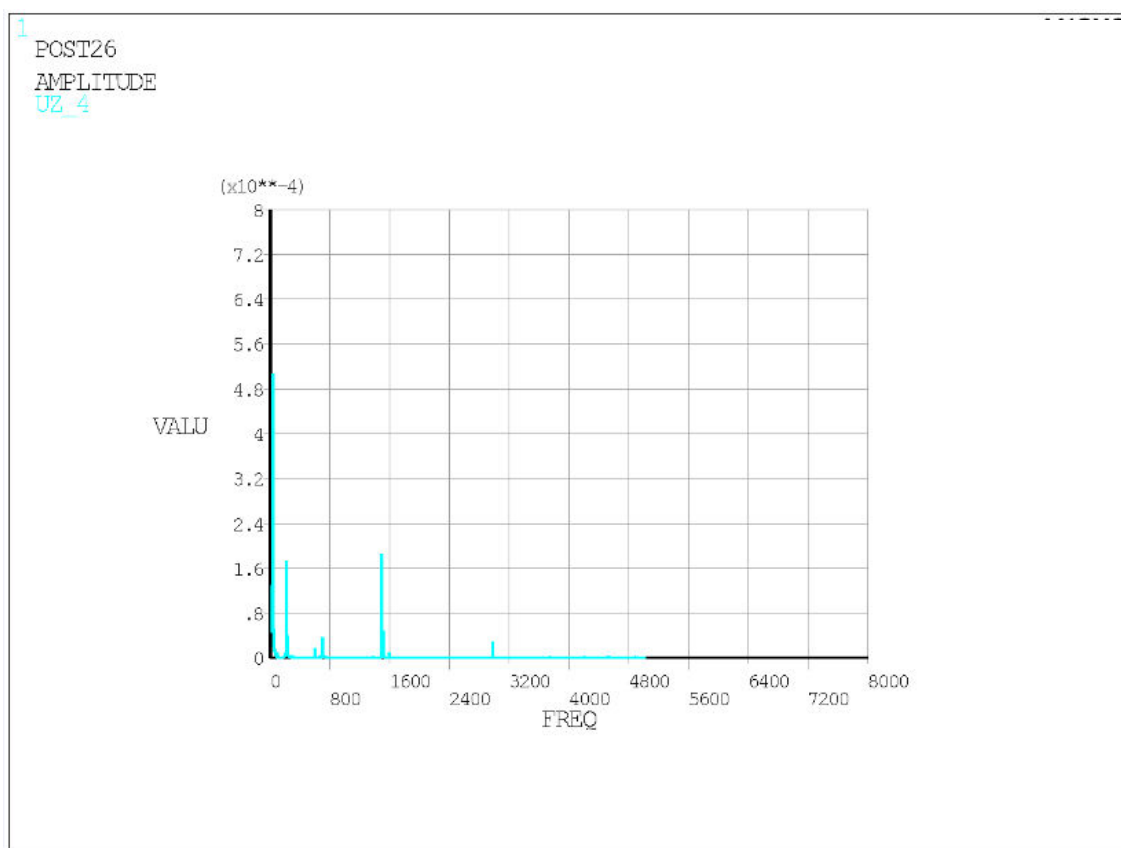
Obr. 52: Uzlová posunutí středového bodu (UZ_5) z harmonické analýzy panelu B.



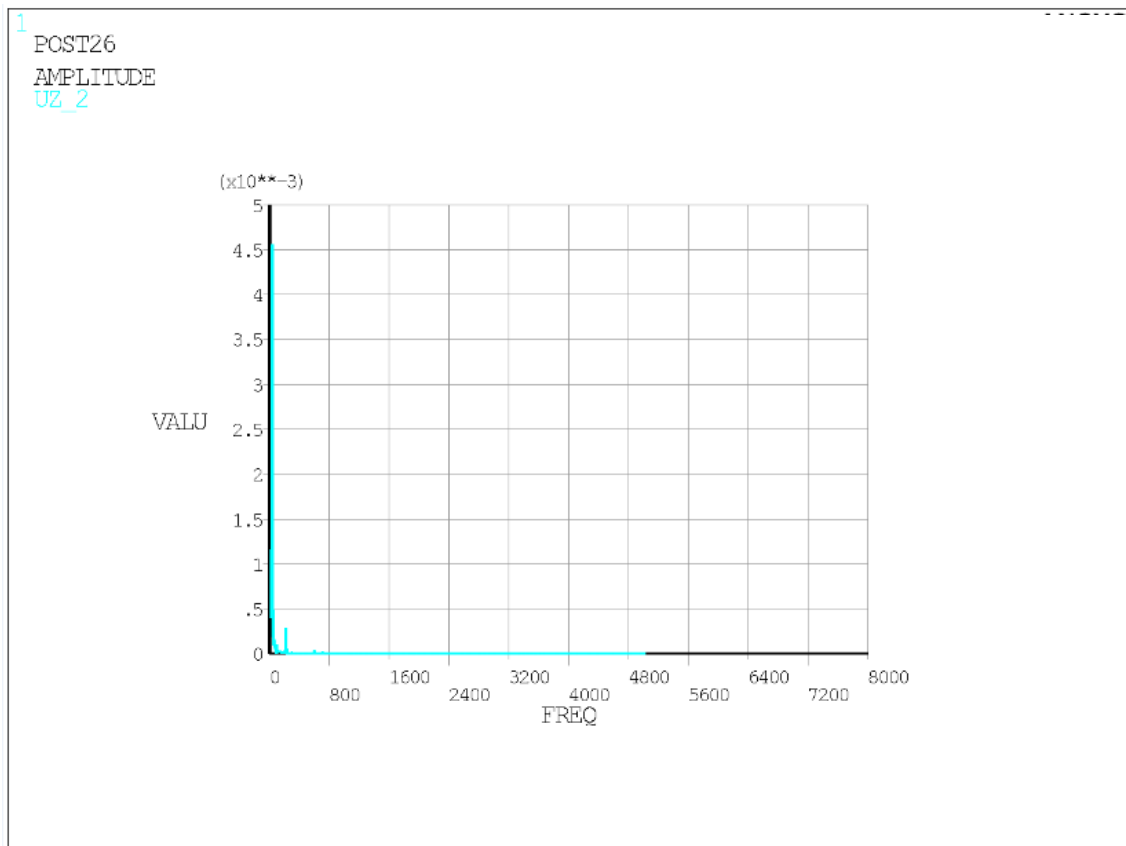
Obr. 53: Uzlová posunutí krajního bodu (UZ_4) z harmonické analýzy panelu B.

Největších posunů dosahují body při nízkých frekvencích. U středového bodu jsou až 4x vyšší než u krajního. Kolem 1000 Hz opět upadá aktivita vlastních kmitů panelu. Ve srovnání s předchozím panelem jsou posuny zkoumaných bodů o něco menší. To je dáno větší rozměrovou různorodostí hranolků, takže panel nepůsobí při určité frekvenci na všech polích, ale frekvenční škála je rozprostřena více po panelu.

5.1.2.3 Panel C



Obr. 54: Uzlová posunutí středového bodu (UZ_4) z harmonické analýzy panelu C.

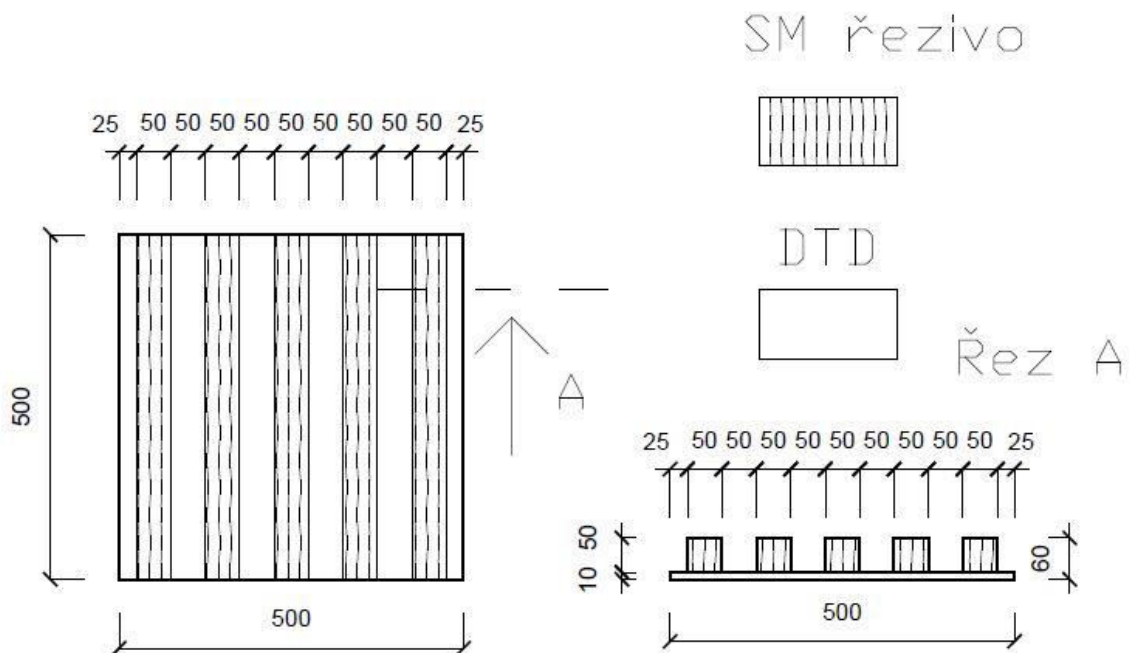


Obr. 55: Uzlová posunutí krajního bodu (UZ_2) z harmonické analýzy panelu C.

Panel C má, co se týče vlastních kmitů, nejvariabilnější výsledky. To se dalo očekávat. Obsahuje tři tvary různých výšek, tudíž bude k vlastnímu kmitání docházet hned při několika frekvencích. V grafu pro bod u okraje panelu opět vidíme díky vetknutí nižší amplitudy. Panel je díky prvku výšky 3 cm aktivní i ve vyšších frekvencích.

5.2 Funkční vzorek

5.2.1 Panel A



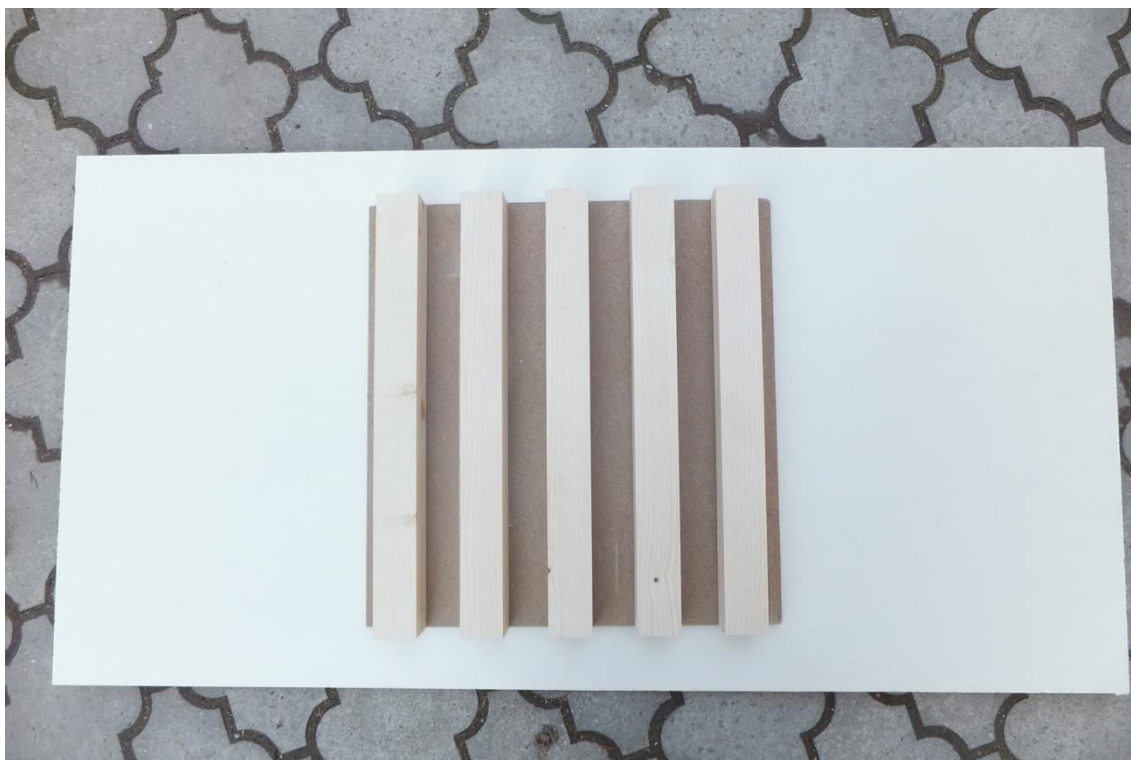
Obr. 56: Schéma panelu A.

Tato varianta dřevěného akustického panelu se vyznačuje akustickými kanály, které vznikají mezi dřevěnými hranoly. Je možnost si předem zvolit, jakým směrem by měla zvuková transmise vést a naopak, kterým směrem jí chceme bránit. Akustické kanály by tedy mohl vést buď rovnoběžně s delší stěnou místnosti či kolmo na ni.

Také je zde možná varianta instalovat panely střídavě, jednou rovnoběžně s delší stěnou, podruhé kolmo na ni. Tím by opět vznikalo odlišné akustické prostředí.

Varianta A je určena předně pro stropy, zvláště do přednáškových sálů nebo do míst, kde chceme zajistit zvukový komfort posluchačů z úst přednášejícího a naopak přednášejícímu zajistit to, aby se potenciální hluk z auditoria nevracel k němu, alespoň tedy z bočních míst posluchárny.

Panel je z tří variant panelů nejnáročnější na množství materiálu (na jeden jeho kus, tedy 500x500 mm spotřebujeme 2,5 m SM hranolu 50x50). Zároveň je však technologicky nejméně náročný. Nemá tak členitý povrch.

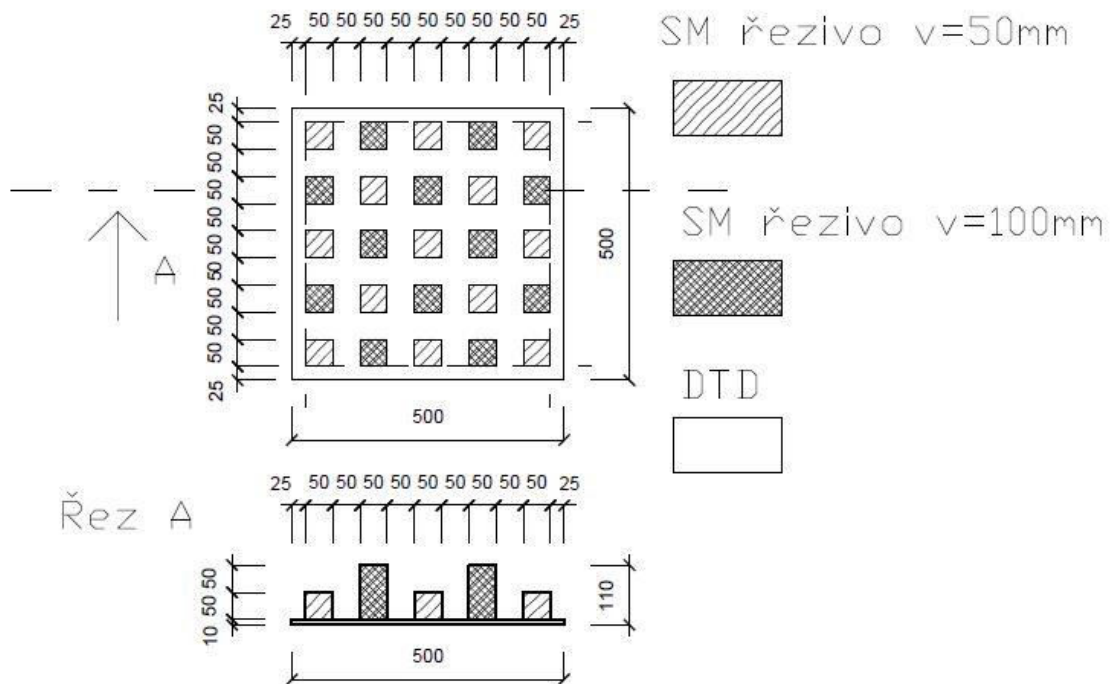


Obr. 57: Fotografie sestaveného panelu A (1).



Obr. 58: Fotografie sestaveného panelu A (2).

5.2.2 Panel B



Obr. 59: Schéma panelu B.

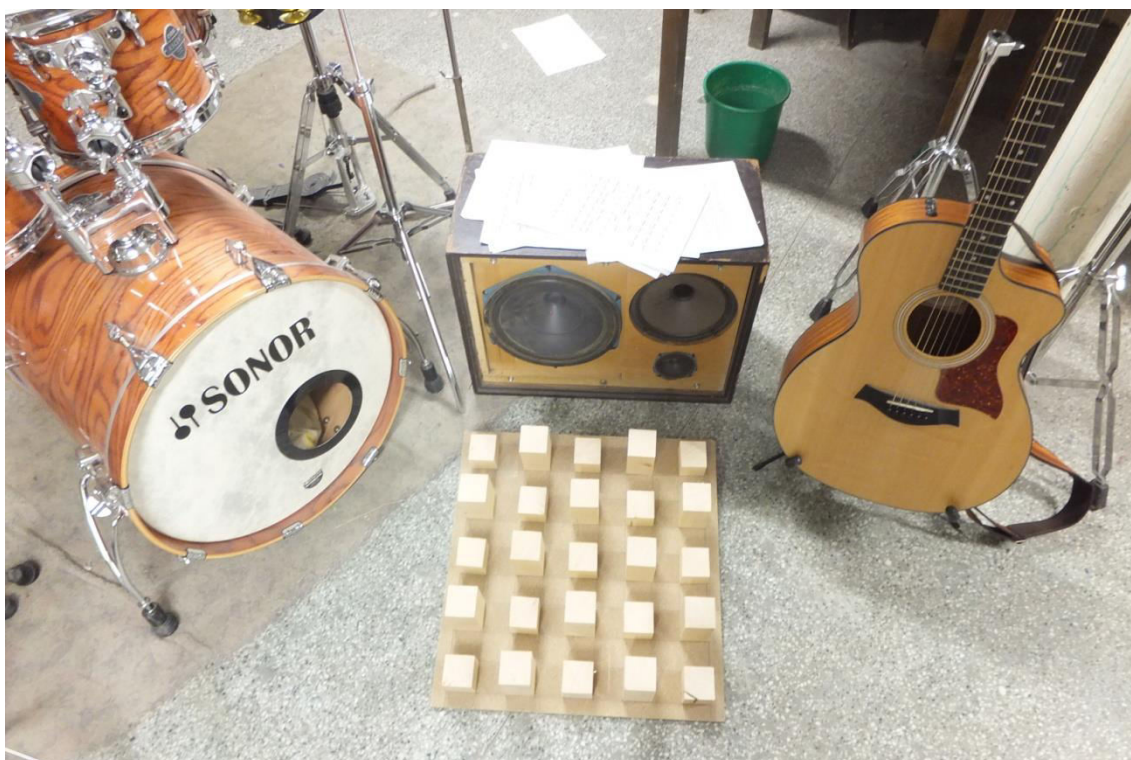
Tato varianta, je určena primárně pro stěny, ale může se použít velmi dobře taky pro stropy. Varianta B sama o sobě netvoří žádný systém. Hodí se proto pro odhlučnění prostor, které nechceme plně vytlumit, tj. kde nám stačí obložení mezi 40 – 70 % povrchu. Dá se dobře kombinovat i s akustickými pěnamí, či jinými měkkými pórovitými materiály.

Jedná se vlastně o kombinaci hranolů o základně 50x50 mm s výškou 50mm a 100mm, jež jsou rovnoměrně prostřídány na povrchu dřevotřískové desky v pravidelných vzdálenostech. Okraj 25 mm široký, jež je po obvodu celého panelu, slouží k následné bezproblémové instalaci. Dva panely dané vedle sebe tedy vytvoří mezeru 50 mm, která navazuje na pravidelné střídání mezer a dřevěných prvků.

Panel je materiálově středně náročný, co se týká technologického postupu, je již složitější jak na rozmístění prvků, tak na jejich přípravu i následnou instalaci.

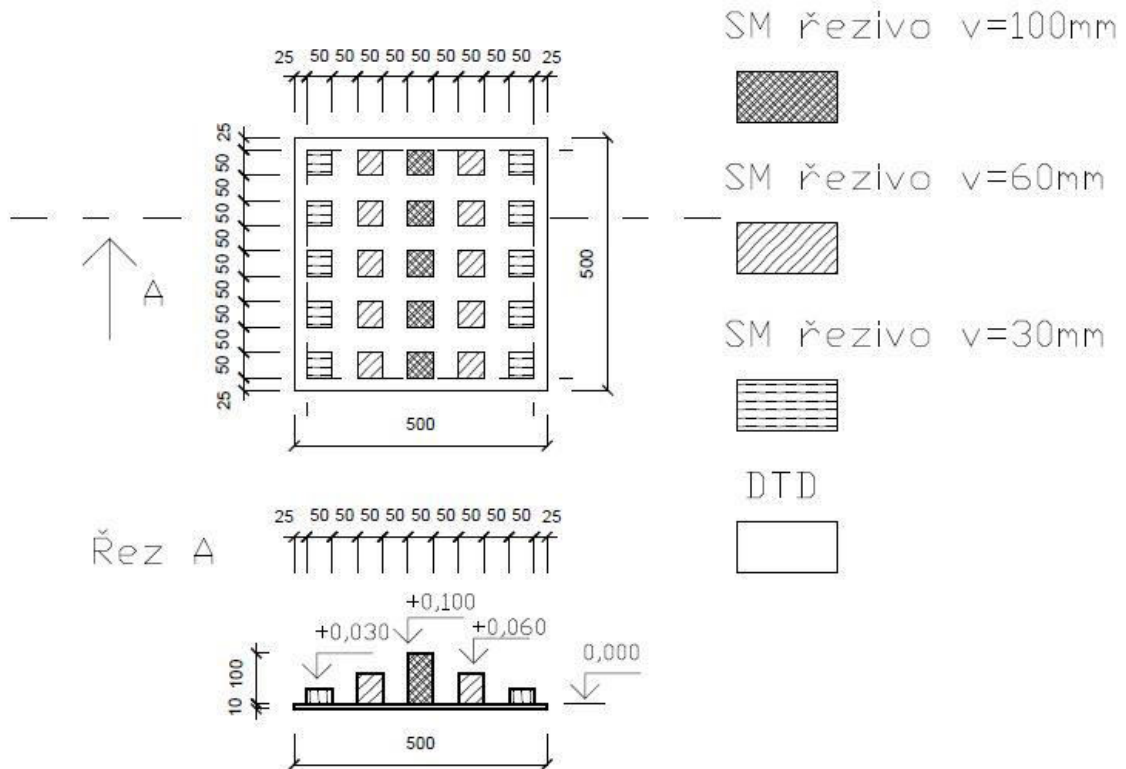


Obr. 60: Fotografie sestaveného panelu B (1).



Obr. 60: Fotografie sestaveného panelu B (2).

5.2.3 Panel C



Obr. 61: Schéma panelu C.

Panel typu C je určen jak pro stropy, tak pro stěny a jako jediný tvoří navazující systém na způsob sinusové vlny. Jednotlivé panely 500x500 mm, skládané k sobě stranami, kde je výška hranolu 30mm vytváří vlny s převýšením 10cm/25cm. Tyto vlny můžeme libovolně kombinovat a přerušovat.

Jedná se o řady hranolů o výšce 30 a 60 mm a 100mm, kde právě oněch 100 mm tvoří amplitudu zmíněné sinusoidy. Musí být však rozhodnuto, zda by měly být vlny orientovány rovnoběžně s podlahou místnosti, či kolmo na ni. Prvky 30, 60 a 90 mm totiž tvoří řady a jsou tedy schopny sinusoidu vytvářet pouze v jednom směru.

Okraj 25 mm široký, jenž je po obvodu celého panelu slouží k následné instalaci. Dva panely dané vedle sebe tedy vytvoří mezeru 50 mm, která navazuje na pravidelné střídání mezer a dřevěných prvků. Panel je ze všech tří variant nejméně náročný na materiál, avšak technologická pracnost a příprava je stejná jako u varianty B, kdy je potřeba všech 25 ks hranolů prošroubovat skrz dřevotřískovou desku.



Obr. 62: Fotografie sestaveného panelu C.

5.3 Posouzení modelu v konfrontaci s výzkumem Leeho a Sakumy

Z rovnice

$$f = c/\lambda \text{ [Hz, m/s, m]}$$

vyplývá, že mezi frekvencí a vlnovou délkou je nepřímá úměra. Podle Leeho a Sakumy (2015) jsou u tlumících desek využívajících obdélníkový či krychlový tvar nejdůležitější dva aspekty: výška prvku a vzdálenost mezi prvky. U vzdálenosti mezi prvky je třeba se vyvarovat délce odpovídající $\frac{1}{2}$ vlnové délky tónů, které se budou v oblasti hojně vyskytovat – dochází tak totiž k interferenci. U výšky prvků je naopak výhodné tohoto dosáhnout – vlna se tak účinně láme a panel se stává účinnějším.

Nyní bude podle výše uvedeného vztahu zjištěno, do jakého frekvenčního pásma se panely hodí:

Panel A

Vzdálenost mezi prvky 5 cm, hledám tudíž příslušnou frekvenci s vlnovou délkou 10 cm.

$$f = c/\lambda \quad f = 330/0,1 \quad f = 3300 \text{ Hz}$$

Výška prvků 5 cm, to odpovídá vlnové délce 10 cm.

$$f = c/\lambda \quad f = 330/0,1 \quad f = 3300 \text{ Hz}$$

Panel B

Vzdálenost mezi prvky 5 cm, hledám tudíž příslušnou frekvenci s vlnovou délkou 10 cm.

$$f = c/\lambda \quad f = 330/0,1 \quad f = 3300 \text{ Hz}$$

Výška prvků 5 a 10 cm, to odpovídá vlnové délce 10 a 20 cm.

$$f = c/\lambda \quad f = 330/0,1 \quad f = 3300 \text{ Hz}$$

$$f = c/\lambda \quad f = 330/0,2 \quad f = 1650 \text{ Hz}$$

Panel C

Vzdálenost mezi prvky 5 cm, hledám tudíž příslušnou frekvenci s vlnovou délkou 10 cm.

$$f = c/\lambda \quad f = 330/0,1 \quad f = 3300 \text{ Hz}$$

Výška prvků 3, 6 a 10 cm, to odpovídá vlnové délce 6, 12 a 20 cm.

$$f = c/\lambda \quad f = 330/0,06 \quad f = 5500 \text{ Hz}$$

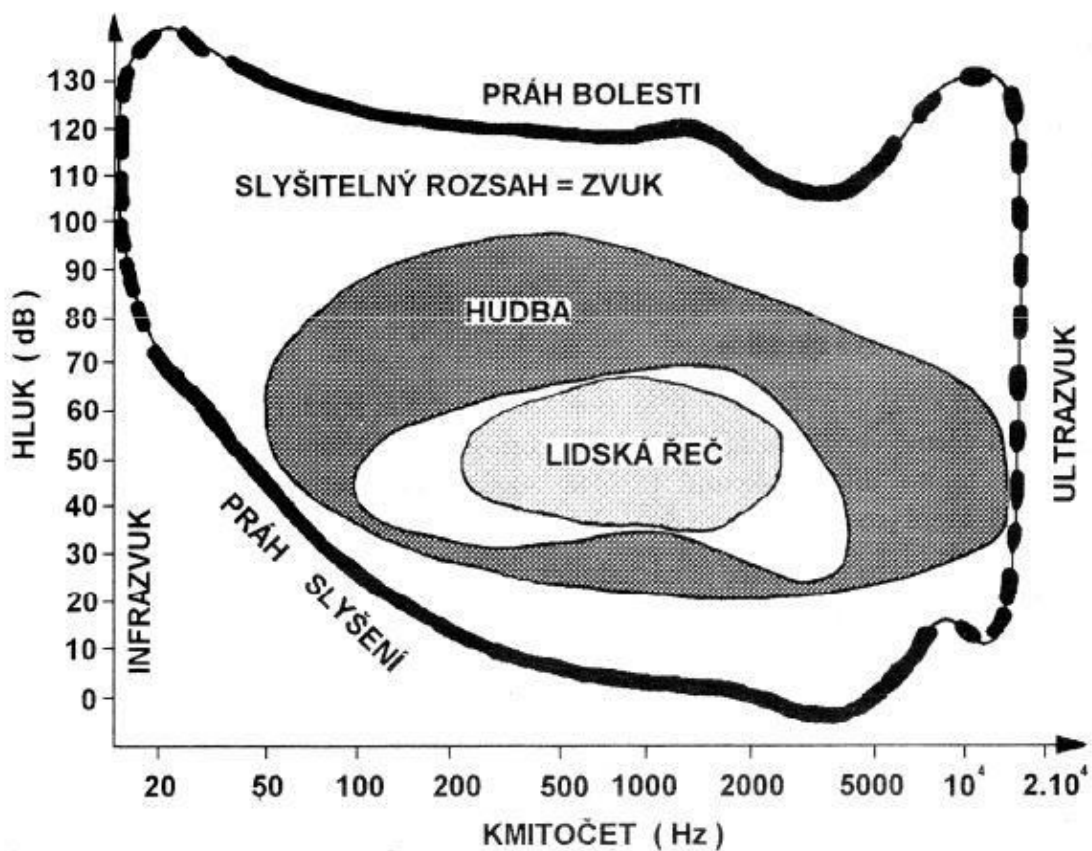
$$f = c/\lambda \quad f = 330/0,12 \quad f = 2\,750 \text{ Hz}$$

$$f = c/\lambda \quad f = 330/0,20 \quad f = 1\,650 \text{ Hz}$$

Ze vztahu $\lambda = c/f$ vyplývá, že panely budou nejlépe fungovat ve frekvenční škále 1650 – 5550 Hz, avšak kolem frekvence 3300 Hz dojde k určité interferenci. Toto tvrzení je však velice obecné a každý panel bude mít lepší tlumící efekt a rozptylový koeficient pro specifické prostředí. Proto je lepší směřovat celou myšlenku k určité customizaci, tedy přizpůsobení panelu konkrétním požadavkům.

5.4 Customizace

V následující kapitole bude předvedena demonstrace toho, jak by konkrétní přizpůsobení požadavkům zákazníka mohlo vypadat. Např.: Bude přijata objednávka: Místnost by měla sloužit jako *přednášecí sál*. Postupovat je možno takto: Mluvené slovo se nachází ve frekvenčním rozsahu asi 200 – 2000 Hz, jak ukazuje následující graf:



Obr. 63: Rozsah a zastoupení lidské řeči a hudby na frekvenční a hlukové škále.

Zároveň je problém s ruchem neseným od posluchačů směrem k přednášejícímu. To docílíme vhodným stropním panelem, např. variantou A. Jak ale zlepšit srozumitelnost? Instalací panelu s maximální účinností rozptylových koeficientů. Podle Watsona (2013), se průměrný ženský hlas pro mluvené slovo pohybuje mezi 180 – 280 Hz. U muže je to 100 – 175 Hz. Dohodne se tedy, že panel bude pokrývat škálu 100 Hz, 200 Hz, 300 Hz, 400 Hz a 500 Hz. Vyšší frekvence, které hlas pokrývá (viz předchozí graf), jsou využívány spíše ve zpěvu, v mluveném slově se s nimi příliš nesetkáme. Nyní budou vypočteny výšky jednotlivých prvků a vzdálenosti mezi nimi.

Vzdálenost prvků

$\lambda = c/f$ $\lambda = 330/500$ $\lambda = 0,66$ m je délka jedné vlny pro frekvenci 500 Hz. Uváděna je záměrně frekvence nejvyšší – bude mít nejkratší vlnu a dál proto není třeba počítat. Kritická je šířka žlabu odpovídající délce $\lambda/2$ (Lee a Sakuma 2015). V tomto případě 33 cm. Takto velká vzdálenost mezi prvky by vedla k nízké členitosti stěn, tudíž by byla kontraproduktivní. Může se tedy snížit počet řad na 4, s tím že vzdálenost mezi nimi bude 7 cm.

Výška prvků

Nyní výpočet jednotlivých výšek prvků (hranolků).

$$f = 100 \text{ Hz}$$

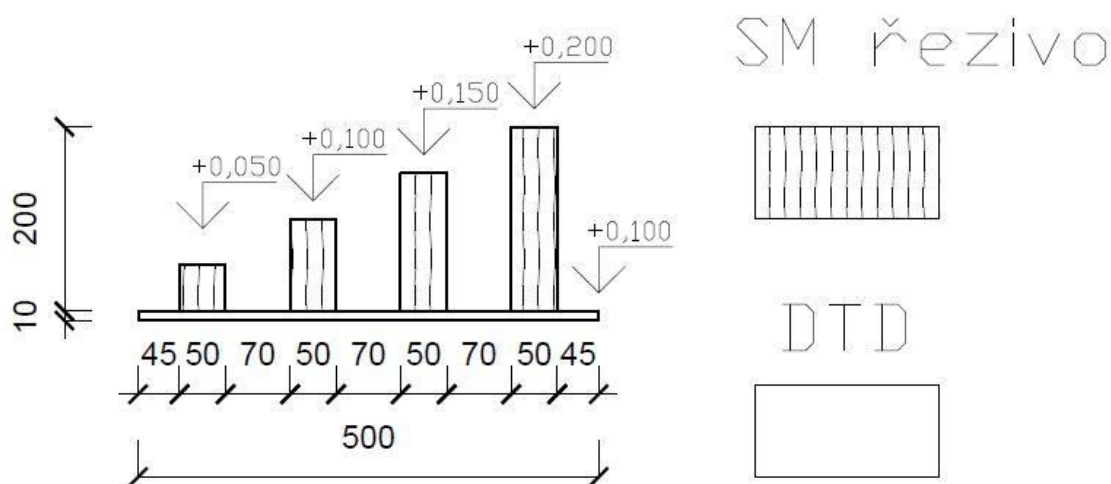
$$\lambda = c/f \quad \lambda = 330/100 \quad \lambda = 3,3 \text{ m} \quad \lambda/2 = \underline{1,65 \text{ m}}$$

To je extrémní hodnota. Účinné bývají také podíly těchto hodnot. $\lambda/4 = \underline{0,83 \text{ m}}$. $\lambda/8 = 0,41$ m. To jsou stále extrémní hodnoty. Ekonomicky by se to dalo tedy nakonec řešit zvětšením rozestupů mezi hranolky a ušetřený materiál přenést do výšky prvku, avšak zastavěná plocha, která by tímto způsobem narostla, je krajně nežádoucí. Opustil bych proto frekvenci 100 Hz a řešil ji vhodnou instalací basové pasty, i když v tomto případě ne instalací helmholtzova rezonátoru. Řeč bude pravděpodobně bohatě procházet napříč frekvencemi, což je pro rezonátor nežádoucí varianta. Budeme tedy postupovat dále s výpočtem výšky hranolku, s tím že požadovaná hodnota bude z dispozičních i praktických důvodů osmina vlnové délky.

Tab. 11: Navržené délky prvků pro specifický panel po výpočtu.

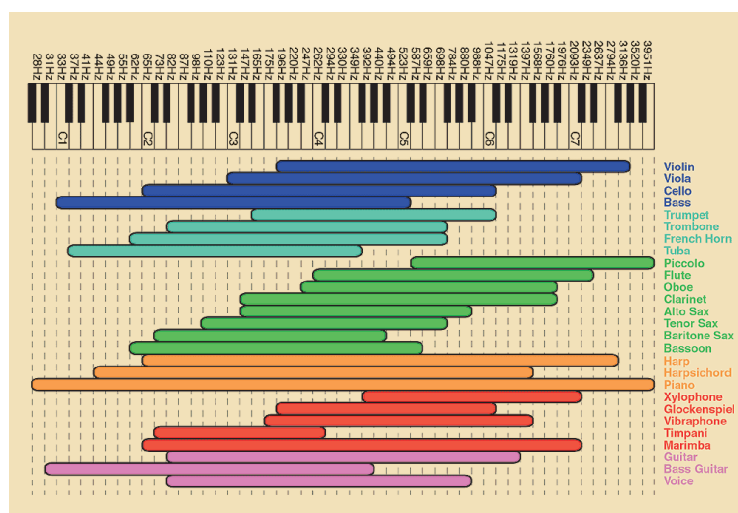
Požadovaná frekvence (Hz)	Vzorec (m,m/s,Hz)	Výpočet	Výsledek (m)	$\lambda/8$ (m)
200	$\lambda = c/f$	$\lambda = 330/200$	1,65	0,206 m
300	$\lambda = c/f$	$\lambda = 330/300$	1,1	0,138 m
400	$\lambda = c/f$	$\lambda = 330/400$	0,825	0,103 m
500	$\lambda = c/f$	$\lambda = 330/500$	0,66	0,08 m

Jsou tedy spočteny hodnoty pro osminu vlnové délky příslušné frekvence. Frekvence však nejsou dány striktně. Hlas se kolem nich bude pohybovat. Jako vstupní délky prvku do konstrukce panelu tedy vezmeme: 20 cm, 15 cm, 10 cm a 5 cm. To vychází na čtyři řady. Duplikovat nějakou řadu smysl nemá, hlas je rozmístěn víceméně rovnoměrně. V kroku 1 pro výpočet rozestupů jsme zjistili, že můžeme bez problému snížit počet řad. Zkonstruujeme tedy čtyřřadý panel s výše zmíněnými rozměry. Zde je bokorys konstrukce.



Obr. 64: Bokorys navržené konstrukce.

A takto by se dalo postupovat při každém individuálním řešení. V následující tabulce je vidět zastoupení nejčastěji používaných nástrojů. Takto se dá vždy snadno zjistit, jaké frekvenční pásmo je nutno pokrýt. Drtivá většina nástrojů leží ve škále 200 – 2000 Hz. Kritická oblast 20 – 34 Hz, která vyšla z analýz panelu jako náchylná k vlastní rezonanci je zastoupena pouze u spodních tónů piana, kytary a kontrbasu.



Obr. 65: Frekvenční rozsah nejběžněji používaných hudebních nástrojů (Escobar a Morillas 2015)

5.5 Montáž

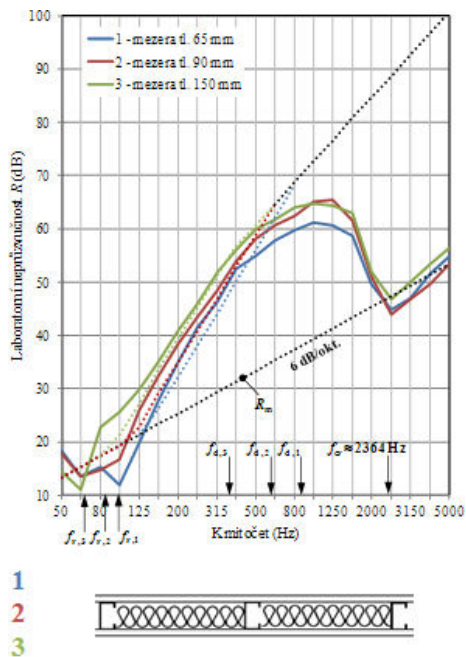
Pokud se budeme bavit o montáži akustického panelu, jsou dvě možnosti, jak instalaci rozdělit.

- Instalace na vodorovnou konstrukci
- Instalace na svislou konstrukci

5.5.1 Instalace na svislou konstrukci

Je samozřejmě několik způsobů, jakým by se dal panel montovat na svislou konstrukci. Mohlo by to být lepení, panel by se taky pomocí hmoždinek mohl chytat přímo to pevné konstrukce. Mně se ovšem nejsympatičtější je následující řešení. Podél stěny by se ve svislém směru a v osové vzdálenosti 500mm umístili dřevěné instalační latě o minimální šířce 50 mm a tloušťce, která by vycházela z požadavků zákazníka.

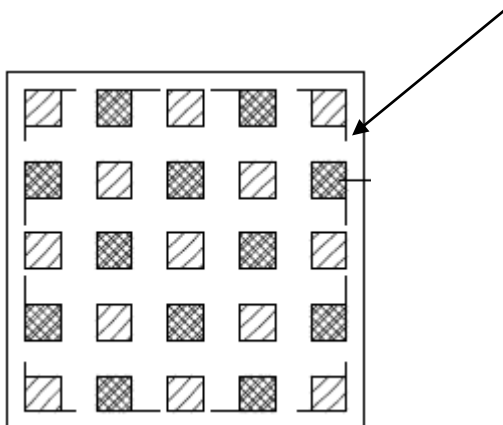
Vzduchová mezera za panelem totiž zvyšuje jeho efektivitu, tudíž se panel stává bez větší námahy účinnějším. Já osobně bych volil klasické řezivo běžně dostupné, tedy coulovou lat' o šířce 50 mm. Jak vidíme na následujícím grafu, navyšování tloušťky vzduchové mezery již takový efekt, jako je její samotná přítomnost, nemá.



Obr. 66: Závislost zvyšování neprůzvučnosti na šířce vzduchové mezery a na frekvenci (Nováček 2015)

Panel je vždy ohraničen 2,5 cm širokou vlnou mezerou z každé strany, která se výborně hodí k provrtání do předem připravené lišty.

Prostor určený k instalaci (25mm)



Obr. 67: Demonstrace instalačního okraje panelu

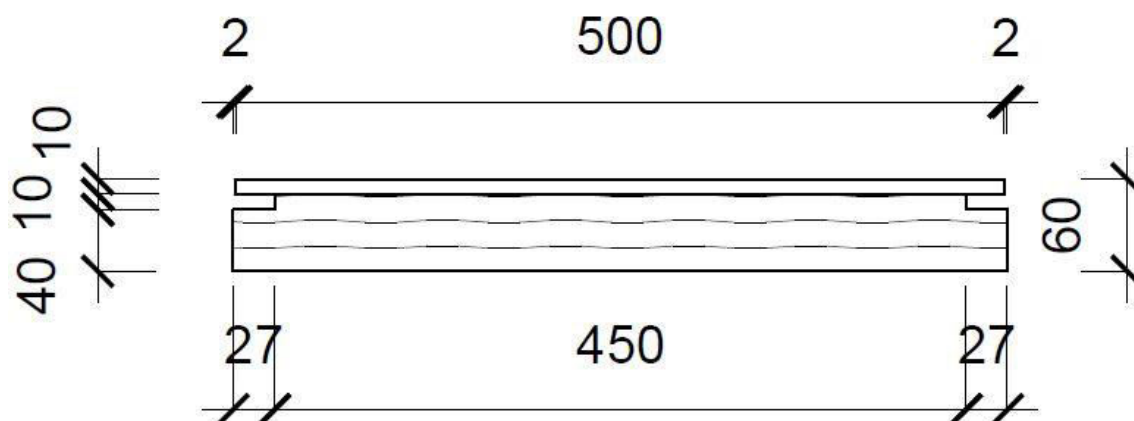
Instalace se doporučuje provrtáním DTD do instalační latě vrutem.

5.5.2 Instalace na vodorovnou konstrukci

Stejné operace prováděné na stropěch trvají obecně déle než na stěnách a jsou pracnější. Montáž akustického panelu na strop by mohla probíhat podobně jako na konstrukci svislé, ale bylo by to a) zdlouhavé, b) můžeme narazit na konstrukční problémy, jako je beton, jenž vše ještě prodlužuje nebo jiné materiály, u nichž by mohlo takto dojít k snadnému poškození.

Doporučuji proto instalaci v podobě sníženého podhledu. Ta zajistí jak rychlou, tak ekonomickou montáž a navíc dojde opět k efektu vzduchové mezery, kterou si můžeme před samotnou instalací pevné kostry promyslet.

Panel varianty A by proto mohl mít ještě svou podvariantu, např.: A_{strop} , která by se však svou konstrukcí musela mírně lišit. Zde je možné řešení:



Obr. 68: Speciální varianta panelu a pro stropy.

Míra přesahu by byla na každé straně vlastně tloušťka profilu $s/2$. V tomto případě 2mm. Je zde také možnost instalovat panely na principu sádkartonového podhledu.

5.6 Náklady

K ceně se bude přistupovat z hlediska instalace svépomocí. Bude tedy uvedena cena čistě za materiál.

Tab. 12: Výpis průměrných cen za materiál.

Materiál	Množství	Cena
DTD 10mm	1m ²	85 Kč
SM hranol 50x50	5m	108 Kč
Lat' 50x25	3m	36 Kč
Vrut do dřeva PZ 3x50	1000 ks	190 Kč
Hmoždinky 8x80	50 ks	117 Kč
Vrutky 3x75	1ks	0,50 Kč

Vrutky 3x75 spolu s hmoždinkami 8x80 slouží k uchycení latě 50x25 do zdiva. Nejsou tedy jako takové součástí panelu, avšak slouží k zprovoznění celé konstrukce, proto je také uvádím.

Tab. 13: Celková cena za materiál nutná k sestavení 1 m² panelu A.

Materiál	Množství	Cena
DTD 10mm	1m ²	85 Kč
SM hranol 50x50	10 000 mm	216 Kč
Lat' 50x25	2000 mm	24 Kč
Vrut do dřeva PZ 3x50	72 ks	14 Kč
Hmoždinky 8x80	6 ks	14 Kč
Vrutky 3x75	6 ks	3 Kč
Panel A celkem	1m²	356 Kč

Pozn.: Latě i hranoly jsou již hoblované.

Tab. 14: Celková cena za materiál nutná k sestavení 1 m² panelu B.

Materiál	Množství	Cena
DTD 10mm	1m ²	85 Kč
SM hranol 50x50	7400 mm	160 Kč
Lat' 50x25	2000 mm	24 Kč
Vrut do dřeva PZ 3x50	112 ks	21 Kč
Hmoždinky 8x80	6 ks	14 Kč
Vruty 3x75	6 ks	3 Kč
Panel B celkem	1m²	307 Kč

Pozn.: Latě i hranoly jsou již hoblované.

Tab. 15: Celková cena za materiál nutná k sestavení 1 m² panelu C.

Materiál	Množství	Cena
DTD 10mm	1m ²	85 Kč
SM hranol 50x50	5600 mm	121 Kč
Lat' 50x25	2000 mm	24 Kč
Vrut do dřeva PZ 3x50	112 ks	21 Kč
Hmoždinky 8x80	6 ks	14 Kč
Vruty 3x75	6 ks	3 Kč
Panel C celkem	1m²	268 Kč

Pozn.: Latě i hranoly jsou již hoblované.

Cena se liší v závislosti na množství potřebného smrkového řeziva, které je u každého panelu jinačí. Panel C je na jeho spotřebu nejméně náročný, tudíž je jeho cena o 88 Kč nižší než u panelu A, který je na spotřebu SM řeziva naopak nejnáročnější. Avšak co se týče pracnosti, je tomu přesně naopak.

5.7 Srovnání cen

Bylo provedeno srovnání za 1 m² akustického panelu s panely běžně dostupnými na trhu.

1. E-shop akusticka-pena.cz nabízí akustickou pěnu s jehlany výšky 7 cm a o hraně základny 2 cm za **419Kč/m²**. Cena montáže není zahrnuta. Jedná se o nejrozšířenější akustickou pěnu na trhu.



Obr.69: Ilustrace jehlancovitého akustického panelu (akusticka-pena.cz).

2. Akustická pěna sinus patří do kategorie nejlevnějších. Např. na hudebním portále kytary.cz je od **250 Kč/m²**. Sám výrobce ji však doporučuje kombinovat s jinými akustickými prvky. Pěna má tloušťku 1 cm u paty sinusoidy a 3 cm v místě amplitudy.



Obr. 70: Ilustrace akustického panelu sinusoidového povrchu (akusticka-pena.cz).

3. Pěnový akustický panel řady Alfa-V slouží především k použití na stropních konstrukcích. Jeho cena začíná na **503 Kč/m²**.



Obr. 71: Ilustrace akustického panelu Alfa-V pro stropní konstrukce (akusticka-pena.cz).

4. Tento děrovaný akustický panel přijde na americkém trhu asi na **115 \$/m²**.



Obr. 72: Ilustrace děrovaného dřevěného akustického panelu (acousticmanufactured.com).

5. Tento stropní panel už vychází na **209 \$/m²**.



Obr. 73: Ilustrace dřevěného stropního akustického panelu (acousticblox.com).

6. Cena tohoto panelu je již na **350 \$/m²**, tedy na dvacetinásobku naší ceny, Samozřejmě, že z designového pohledu jde o kvalitní prvek, avšak základní vlastnost,

tedy různá vzdálenost dřevěného masivního prvku čtvercového průřezu od základny, je tu podobná.



Obr. 74: Ilustrace luxusního dřevěného panelu (myperfectwall.com).

5.8 Expedice, doprava

Stálo by ještě za to prodiskutovat možnosti dopravy. Jsou tady totiž dvě zásadní možnosti jak panel distribuovat:

1. V celku (tj. už sestavený)
2. Na části (tj. hranolky zvlášť, podkladová deska zvlášť)

Já osobně bych preferoval variantu číslo 2. Jednak kvůli ceně, jednak kvůli záruce na nepoškození výrobku, kterou by nebylo snadné při přepravě panelu v celku (tedy variantě číslo 1) zaručit, vždyť jsou prvky montované jen jedním šroubem a zvlášť na delší prvky působí značná páka. Co se týče ceny, ta by narůstala dvojnásobkem. Jednak zvýšeným nárokem na objem dopravy, jednak přidanou cenou za montáž dřevěných prvků. Při větších nárocích na pokrytí plochy v m² už je tato varianta nemyslitelná. Poté by bylo vhodnější (vycházím totiž z toho, že potenciální zákazník se o tuto variantu zajímá buď proto, že nemá čas nebo si jednoduše netroufá) zvolit variantu montáže přímo na určeném místě. To už by samozřejmě vyžadovalo montážní tým lidí. Varianta číslo 2 by byla určena pro lidi rozhodnuté zkonstruovat si akustickou stěnu svépomocí. Z důvodů ušetřit peníze, z důvodů záliby v kutilských činnostech. V tomto případě, který by byl na dopravu, finance i zkoordinování nejméně náročný, by dodání výrobku vypadalo asi takto:

Veškerý materiál, včetně šroubů, včetně podkladových latí (pokud by si je zákazník po konzultaci vyžádal) sloužících k zajištění vzduchové mezery zvyšující účinnost panelu, by byl dodáván. Varianta: tyto šrouby doporučujeme, seženete v každém železářství, se mi nelíbí. Hranolky by byly rozděleny podle výšek jednotlivě.

Nejdůležitější součástí by v tomto ohledu však byla podkladová deska. Je totiž věci hodnou diskuse pobavit se o tom, zda by zákazník montující svépomocí rozměřoval distance mezi prvky sám a sám si také hlídal jejich hodnoty pomocí přiloženého manuálu nebo by mu bylo usnadněno smontovat panel jinak, než za pomoci vlastního rozměrování. Šikovnou pomůckou by mohla být plechová šablona o rozměrech 50 x 50 cm, která by měla vyvrtanou vždy díru v místě budoucího umístění šroubu, kde by si zákazník jednoduše skrz šablonu lihovou fixou označil body a pomocí manuálu přiřadil k tečkám jednotlivé prvky či by čísla výšek prvků byla již rovnou naznačena na šabloně. Navíc určitá drobná nejistota kam daný prvek umístit by byla u prvních tří panelů, pak už by nebylo co řešit. Šablona by také obsahovala čerchované děrování po obvodu, jako označení okraje pro instalaci a v případě kombinovaného systému, by byly dodány např. dva či více druhů šablon.

Další možnost by byla předem předtisknout tvar (tedy čtverec) na příslušné místo, ve čtverci by byl zapsán údaj o výšce prvku a natisknout okraje. To by bylo pravděpodobně nejpohodlnější řešení, avšak vzniká nám tím nárok na zhotovení tiskárny.

6 Závěr

Byl sestaven numerický model tří dřevěných akustických panelů v programu ANSYS. Byla provedena modální a harmonická analýza chování těchto tří panelů. Následně byly zhotoveny funkční vzorky panelů a byly diskutovány možnosti efektivity, customizace, distribuce, instalace, nákladů, aj. Hlavními závěry plynoucími z práce jsou:

1. Po provedení modální analýzy bylo zjištěno, že panely jsou k vlastním kmitům nejnáchylnější v nízkých frekvencích a to mezi 20 – 34 Hz. Další frekvence už na vlastní kmity nepůsobí tolik a je třeba uvažovat naopak spíše nad tím, pro jaké frekvenční pásmo se panel hodí, než pro jaké se nehodí.
2. Harmonická analýza potvrdila výsledky analýzy modální, tedy že největší amplitudy dosáhnou body panelu ve frekvenčním pásmu 20 – 34 Hz. Amplituda bodů se bude snižovat směrem od středu k vetknutým okrajům. Nad 1000 Hz už vlastní kmity u panelů ustaly, pouze panel C, díky prvku $h = 3$ cm, vykazoval ještě nepatrnou aktivitu.
3. Ze vztahu $\lambda = c/f$ vyplývá, že panely budou nejlépe fungovat ve frekvenční škále 1650 – 5550 Hz, avšak kolem frekvence 3300 Hz dojde k určité interferenci.
4. Panel se dá sestavovat variabilně a přizpůsobit vždy požadavkům na vlastnosti, vyplývající z frekvenčního pásma, které se bude v daném prostředí vyskytovat.

7 Summary

It was solved, by using modal analysis, that problematic frequency range is between 20 – 30 Hz, due to own resonance of panels. Higher frequencies don't have so big influence to the resonance of panels. More important is to think about for which frequency range we can you each other panel. For wich frequency range every panel fits.

Harmonic analysis validates informations obtained in harmonic analysis: low frwquencies (20-34 Hz) have the biggest influence to the own resonance of panels. Aplitude is highest in the middle of the panel and deacrees from the middle to the edge. In frequencies higher than 1000 Hz panels lost their resonance activity – only panel C had some kind of activity – due to wooden sample with height 3 cm.

From the equation $\lambda = c/f$ we can find out, that the biggest effect of panels is in range 1650 – 5550 Hz, but around frequency 3300 Hz, there could be some interference.

Panels are generally very variable and can be compiled according to the requirements of customers or according to requirements of room.

Panels are easy to produce and their price is less then other panels, normally available in the shops. In compare with wooden panels, price is even ten times lower.

Purpose of panels is not to mute the sound, it's not to improve acoustic insulation between two flats or whatever. Its meaning is to scatter sound waves, improve reverberation - it means improve intelligibility and create confortable place, where its pleasure to work with the sound.

8 Seznam literatury

- BUCUR, V., 1995. Acoustics of wood. Boca Raton: CRC Press. ISBN 0-8493-4801-3.
- ESCOBAR, V., MORILLAS, J. M. B., 2015. Analysis of intelligibility and reverberation time recommendations in educational rooms. *Applied Acoustics*, 96. 1-10
- HEEREMA, N., HODGSON, M., 1997. Empirical models for predicting noise levels, reverberation times in industrial workrooms. *Applied Acoustics*, 57 (1). 51-60
- HORÁČEK, P., 2001. Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva, Brno, Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 124 s.
- KAŇKA, J., 2009. Akustika stavebních objektů. 1. vyd. Brno: ERA. 145 s. ISBN 978-80-7366-140-3
- KOHNKE, P., 1999. ANSYS Theory Reference: Release 5.6. Canonbury, PA, USA, ANSYS, Inc., 1285 s.
- KRÁLÍK, J. 2009. Modelovanie konštrukcií v metodě konečných prvků: Systém ANSYS, citováno 10.4.2015. Dostupné z : <<http://mpm.suf.stuba.sk/xtunega/mkp.pdf>>
- LEE, H., SAKUMA, T., 2015. Numerical characterization of acoustic scattering coefficients of one-dimensional periodic surfaces. *Applied Acoustics*, 56. 129-136
- MEISSNER, M., 2008. Influence of wall absorption on low-frequency dependence of reverberation time in room of irregular shape. *Applied Acoustics*, 69 (7). 583-590
- NOVÁČEK, J., Vzduchová neprůzvučnost stavebních prvků na bázi dřeva (online) citované 15.4.2015. Dostupné z WWW: <http://stavba.tzb-info.cz/akustika-staveb/12436-vzduchova-nepruzvucnost-stavebnich-prvku-na-bazi-dreva>
- RICHOU, O., LOMBARD, B., MERCIER, J. F., 2015. Generation of acoustic solitary waves in a lattice of Helmholtz resonators. *Wave Motion*, 56. 85-99
- WATSON, B. C., 2013. Effect of Fundamental Frequency at Voice Onset on Vocal Attack Time. *Journal Of Voice*, 27 (3). 273-277

9 Přílohy

Kolony s plnou výplní a silným ohraničením jsou povinné. Kolony bez výplně se silným ohraničením jsou povinné u publikace/výsledku, který jde do RIV (má vztah k akci v CEP, CEZ nebo SV, více na <http://www.vvvs.cvut.cz/publikace/RIV.html>).

1. Základní údaje o publikaci

Jazyk v originále	Čeština	
Název	v originále	Akustický dřevěný panel
	v angličtině	Wooden acoustic panel
	v češtině	

Anotace - maximální povolená délka je 1000 znaků. Pokud je jazykem publikace angličtina, stačí uvést název a anotaci pouze v originále. Název a anotace v češtině jsou povinné údaje pouze u cizojazyčných publikací, které jdou do RIV (viz. výše).

Autoři	Příjmení	Jméno	Katedra	Podíl v %
1	Dostál	Jan		50%
2	Tippner	Jan	ÚNOD	50%

a - vyplňte číslo katedry (odboru, střediska). U autorů, kteří nejsou zaměstnanci nebo studenti PGS, nevyplňujte.

Podíl v % - uveďte podíl práce každého autora. Součet podílů musí být 100%. Případně další autory uveďte na druhé straně.

2. Vlastník produktu

Název organizace (vlastníka)	Sídlo vlastníka	Stát vlastníka	Rok dokončení	Interní identifikace
Jan Dostál	Loštice	ČR	2016	Akustický ježek

Interní identifikace - označení produktu vlastníkem.

3. Popis produktu

Umístění	Technické parametry	Ekonomické parametry	Licence	Poplatek	Náklady
Dílna	Produkt na bázi dřeva Velikost 500x500mm Způsob instalace: montáž	Průměrná cena za m ² : 235Kč	3	3	1

Umístění - např. knihovna, webová stránka apod. **Technické parametry** - tech. param. charakterizující výstup (např. velikost, typ instalace, prog. jazyk, platforma apod.). **Ekonomické parametry** - ekon. param. charakterizující výstup (např. cena, export apod.)

Licence - uveďte jednu z možností využití výsledku jiným subjektem: **1**-vždy nutné nabytí licence, **2**-bez nabytí licence, **3**-v některých případech možné bez nabytí licence. **Poplatek** – uveďte jednu z možností požadavku poskytovatele licence na licenční poplatek: **1**-požaduje, **2**-nepožaduje, **3**-v některých případech nepožaduje. **Náklady** - výše vyčerpané části z celkových uznaných nákladů na dosažení výsledku: **1** - do 5 mil. Kč, **2** - 5 až 10 mil. Kč, **3** - 10 až 50 mil. Kč, **4** - 50 až 100 mil. Kč, **5** - nad 100 mil. Kč.

4. Vztah publikace k výzkumným oborům

Hlavní obor: Vedlejší obor:

Vyberte 1-2 obory z číselníku RVV, který je vystaven na http://vvvs.cvut.cz/publikace/vyzkumne_obory.html#RVV.

5. Vztah publikace k akcím

Typ vztahu	Typ akce	Název akce (uveďte alespoň část jejího názvu)	Interní číslo akce

Typ vztahu - uveďte jednu možnost: **1** - vznikla v rámci, **2** - financována z, **3** - podkladem pro, **4** - podkladem pro výzk. záměr.

Typ akce - uveďte jednu z možností: **PRJ** - grant, **VZS** - výzkumný záměr, **SV** - specifický výzkum.

Název akce - v případě volby **SV** nevyplňuje. **Interní číslo akce** - uveďte v případě, že jej znáte.

6. Klíčová slova anglicky

Reverberation	Acousticofwo d	Speechtransmission index		
---------------	-------------------	-----------------------------	--	--

Klíčová slova anglicky - může se vložit i sousloví (např. technický výraz). Doporučuje se vyplnit více než jen jednu kolonku.