



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

## INOVACE BARVY MARIMBY POMOCÍ NOVÝCH KAMENŮ, REZONÁTORŮ A PŘIDÁNÍM VIRTUÁLNÍCH REJSTŘÍKŮ

THE INNOVATION OF MARIMBA TIMBRE USING NEW BARS, RESONATORS, AND ADDING VIRTUAL  
REGISTERS

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Patrik Nop

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

MgA. Mgr. Ondřej Jirásek, Ph.D.

BRNO 2019





# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Audio inženýrství**

Ústav telekomunikací

**Student:** Bc. Patrik Nop

**ID:** 162421

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2018/19

**NÁZEV TÉMATU:**

## **Inovace barvy marimby pomocí nových kamenů, rezonátorů a přidáním virtuálních rejstříků**

### **POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

Student změří a porovná spektra kamenů z různého materiálu - z různě těžkého dřeva, případně z polymerů i z kombinovaných materiálů a to s různým klenutím či tloušťkou kamenů. Provede změření Youngova modulu pružnosti, akustické konstanty. Identifikuje na kamenech pomocí Chladniho obrazců uzly a kmitny, a to jak podélných, torzních i laterárních módu. Vyhodnotí, jak se na barvě podílí různé místo, kde udeří palička. Vyhodnotí souvislosti mezi mechanickými vlastnostmi - hustotou, tloušťkou, klenutím a módy kamenu a mezi jeho akustickými vlastnostmi. Zvláště se bude soustředit na typy inharmonicit ve spektru.

Dále navrhne a ozkouší nejméně tři rezonátory s různým průměrem či vstupní plochou i s odlišným objemem. Rezonancí se bude snažit posílit ty složky ve spektru, které zpevní a vylepší marimbovou barvu. Pomocí aditivní syntézy navrhne takové virtuální rejstříky, které mohou být elektronicky hrány současně s přirozenými zvuky kamenů a vhodně témbra marimby doplní.

### **DOPORUČENÁ LITERATURA:**

[1] KOENING, D. Spectral Analysis of Musical Sounds with Emphasis on the Piano, Oxford University Press; 1 edition (January 13, 2015), ISBN-10: 0198722907, ISBN-13: 978-0198722908

[2] SYROVÝ, V. Hudební akustika. Praha: AMU, 2003. ISBN 978-80-7331-127-8.

**Termín zadání:** 1.2.2019

**Termín odevzdání:** 16.5.2019

**Vedoucí práce:** MgA. Mgr. Ondřej Jirásek, Ph.D.

**Konzultant:**

**prof. Ing. Jiří Mišurec, CSc.**  
*předseda oborové rady*

### **UPOZORNĚNÍ:**

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.



## **Abstrakt**

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na vhodnou inovaci hudebního nástroje marimby. Zvolený problém byl ověřen třemi možnostmi: novými kameny, novými rezonátory, virtuálními rejstříky. Práce poskytuje rozbor celé problematiky, s ověřením některých vzorků a jejich zařazením či vyloučením pro další využití v dané oblasti.

## **Klíčová slova**

Marimba, inovace hudebního nástroje, marimbové kameny, ladění marimbových kamenů, marimbové rezonátory, aditivní syntéza, lignamon,

## **Abstract**

This diploma thesis focuses on suitable innovation of musical instrument marimba. The chosen problem has been verified by three options: new bars, new resonators, virtual registers. The work provides an analysis of the whole issue with verification of some samples and their inclusion or exclusion for further use in the research.

## **Key words**

Marimba, innovation of musical instrument, marimba bars, tuning a marimba bars, marimba resonators, additive synthesis, lignamon



### **Bibliografická citace:**

NOP, Patrik. *Inovace barvy marimby pomocí nových kamenů, rezonátorů a přidáním virtuálních rejstříků* [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/118153>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce Ondřej Jirásek.





## **Prohlášení autora o původnosti díla**

„Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci na téma Inovace barvy marimby pomocí nových kamenů, rezonátorů a přidáním virtuálních rejstříků vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.”

V Brně dne: 16. 5. 2019

.....  
Bc. Nop Patrik



## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce MgA. Mgr. Ondřeji Jiráskovi, Ph.D. za cenné rady, připomínky a metodické vedení práce. Dále pak Ing. Janu Tippnerovi, Ph.D. a Ing. Janu Baarovi, Ph.D. za konzultace, vstřícnost a umožnění laboratorního zpracování vzorků. Obrovský dík patří Bc. Klárce Hyspecké za vše, hlavně za trpělivost. V neposlední řadě děkuji svým rodičům, kteří mne po celou dobu studia podporovali.



# Obsah

1 ÚVOD .....	15
2 MARIMBA .....	16
3 VZNIK A VÝVOJ XYLOFONU / MARIMBY .....	17
3.1 Rozdíly mezi xylofonem a marimbou .....	18
3.2 Části nástroje .....	19
3.2.1 Kameny .....	19
3.2.1.1 Ladění kamene .....	20
3.2.1.2 Určování uzlů a kmiten pomocí Chladniho obrazců .....	23
3.2.2 Rezonátory .....	27
3.2.3 Rám .....	29
3.2.4 Paličky .....	29
4 VLASTNOSTI MATERIÁLŮ .....	31
4.1 Viskoelastická materiálu .....	31
4.1.1 Elastické materiály .....	31
4.1.2 Viskózní materiály .....	32
4.1.3 Viskoelastické materiály .....	32
5 DŘEVO .....	35
5.1 Charakteristika dřeva .....	35
5.1.1 Hustota .....	36
5.1.1.1 Lignamon .....	37
5.1.2 Akustické vlastnosti dřeva .....	37
6 INOVACE NÁSTROJE .....	39
6.1 Nové materiály .....	39
6.2 Elektrifikace .....	40
7 ADITIVNÍ SYNTÉZA .....	42
8 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....	44
8.1 Kameny .....	44
8.1.1 Vybroušené kameny .....	45
8.1.1.1 Chladniho obrazce .....	53
8.1.2 Kameny konstantního průřezu .....	55
8.1.3 Ladění kamenů .....	56
8.2 Rezonátory .....	60
9 DISKUSE .....	65
9.1 Kameny .....	65
9.1.1 Vybroušené kameny .....	65
9.1.2 Kameny konstantního průřezu .....	65
9.1.3 Ladění kamenů .....	66
9.2 Rezonátory .....	68
9.3 Inovace .....	69
10 ZÁVĚR .....	71
11 SEZNAM LITERATURY .....	72
12 SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK .....	73
13 SEZNAM OBRÁZKŮ .....	74
14 SEZNAM TABULEK .....	77
15 SEZNAM PŘÍLOH NA CD .....	78



# 1 ÚVOD

Z hlediska studia akustických vlastností, je jednoznačně jedním z nejzajímavějších materiálů dřevo. Pro jeho jedinečnou charakteristiku vždy bylo a stále je nejvyužívanějším materiálem pro výrobu hudebních nástrojů, jejich příslušenství (smyčce, paličky), pro stavbu reproduktorů či jako akustický prvek ve stavebnictví. S rozšiřujícími se znalostmi materiálů a vývojem technologií již lze u dřeva změřit a pojmenovat širokou škálu vlastností a parametrů (tvrdost, pružnost, pevnost, houževnatost, několik druhů textury a barvy, stáří, vlhkost, hustotu, souměrnost, vady). Při hledání vhodného dřeva pro hudební nástroj pak lze objektivně vyhodnotit vliv těchto změřitelných parametrů na akustické vlastnosti.

S úbytkem kvalitního dřeva a nepravděpodobností výskytu nového, je nezbytné hledat nové zdroje s podobnými rysy.

Předkládaná práce se zabývá možností inovace barvy zvuku hudebního nástroje marimby pomocí kamenů z jiného, než původního tropického dřeva, dále pak pomocí rezonátorů odlišných materiálů a za přidání rozlišných ucpávek, a v neposlední řadě pomocí doplnění a obohacení původního i nového zvuku virtuálními rejstříky.

## 2 MARIMBA

Zvuk je mechanický pohyb částic hmotného prostředí, kdy si sousedící částice předávají kinetickou energii a jsou vychýleny z rovnovážné polohy. Vzniká kmitání, přesněji zhuštění a zředění částic v daném místě, které postupuje prostředím dále od místa vzniku, tedy zdroje zvuku. Tento jev se nazývá zvuková vlna. Ta za jednu periodu kmitání urazí určitou vzdálenost, vlnovou délku  $\lambda$  definovanou vztahem (1): [13]

$$\lambda = cT = \frac{c}{f} = 2\pi \frac{c}{\omega} \quad [\text{m}], \quad (1)$$

kde  $c$  je rychlost šíření zvuku v prostředí,  $f$  frekvence,  $T$  perioda a  $\omega$  úhlová frekvence.

Marimba je hudební nástroj řadící se do skupiny idiofonů nebo též samozvучných. Sestává z dřevěných desek, zvaných kameny, vzájemně odlišných co do délky, tloušťky a naladění.

U této skupiny nástrojů je zvuk vyzařován deskou, trubicí nebo tyčí (to lze chápat i jako kmitání samotných nástrojů), na rozdíl od ostatních skupin nástrojů, kde zvuk vzniká kmitáním membrány (Membranofony), strun (Chordofony) či vzduchového sloupce (Aerofony). Tento kmitající prvek nástroje se nazývá oscilátor. U idiofonů vznikají kmity ohybové, podélné a torzní. Idiofony se vyrábí převážně z tvrdých, avšak pružných materiálů. Idiofony jsou nejčastěji dřevěné, známé i jako xylofonní (xylo/xylém, z řeckého xylon, dřevěný) a kovové, metalofonní, ale mohou být i kamenné či skleněné.

Většina idiofonů se řadí mezi bicí nástroje. Tyto lze dále dělit na nástroje s určitou výškou tónu nebo neurčitou výškou zvuku. Marimba patří k nástrojům s určitou výškou tónu. Dále se idiofonické bicí nástroje dělí podle excitátoru, tedy podle budícího mechanismu (generátor energie kmitů). U marimby jsou excitátorem paličky.

Dalším nástrojovým prvkem marimby je rezonátor. Ten zesiluje kmity a vyzařuje akustický výkon do prostoru. Většinou zesiluje jen úzké kmitočtové pásmo a při větším počtu rezonátorů bývá zaměřen jeden rezonátor na jeden tón.

V současnosti je uváděno, že marimba spadá do skupiny xylofonů a řadí se mezi další nástroje z xylofonu odvozené. V dalších kapitolách bude uvedena podrobnější definice. [2, 3, 4, 5, 9, 13]



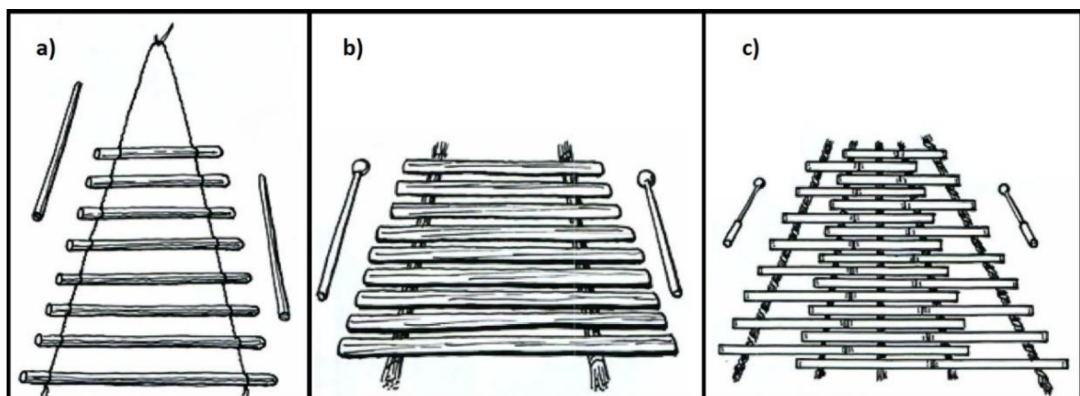
### 3 VZNIK A VÝVOJ XYLOFONU / MARIMBY

Marimba je velmi podobná xylofonu, z jehož podstaty a stejného principu vychází. V mnoha ohledech se tak těžko rozlišují a často i bývají, obzvláště v souvislostech historického vývoje, definovány jen pod názvem xylofon či jen pod názvem marimba. Pro základní historické rozdělení postačí, že nástroje xylofon i marimba vznikaly současně, byly v podstatě totožné a jejich název souvisí převážně s geo-lingvistickým původem. Historické prameny, zabývající se vznikem těchto dvou nástrojů, příliš nerozlišují jejich různé typy.

Xylofon ve své primitivní formě pravděpodobně vznikl na území dnešní Afriky a Asie, avšak vzhledem k jeho principu v různých formách vznikl na všech kontinentech a dodnes se v těchto původních formách i uchoval. Šlo o jeden z prvních, člověkem vytvořených melodických nástrojů. V průběhu svého vývoje byl samozřejmě ovlivněn rozvojem různých kultur. První zmínky o jeho existenci v Evropě pochází z konce 15. století (Schlick, A. Spiegel der Orgelmacher und Organisten (1511)). Začátkem 16. století byl dovezen na pobřeží Střední a Jižní Ameriky, a to pravděpodobně africkými otroky, kteří zde působili, spolu s indiány, jako základní pracovní síla. Odtud se pak rozšířil a uchytil především v Mexickém Chiapasu, Guatemale, Nikaragui, a Kostarice.

Býval na provazech zavěšený kolem krku, na rámu položený přes natažené nohy sedícího hráče, o různém počtu kamenů, bez rezonátoru nebo s rezonátory z tykví či bambusu. Název marimba je nejspíše odvozen z afrického jazyka Bantú, kde RIMBA znamená: „*plochý objekt vyčnívá*“, vztaženo k notám či tónům a MA je kumulativní předpona. Tedy velmi volně přeloženo: mnoho tónů vycházejících z plochých destiček. V Guatemale slovo marimba znamená: „*dřevo, které zpívá*”.

Název xylofon, z řeckého xylófonon = zvučící dřevo, je v Evropě používán přibližně od roku 1810. V českých zemích znám i pod názvy slamozvuk, slaměné housle, dřevozvuk, dřevohra, dřevěná harmonika či negerský klavír.



Obr. 1: Historický vývoj: a) Xylofon z různě dlouhých dřevěných tyček zavěšených na provázku. b) Jednořadový lidový xylofon. c) Jednoduchý xylofon profesionální výroby z konce 19. století [3]

*„Slamozvuk, Holzharmonika, Strohfiedel prostý hudební nástroj: dřevěné hůlky či špalíčky různé velikosti a dle výšky tónů seřazené jsou volně položeny na dvou slaměných provázcích. Na špalíčky se bije dřevěnýma paličkama. Tón nástroje toho, zvláště u slovanských národův oblíbeného, jest zvonkovitý.“*

Malát, J. Hudební slovník (1891) [3]

Až do konce 18. století byl lidovým nástrojem potulných muzikantů v oblasti mezi Uralem, Karpaty a Baltským mořem a do střední a západní Evropy pronikal jen zřídka.

První záznam o úpravě a vylepšení nástroje patří J. M. Gusikovi, který roku 1830 zdokonalil systém podložení kamenů. Poté byl xylofon zařazen do instrumentálních ansámbľů a později, v druhé polovině 19. století, i do symfonických orchestrů. O to se zasloužil především Clair Omar Musser, který v Chicagu, v roce 1933, zorganizoval speciální představení, stávající z orchestru sta marimb, později sta padesáti (1941), dvou set (1949) a nakonec až tří set (1950), se kterým absolvoval i turné po Evropě.

Podstatné je uvést, že historické prameny, zabývající se vznikem těchto nástrojů, příliš nerozlišují různé typy xylofonu či marimb. Pro určení hlavního rozdílu mezi xylofonem a marimbou je potřeba zmínit jejich zvuk.[1, 2, 3, 4, 5]

### 3.1 Rozdíly mezi xylofonem a marimbou

Marimba i xylofon jsou oba vyrobeny z dřevěných kamenů a fungují na stejném principu. Přesto mají zvukově jiný charakter. Odlišnost je částečně způsobena rozdílným laděním harmonické řady tónu. Zatímco xylofon dává vyniknout lichým harmonickým frekvencím, tak marimba má spektrum tónu naladěné na sudé harmonické (jinou definici v tomto ohledu mohou způsobovat odlišnosti Evropského standardu a standardu USA). Kromě toho jsou xylofonové kameny o něco tlustší, jiného tvaru oblouku ve spodní straně a hraje se na ně tvrdšími paličkami, čímž vydávají ostřejší tón.

Dalším rozdílem mezi xylofonem a marimbou je počet kamenů, tedy tónový rozsah. Xylofon má nejčastěji rozsah tři a půl oktávy ( $F_3 - C_7$ , 174,6 – 2093 Hz), zatímco koncertní marimba má i přes čtyři oktávy ( $A_2 - C_7$ , 110 – 2093 Hz). Existuje i xyloimba, vzniknuvší kombinací předchozích dvou, s rozsahem až pěti oktáv ( $C_3 - C_8$ , 130,8 – 4186 Hz) či basová marimba ( $C_2 - C_7$ , 65 – 2093 Hz).

Dále lze uvést, že oproti xylofonu je zvuk marimby obecně hlubší a na spektrum bohatší, což souvisí s tvarem kamenů i s použitím delších rezonátorů. [2, 10,12]

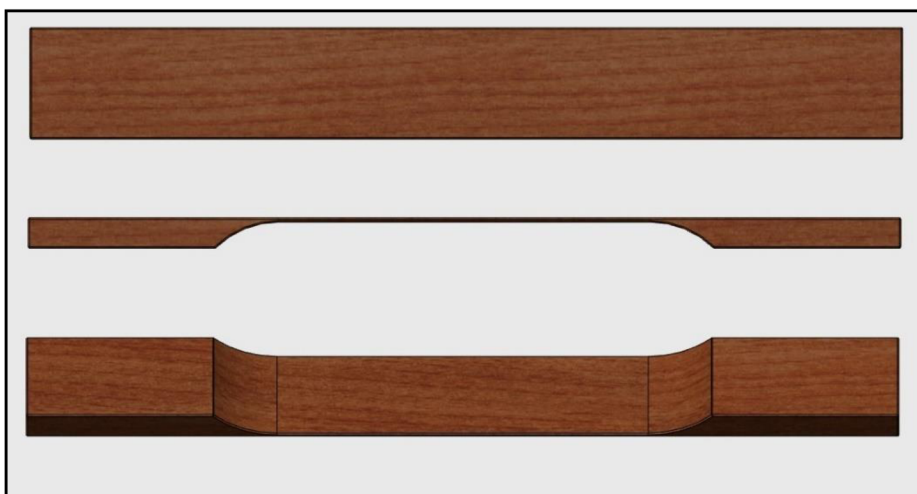


Obr. 2: a) xylofon b) marimba [15]

## 3.2 Části nástroje

### 3.2.1 Kameny

Kameny jsou myšleny dřevěné destičky či bloky různých rozměrů seřazené podle délky v klaviaturním uspořádání. Dříve zavěšeny například na sřevové struně, dnes jsou navlečeny na bavlněném provázku. Pokud nejsou provlečeny, mohou být i jen volně položeny. Dříve ležely podložené slaměnými provazci, dnes na trojhranných gumových podložkách na dřevěných pražcích.



Obr. 3: Model kamene

V Evropě bývaly vyráběny ze dřeva smrkového, borového, jedlového, javorového, ořechového, celosvětově však nejčastěji z palisandru, padouku afrického, růžového dřeva či z mahagonu. V současnosti se experimentuje i s kameny ze syntetických materiálů, jako jsou acoustalon, kelon či zelon. Takové materiály jsou sice mechanicky odolné, ale jejich akustické vlastnosti zatím neodpovídají požadavkům na marimbové kameny, především kvůli době dozvuku a nevyhovující barvě zvuku. Na výslednou barvu zvuku má podstatný vliv hustota materiálu. Stejně tak má na barvu výsledného tónu vliv délka, šířka, tloušťka a hlavně tvar kamene. A právě barva tónů je faktor, který určuje charakteristický zvuk jednotlivých nástrojů. [1, 2, 3, 11]

### 3.2.1.1 Ladění kamene

Tóny jsou vnímány subjektivně, avšak objektivními metodami lze určit jisté vlastnosti, které pak slouží k jejich vyhodnocení. Frekvence (výška tónu), hladina akustického tlaku (hlasitost), doba trvání (délka), tvar vlnění (barva).

Vyjma okaríny, jejíž tón se blíží sinusovému tvaru signálu, tedy jednoduchému tónu o jedné frekvenci, všechny ostatní nástroje produkují složené tóny. Složeným tónům se také říká barva tónu neboli témbra, jsou charakteristické pro jednotlivé nástroje a díky nim lze sluchem rozlišit různé nástroje hrající zároveň jeden tón. Složené tóny obsahují součet řady frekvencí, jež jsou zpravidla celým násobkem základní frekvence neboli fundamentu. U složených tónů lze stále subjektivně určit jejich výšku, protože fundament má obvykle největší amplitudu, trvá nejdéle a tím je nejvýraznější z celé frekvenční řady. Fundament je tedy určující frekvencí pro tón a jeho pojmenování.

Pro ladění nástrojů se využívá přirozené ladění, které odpovídá násobkům celých čísel, nebo plně temperované ladění, jež je sice matematicky správné, ale neshoduje se s reálným chováním nástrojů. Výsledně jsou pak některé intervaly čisté a některé temperované.

Obecně platí, že se přirozené chování nástroje (vyšší harmonické, flažolety, přefukování) projevuje v přirozeném ladění, kde například kvinta =  $3/2 = 1,5$  a že se mechanické určení frekvencí (délky píšťal, pražce, klapky) provádí v temperovaném ladění, kde kvinta = 1,4983. Z toho plyne závěr, že drtivá většina nástrojů není a ani nemůže být naladěna ve všech vznikajících frekvencích v jednom ladění a jedná se spíše o kompromis. Prakticky je tento problém vyřešen laděním fundamentů jednotlivých tónů vůči sobě rovnoměrným temperovaným laděním. To zachovává čistý interval oktávy, rozdělený na 12 stejných půltónů. Protože oktáva je dvojnásobek frekvence, je frekvenční poměr půltónu vyjádřen jako:

$$x = \sqrt[12]{2} = 1.05946309. \quad (2)$$

Detailnější vyjádření vzdáleností mezi tóny se využívají centy, kdy je oktáva rozdělena na 1200 centů, půltón na 100 centů.

Rovnoměrným temperovaným laděním vznikají frekvenční odchylky od přirozeného ladění, což může vést k nesouzvuku různých nástrojů v některých polohách, a to i přes to, že se společně naladili podle stejného tónu, nejčastěji  $a_1 = 440\text{Hz}$ .

Abychom získali kámen naladěný na daný tón, přesněji fundament, musí splňovat jisté požadavky, případně musí být upraven dalšími metodami. U kamene marimby lze vycházet z diferenciální vlnové rovnice, určující ohybový (příčný) tvar jeho kmitů.

$$\frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} + \frac{EI}{\rho S} \frac{\partial^4 \eta}{\partial x^4} = 0, \quad (3)$$

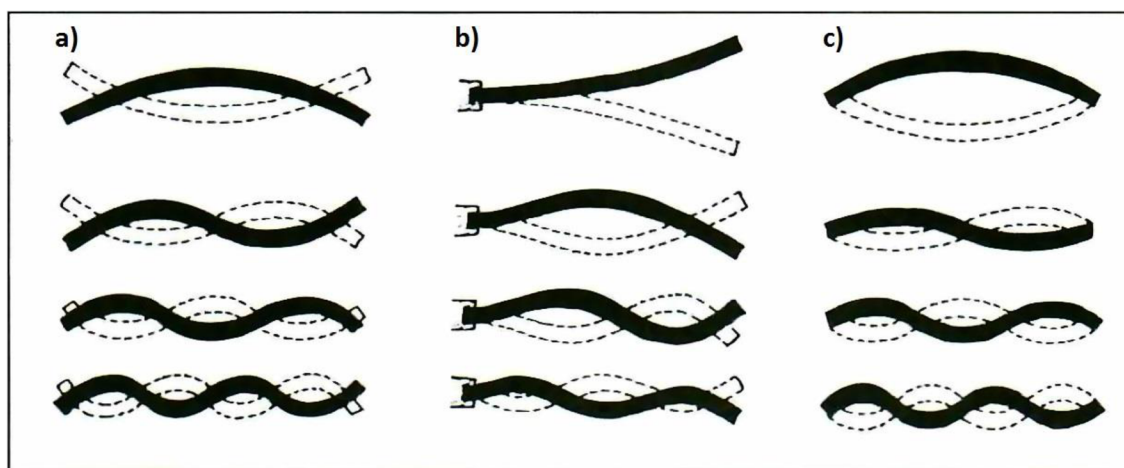
kde  $\eta$  je příčná výchylka uvažovaného bodu tyče ve vzdálenosti  $x$ ,  $E$  Youngův modul pružnosti (kapitola 3.1.3),  $I$  kvadratický moment průřezu,  $\rho$  hustota materiálu a  $S$  plocha průřezu tyče. [7]

Řešením pak dospějeme k výrazu:

$$\eta_1 = A \cosh \frac{\omega x}{c_{oh}} + B \sinh \frac{\omega x}{c_{oh}} + C \cos \frac{\omega x}{c_{oh}} + D \sin \frac{\omega x}{c_{oh}}, \quad (4)$$

kde  $\eta_1$  je amplituda kmitů ( $\eta = \eta_1 e^{j\omega t}$ ),  $c_{oh} = \sqrt{\omega I c_L}$  rychlost ohybových vln a  $c_L$  rychlost podélných vln. [7]

Idiofony mohou mít různé upevnění oscilátorů.



Obr. 4. Upevnění oscilátorů idiofonů: a) na obou koncích volně uložené, b) na jedné straně připevněné, c) na obou koncích volně podepřené [7]

V případě marimby lze vycházet z modelu tyče na obou koncích volně uložené, jež určuje konstantu  $K=3,5607$  v rovnici pro výpočet fundamentu. [7]

$$f_1 = K \frac{I}{L^2} c_L [\text{Hz}], \quad (5)$$

kde  $L$  je délka tyče,  $I$  kvadratický moment průřezu a  $c_L$  rychlost podélných vln.

Kromě hlavních a nejčastějších ohybových (příčných) kmitů vznikají oscilací kamene, přesněji dřeva obecně, také podélné a torzní kmity. Tyto kmity jsou popsány vlnovou rovnicí

$$\frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 \zeta}{\partial x^2}, \quad (6)$$

kde  $\zeta$  je deformace a  $c$  rychlost šíření vln. [7]

Rovnice, určující frekvenci  $f_n$   $n$ -tého rezonančního módu, vychází z teorie kmitající desky tvaru kvádrů, která je na obou koncích volná. [10, 16]

$$f_n = \frac{\pi \cdot t \cdot c_L}{8 \cdot \sqrt{12} \cdot L^2} m^2 [\text{Hz}], \quad (7)$$

kde  $t$  je tloušťka desky,  $c_L$  rychlost šíření podélných vln,  $L$  délka tyče. Konstanta  $m$  nabývá hodnot:  $m = 3,0112$  pro  $n = 1$ ,  $m = 5$  pro  $n = 2$ ,  $m = 7$  pro  $n = 3$  a dále podle  $m = (2n + 1)$ .

Tyto hodnoty jsou odvozené z poměru frekvencí rezonančních módů kvádrů. Oproti poměrům vyšších harmonických frekvencí většiny hudebních nástrojů jsou poměry kmitající desky inharmonické, takže neplatí že:  $f_2 = 2f_1$  a  $f_3 = 3f_1$ , ale:

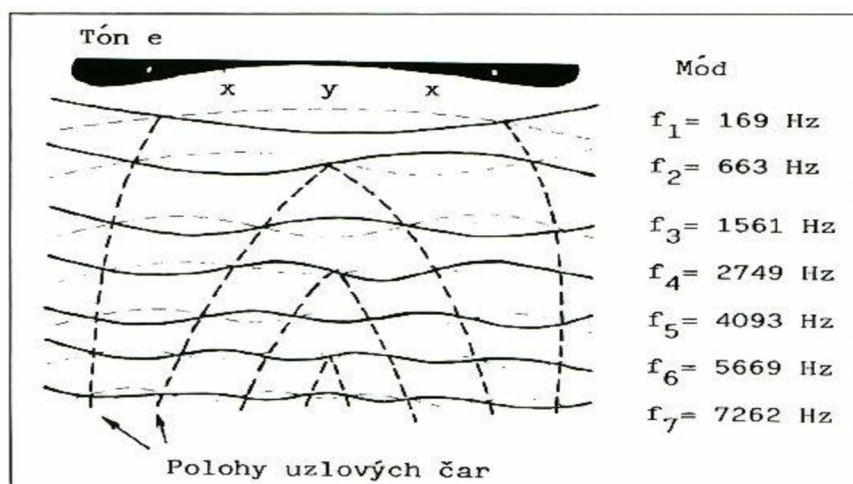
$$\frac{f_2}{f_1} = 2,76 = \frac{5^2}{3,0112^2} \text{ a } \frac{f_3}{f_1} = 5,40 = \frac{7^2}{3,0112^2}.$$

Poměry módů kmitajícího kvádrů jsou  $f_1 : 2,756 \cdot f_1 : 5,404 \cdot f_1 : 8,933 \cdot f_1 : 13,345 \cdot f_1$ .

Ladění kamene marimby může být elementární (ladění pouze fundamentu) nebo komplexní (několik módů). Počátkem 20. století byly komerční marimby naladěny pouze fundamentálně, odpovídaje jmenovitě tónu kamene. V průběhu dvacátých let dvacátého století započala vyšší úroveň, ladění fundamentu a druhého ohybového módu. Takové ladění přináší žádanější zvuk kamene, protože naladí fundament a druhý mód do téměř dvouoktávového harmonického intervalu. Nejlepší moderní marimby pak využívají ladění i třetího ohybového módu.

Laděním kamene je myšleno rozložení rezonančních módů, především ohybových, prodloužením jejich vzájemné frekvenční vzdálenosti. Vhodnou fyzickou úpravou kamene lze jeho tónový charakter měnit. Kameny totiž nemusí mít v celé své délce konstantní průřez.

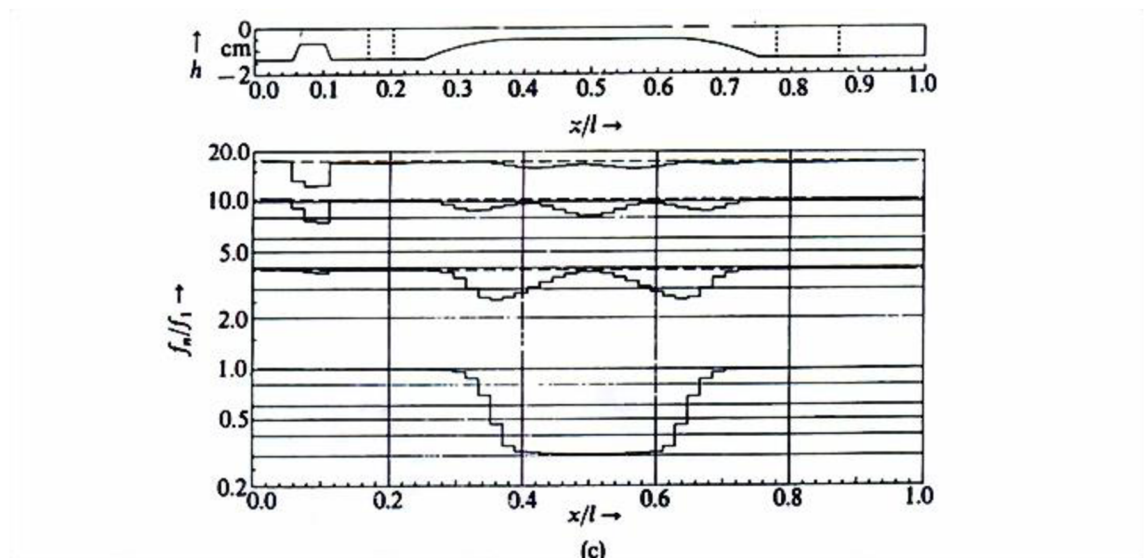
Odebráním středu a vytvořením oblouku je možné změnit původní poměry frekvencí módů na  $f_1 : 3,9584 \cdot f_1 : 10,6726 \cdot f_1 : 19,1693 \cdot f_1 : 27,0238 \cdot f_1$ . Vzdálenost téměř dvou oktáv prvních dvou frekvencí a následující vysoké násobky vedou k výraznější barvě tónu, jež je pro marimbu charakteristická. Tyto intervaly jsou uvedeny v temperovaném ladění. Častěji se uvádí intervaly přirozeného ladění, tedy  $f_1 : 4 \cdot f_1 : 10 \cdot f_1 : 20 \cdot f_1$ . Zkoumání dané problematiky vedlo k závěru, že zvuk reálných marimb se pohybuje mezi těmito ideály.



Obr. 5: Kmity kamene [7]

Ladění samé spočívá v určení rozměrů kamene podle předchozích rovnic. Dále se kámen začne frézovat v oblastech  $x$ , což sníží frekvenci fundamentu a druhého ohybového módu. Ztenčováním středu kamene v oblasti  $y$  vede k dalšímu snižování frekvence fundamentu. Dostane-li se ten příliš nízko, zkrátí se délka kamene. Odebrání materiálu v oblasti  $x$  pak vede k dalšímu snížení prvního a druhého módu. Třetí mód lze ovlivňovat odebráním materiálu přibližně v 9% délky.

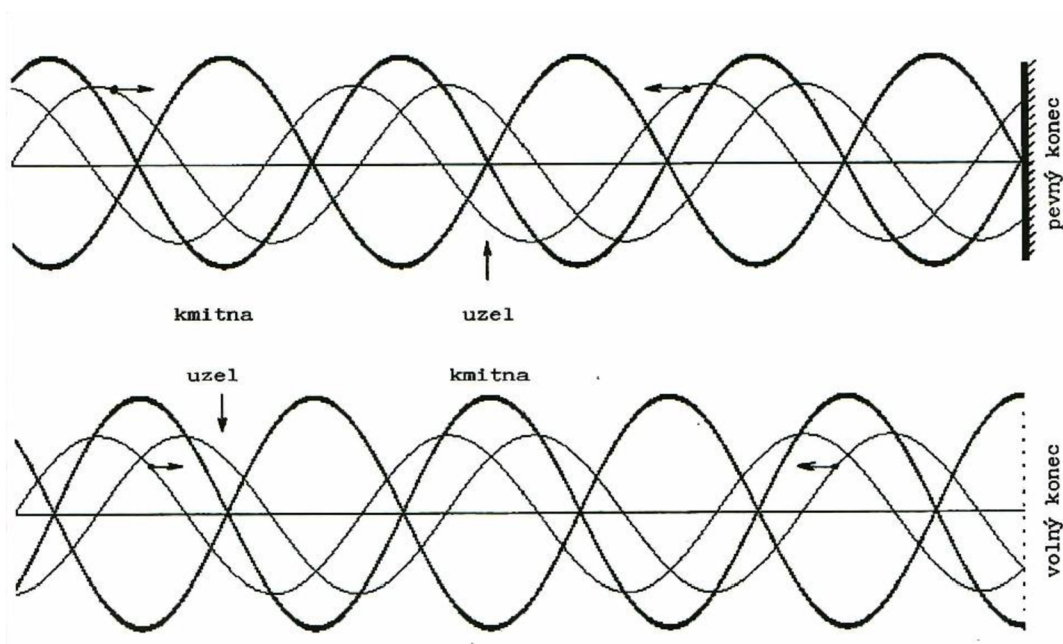
Další drobnější úpravy pak spočívají v zaoblení hran, lehkém zkosení spodních přechodů ploch a různým tvarem klenby oblouku. Oblouk mívá počáteční hrany přibližně v místě uzlů fundamentu. [7, 12]



Obr. 6: Vliv úpravy kamene na zvětšení intervalů frekvencí módů [2]

### 3.2.1.2 Určování uzlů a kmiten pomocí Chladniho obrazců

Kmitání si lze představit jako šíření vlny řadou bodů, kdy dochází k vychýlení této řady bodů, vykresluje vlna tvar sinu. Pokud tato vlna postoupí celou řadou bodů a dorazí k jejímu konci, nastává odraz vlny, která se vrací zpět. Takové odrazy vlnění v řadě bodů rozlišujeme dva: odraz na pevném konci a odraz na volném konci. Odraz na pevném konci lze najít příkladně na struně, která je na obou koncích upevněna a tento pevný bod vrací vlnu s opačnou fází. U kamenů marimby s volnými konci se vlna vrací se stejnou fází. V obou případech dochází k interferenci přímých a odražených vln a vzniká stojaté vlnění. To má za následek, že některé body v řadě kmitají a jiné zůstávají v klidu. Body s největší výchylkou jsou kmitny. Body zůstávající v klidu jsou uzly.



Obr. 7: Určení kmiten a uzlů u pevného a volného konce oscilátoru [7]

Vzdálenost mezi sousedícími kmitnami a vzdálenost mezi sousedícími uzly je polovina vlnové délky. Vzdálenost mezi uzly a kmitnami je čtvrtina vlnové délky. Rozložení uzlů a kmiten v ploše (deska, membrána) pak lze sledovat metodou Chladniho obrazců.

Německý fyzik E. F. Chladni (1756-1827) v této metodě vycházel z pokusů Roberta Hooke. Pomocí tahů smyčce rozeznával tenkou kovovou desku pokrytou pískem. Podle místa hrany desky, zněly různé rezonanční frekvence. Pokaždé se na ploše desky vykreslily odlišné obrazce. Tehdy platila Chladniho metoda spíše za kouzelnické číslo, než za vizualizaci zvuku, ale postupem času našla uplatnění při určování frekvence rezonančních módů, převážně u desek strunných nástrojů (housle, violoncello, kytara).

Při pokrytí desky jemným práškem (sůl, káva, krupice) a jejím následném rozkmitání, dojde v kmitnách k odskoku prášku a v uzlech naopak k jeho akumulaci, protože v místě uzlů je amplituda kmitů nulová. Při aplikaci na housle pak houslař objektivně rozpozná, kde je deska tlustší než jinde, defektní aj.

Metodu Chladniho obrazců lze aplikovat také na kameny marimby. K vybuzení základního ohybového módu postačí pouze úder paličky do středu kamene. Další módy je však již paličkou těžké vybudit (při troše štěstí a správném místě úderu z boku snad první podélný mód), využívá se proto reproduktor připojený na tónový generátor, velmi těsně přiložený ke kameni. Frekvence odpovídající danému módu se nazývá rezonanční či vlastní. Při rezonanční frekvenci reaguje kámen s maximální amplitudou, lze jej tak rozvibrovat a díky Chladniho metodě zobrazit uzly módu dané frekvence. K tomu je však potřeba znát spektrum tónu s jeho frekvenční řadou.





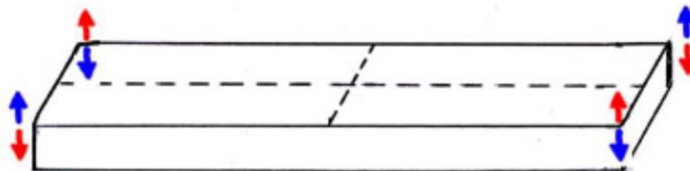
*Obr. 8: Chladniho obrazce: První ohybový mód [12]*

Určí-li se závěs podle uzlu základní frekvence, nedochází pak u připevněného kamene k tlumení vibrací, protože se v tomto místě kámen nepohybuje. Proto díry na protažení provázku korespondují s uzlem fundamentu. Tento uzel lze předpokládat přibližně ve 22,4 % a 77,6 % délky kamene. [16]



*Obr. 9: Chladniho obrazce: První torzní mód [12]*

Torzní mód kmitů má zkroucený typ pohybu. Rohy kamene kmitají souhlasně v úhlopříčce. Zatímco se levý zadní a pravý přední roh pohybují směrem nahoru, pravý zadní a levý přední roh se pohybují proti nim, směrem dolů. Obecně není tento mód příliš problematický, protože vlny z přilehlých rohů kamene se navzájem ruší a ohybové módy tak nejsou příliš tlumeny.



*Obr. 10: První torzní mód kmitů [12]*



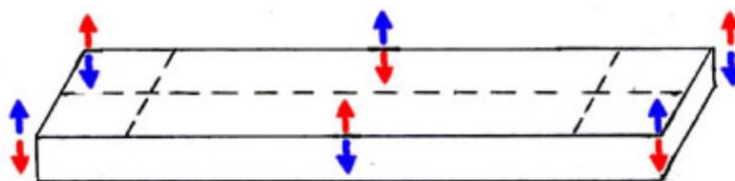
*Obr. 11: Chladniho obrazce: Druhý ohybový mód [12]*

Třetím módem kmitů kamene je druhý ohybový mód. Ve srovnání s prvním ohybovým módem, kmitá druhý velmi podobně. Má dva původní uzly a k tomu jeden uprostřed kamene. Tento mód mívá frekvenci přibližně čtyřikrát vyšší oproti fundamentu.



Obr. 12: Chladniho obrazce: Druhý torzní mód [12]

Čtvrtým módem kmitů kamene je druhý torzní mód. Při něm dochází ke stejným kmitům jako u prvního torzního módu, ale přidávají se navíc kmity středu přední hrany a středu zadní hrany kamene. Pokud k rohům kamene přidáme ještě dva středy nejdelších stran, získáme šest bodů. Ty kmitají způsobem, že po obvodu kamene jsou vždy dva sousední v protifázi.



Obr. 13: Druhý torzní mód kmitů [12]

Druhý torzní mód má frekvenci přibližně devětkrát vyšší oproti fundamentu. Tento mód může být vyvolán úderem paličky k okraji kamene.



Obr. 14: Chladniho obrazce: Třetí ohybový mód [12]

Pátým módem kmitů kamene je třetí ohybový mód. Ten je podobný prvnímu, ale má čtyři uzly. Stejně jako u prvního ohybového módu, vzniká uprostřed kamene kmitna. Tento mód má přibližně desetkrát vyšší frekvenci oproti fundamentu.

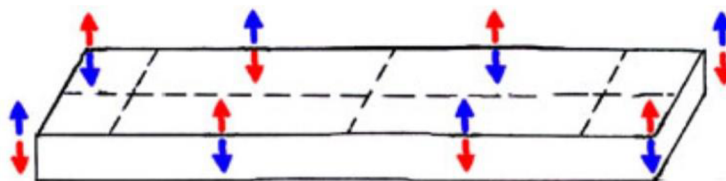


Obr. 15: Chladniho obrazce: První podélný mód [12]

Šestým módem kmitů kamene je první podélný mód. Na rozdíl od předchozích, u tohoto módu nedochází ke kmitům nahoru a dolů, ale do boků. Oproti fundamentu má dvanáctkrát vyšší frekvenci. K větší míře vybuzení tohoto módu je zapotřebí udeřit paličkou střed delší hrany (případně úplně z boku) kamene.



Obr. 16: Chladniho obrazce: Třetí torzní mód [12]



Obr. 17: Třetí torzní mód kmitů [12]

Sedmým módem kmitů kamene je třetí torzní mód. Zde dochází k již osmi kmitajícím bodům, které jsou po obvodu kamene se sousedními v protifázi. Frekvence třetího torzního módu je šestnáct až osmnáctinásobek fundamentu.



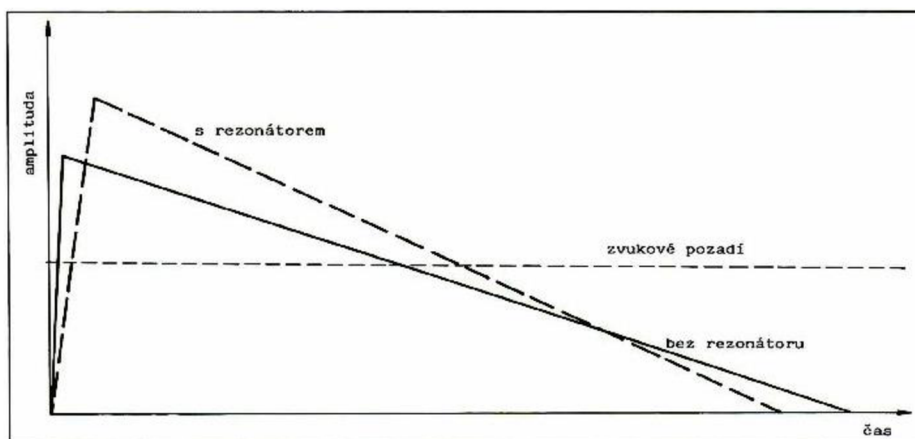
Obr. 18: Chladniho obrazce: Čtvrtý ohybový mód [12]

Osmým módem kmitů kamene je čtvrtý ohybový mód. Ten má oproti předchozímu ohybovému módu místo čtyř uzlů pět. Jeho frekvence je přibližně dvacetinásobkem fundamentu. [7, 9, 12]

### 3.2.2 Rezonátory

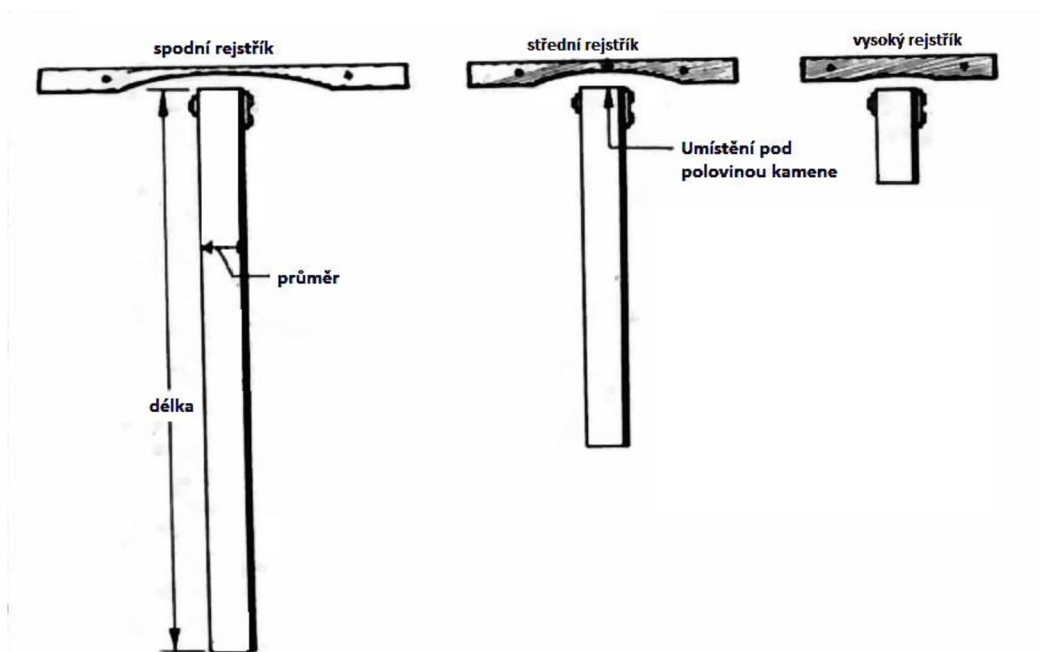
Marimbový rezonátor je nejčastěji trubice, umístěná v těsné blízkosti pod středem kamene. Každý kámen má vlastní rezonátor. Tvar rezonátoru je důležitým faktorem při určování kvality zvuku, jež napomáhá tvořit. Podle modelu Helmholtzova rezonátoru je ideálním tvarem koule (historicky v Africe tykev), avšak samostatně pro každý jednotlivý kámen je tento model nepraktický. Nejvyužívanější variantou rezonátorů je kruhová trubice, která je jistým kompromisem koule a zesiluje převážně požadované vrcholy signálu, tedy amplitudu tónu, což přispívá k pozdějšímu zamaskování nástroje zvukem okolního prostředí. Zvýšení hladiny akustického tlaku v blízkosti nástroje může dosahovat 6 až 8 dB.

Nejhorší volbou pak jsou čtvercové nebo oválné trubice, protože tyto tvary rezonátorů zesilují inharmonické frekvence. Důsledkem větší spotřeby energie šíření tónu rezonátor zkracuje dobu jeho trvání.



Obr. 19: Vliv rezonátoru na časovou obálku tónu [7]

Trubice rezonátoru je na konci uzavřená a její délka odpovídá čtvrtině vlnové délky frekvence daného kamene. Čím vyšší frekvence tónu, tím kratší trubice rezonátoru.



Obr. 20: Závislost délky rezonátoru na frekvenční výšce kamene [6]

$$L = \frac{c}{4f} \text{ [m]}, \quad (8)$$

kde  $L$  je délka rezonátoru,  $c$  rychlost zvuku ve vzduchu a  $f$  frekvence tónu. Změna délky trubice pak ovlivní výslednou frekvenci podle vzorce (9): [10]

$$\Delta f = f - \frac{c}{4(L+\Delta L)} \text{ [Hz]}. \quad (9)$$

Jev, kdy správně sestavená marimba zcela přesně neladí, může být způsoben mnoha faktory, nejčastěji však teplotou okolního prostředí. Změna teploty a s ní související tepelná roztažnost kamene je zanedbatelná vůči změně rychlosti šíření zvuku vzhledem k teplotě vzduchu. Tuto situaci se někteří výrobci marimby snaží řešit designem, zahrnujícím laditelné rezonátory.

Nejčastějším materiálem pro rezonátory marimby jsou dnes převážně mosaz a hliník, avšak výjimkou není ani bambus, plast či lepenka. V jisté fázi degradace zvuku za použití daného materiálu rezonátoru vyvstává otázka, zda není vhodnější rezonátor zcela vynechat. [5, 7, 10]

### 3.2.3 Rám

Rám, na kterém jsou v klaviaturním uspořádání položeny kameny a ve kterém jsou zároveň uchyceny i rezonátory, bývá nejčastěji dřevěný, ale není neobvyklý ani rám ocelový či hliníkový. Může mít i nastavitelnou výšku. Pro lepší mobilitu bývá, v drtivé většině případů, na čtyřech kolečkách, kdy alespoň dvě se dají zabrzdit. Marimba bývá dlouhá přes dva a půl metru, ovšem záleží na rozsahu. Co do šířky pak může mít i metr. Rám je většinou doménou jednotlivých výrobců a určuje design celého nástroje. [1, 2, 11]



Obr. 21: Rozdílné marimby stejného výrobce, firmy Musser [15]

### 3.2.4 Paličky

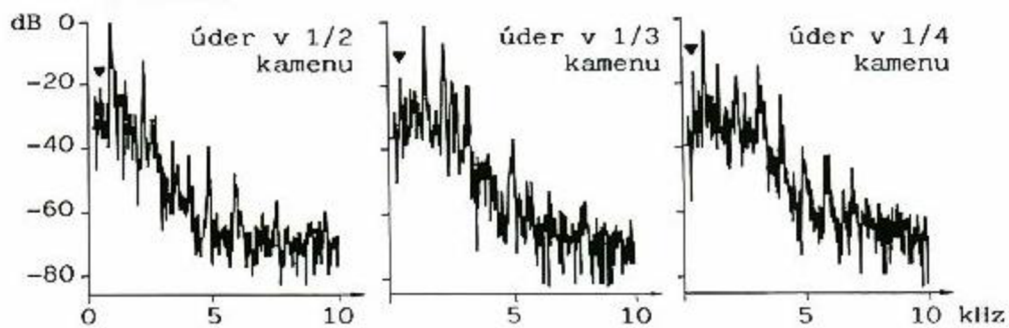
Na marimbu se hraje dvěma, nejčastěji čtyřmi (dvě v každé ruce), ale i šesti paličkami. To závisí na hráči a hrané skladbě. Oproti xylofonu, se na marimbu hraje měkčími paličkami, což souvisí s jinými kameny a větším tónovým rozsahem. Marimbové paličky se řadí do skupiny měkčích paliček perkusních nástrojů. Existuje celá škála tvrdosti, hmotnosti i tvaru marimbových paliček a nelze s určitostí říci, které z nich mají nejuniverzálnější uplatnění v celém rozsahu pěti oktáv nástroje. Měkkost a, naproti tomu i ostrost tónu jednoznačně souvisí s tvrdostí paliček. Nelze však tento požadavek na charakter tónu, a s tím spojený výběr paliček, aplikovat na všechny kameny nástroje, protože každé ze tří pásem rozsahu (basy, středy, výšky) potřebuje k vykreslení všech charakteristických detailů tónů různou tvrdost paliček.



Obr. 22: Marimbové paličky [14]

Stejně dilema výběru paliček správné tvrdosti se vztahuje i k rychlosti hry. Pro rychlé skladby se volí tvrdší paličky, které vybudí ostřejší a konkrétnější tón, s kratší dobou dozvuku. Měkké paličky jsou pak využívány pro jemnější a kontinuálnější hru.

Paličky jsou nejčastěji vyráběny ze dřeva břízy, buku, javoru či ratanu, případně pak z laminátu. Hlava paličky je podle tvrdosti a výrobce velice různorodá. Může ji tvořit například filc obalený vlnou, syntetická příze, silikon prokládaný textilií a omotaný bavlnou, polyamidovou omotávkou obalená kaučuková hlava různé hustoty jádra či mnohé další varianty. Je velmi nepraktické během hry paličky měnit podle toho, jak rychle hraje či v jakém pásmu se právě hráč nachází. Proto je volba tvrdosti paliček určitým kompromisem a záleží na samém protagonistovi, jaký výsledný zvuk požaduje. Stejně jako provedení paliček, se na barvě tónu podílí i síla a místo dopadu paličky na kámen.



Obr. 23: Rozdíly spektra tónu podle místa dopadu paličky [7]

Úderem paličky v polovině délky kamene je zvýrazněna druhá harmonická složka spektra. Ve třetině je podpořena třetí harmonická a úder ve čtvrtině zvýší úroveň všech složek spektra. [2, 11, 7]

## 4 VLASTNOSTI MATERIÁLŮ

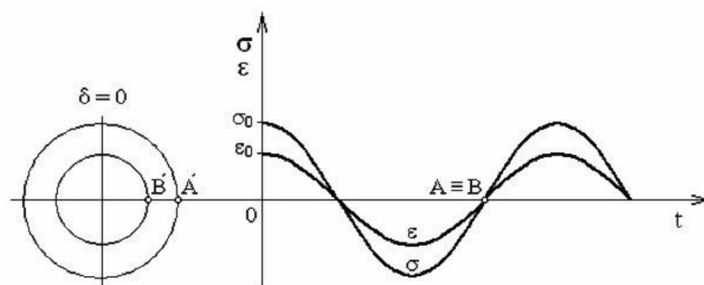
Různorodost materiálů je dána jejich elementární podstatou. Je obecně známo, že kov nevykazuje stejné vlastnosti jako plast a že sklo se při vystavení externím vlivům chová jinak než dřevo. Tato kapitola se věnuje některým základním vlastnostem materiálů. Tyto vlastnosti by pak měli vést k vytyčení cílů, kterým je zapotřebí se přiblížit, aby mohlo být v dané problematice dřevo nahrazeno jiným materiálem. Není vyloučena ani možnost vhodné úpravy jednoho typu dřeva způsobem, kterým by se v požadovaných vlastnostech přiblížil referenčním hodnotám originálního typu dřeva.

### 4.1 Viskoelasticita materiálů

U nuceného kmitání materiálu, předpokládá se jeho rozvibrování, se uvažuje vliv napětí  $\sigma$  a poměrná deformace  $\epsilon$ , které se při periodickém působení vnější síly mění harmonicky, se stálou úhlovou frekvencí  $\omega$ . Přitom napětí působící na materiál a poměrná deformace mají vůči sobě fázové zpoždění, závislé na vnitřním tlumení materiálu, kdy se část mechanické energie přemění v energii tepelnou. Podle velikosti útlumu se materiály rozdělují na elastické, viskózní a viskoelastické. [8]

#### 4.1.1 Elastické materiály

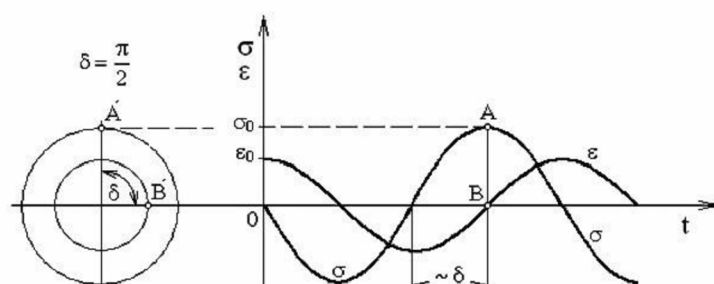
U Ideálně elastického materiálu se předpokládá, že energie, jež se nahromadí při jeho zatížení, je zpětně využita při uvolnění. Nedochozí zde k žádnému útlumu, a proto jsou napětí a poměrná deformace ve fázi ( $\delta = 0$ ). Podle Hookova zákona je u ideálně elastických materiálů závislost napětí a poměrné deformace lineární. [8]



Obr. 24: Časová závislost napětí a poměrné deformace ideálně elastického materiálu [8]

### 4.1.2 Viskózní materiály

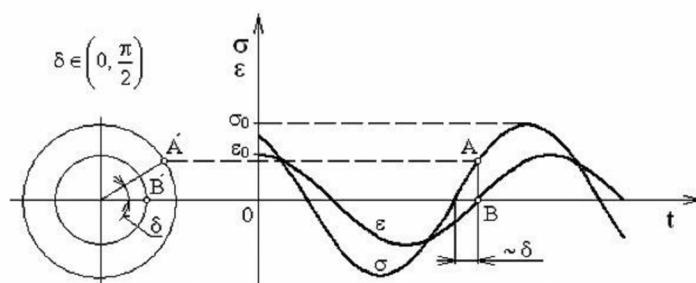
Chování ideálně viskózních materiálů je přesným opakem ideálně elastických materiálů. Veškerá energie zatížení se utlumí, přemění se v teplo. Napětí a poměrná deformace jsou v protifázi. Poměrná deformace je zpožděna o  $\frac{\pi}{2}$  oproti napětí. [8]



Obr. 25: Časová závislost napětí a poměrné deformace ideálně viskózního materiálu [8]

### 4.1.3 Viskoelastické materiály

Předpoklady ideálních elastických a viskózních materiálů jsou převážně teoretické. Většina reálných materiálů se nachází mezi těmito ideály, a proto jsou definovány jako viskoelastické. Fázový posun napětí a poměrné deformace je v rozmezí od nuly po  $\frac{\pi}{2}$ . Část energie zatížení se utlumí a část se zpětně využije při uvolnění. [8]



Obr. 26: Časová závislost napětí a poměrné deformace viskoelastických materiálů [8]

Mezi hlavní veličiny popisující vlastnosti viskoelastických materiálů patří činitel vnitřního tlumení  $\eta$ , logaritmický dekrement útlumu  $\delta$  a modul pružnosti  $E$ . Činitel vnitřního tlumení vychází z fázového posunu mezi napětím a poměrnou deformací. [8]

$$\eta = \operatorname{tg} \delta = \frac{E''}{E'}, \quad (10)$$

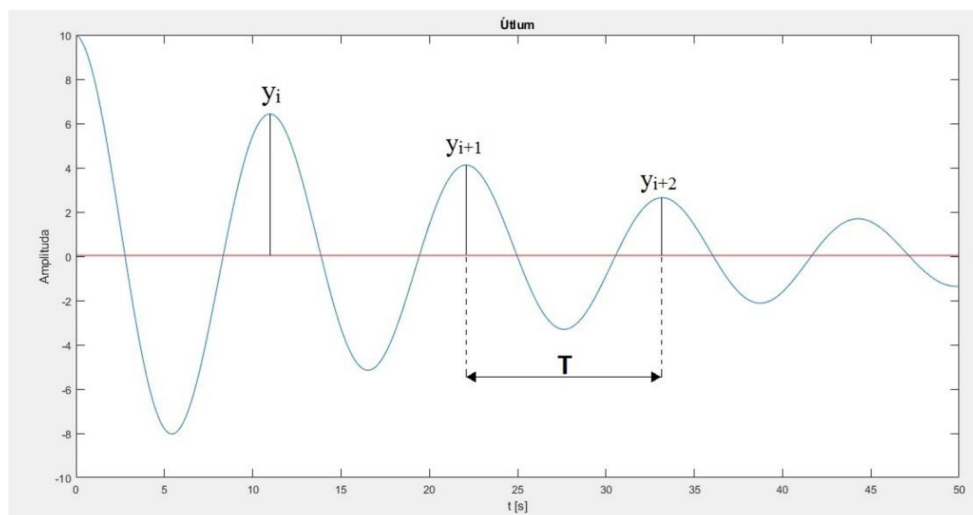
kde  $E''$  je imaginární složka komplexního modulu pružnosti  $E$ , charakterizující tlumící vlastnosti materiálu.  $E'$  je reálná složka komplexního modulu pružnosti  $E$ , charakterizující pevnostní vlastnosti materiálu. Komplexní modul pružnosti, jeho reálná a imaginární složka jsou definovány jako:



$$E = E' + iE'', \quad E' = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cdot \cos\delta, \quad E'' = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cdot \sin\delta, \quad (11)$$

kde  $\sigma_0$  je amplituda napětí a  $\varepsilon_0$  amplituda poměrné deformace. [8]

Logaritmický dekrement útlumu je poměr dvou amplitud, po sobě jdoucích vibračních cyklů. Po rozkmitání dochází vlivem útlumu k poklesu amplitud kmitů v čase.



Obr. 27: Časový průběh tlumených kmitů [8]

$$\delta = \frac{1}{N} \cdot \ln \frac{y_i}{y_{i+N}}, \quad (12)$$

kde  $y_i$  a  $y_{i+N}$  jsou velikosti amplitud kmitů,  $N$  je počet period kmitání  $T$ , po kterých byly odečteny amplitudy  $y_i$  a  $y_{i+N}$ . [8,9]

Logaritmický dekrement útlumu lze definovat i v závislosti na součiniteli kritického tlumení  $\xi$  a činiteli vnitřního tlumení  $\eta$  podle vztahu [8]

$$\delta = 2\pi \cdot \xi = \pi \cdot \eta. \quad (13)$$

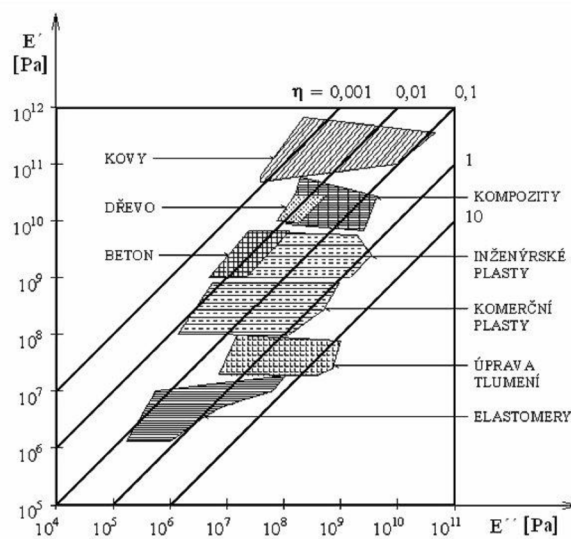
Modul pružnosti, nebo též Youngův modul pružnosti, je podíl mezi napětím a poměrnou deformací.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F l_0}{S \Delta l} [\text{Pa}], \quad (14)$$

kde  $l_0$  je původní délka,  $\Delta l$  změna délky, přičemž platí, že  $\Delta l = l_{max} - l_0$ ,  $S$  je plocha, na kterou působí síla  $F$ . [9]

Čím větší je Youngův modul pružnosti, tím větší je napětí potřebné pro deformaci. Youngův modul pružnosti se měří tenzometrem či odchylkoměrem. Pružnost materiálů se definuje jako schopnost získání původních rozměrů a tvaru po vychýlení působením vnějších sil. Tedy, do jaké míry se změny mezi atomy

materiálu vrátí do své rovnovážné polohy. Rozlišuje se modul pružnosti v tahu, tlaku a ohybu a modul pružnosti v kroucení a smyku. Pro určování podobnosti materiálů z hlediska viskoelastivity lze porovnat hodnoty činitele vnitřního tlumení a komplexního modulu pružnosti.



Obr. 28: Porovnání materiálů z hlediska vnitřního tlumení a modulu pružnosti [8]

Z grafu je patrné, že v tomto ohledu jsou nejbliže dřevu kompozity, tedy kombinace materiálů. K objasnění důvodu této podobnosti je zapotřebí dřevo prozkoumat a definovat některé jeho vlastnosti. [8, 9]

## 5 DŘEVO

Dřevo vždy patřilo k neodmyslitelné surovině, která byla využívána napříč všemi epochami lidského vývoje. V současné době existuje možnost využití dřeva a z něho utvořených výrobků více jak dvaceti tisíci způsoby. Dlužno říci, že dřevo je naší klíčovou součástí.

Z fyzikálního hlediska má dřevo jedinečnou charakteristiku, jež nepatří mezi nejjednodušší. Pro tuto práci postačí obecný souhrn těch nejzásadnějších vlastností, platné pro danou problematiku.

### 5.1 Charakteristika dřeva

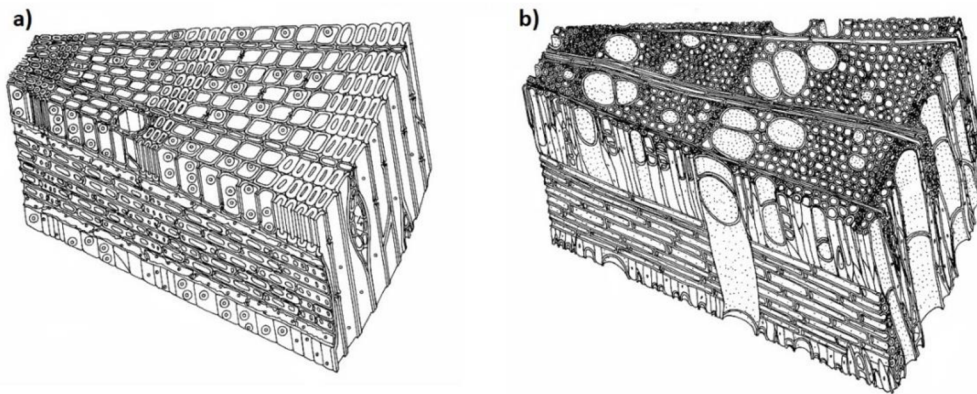
Protože se nejedná o vyrobený materiál, ale o rostlinu, resp. dřevinu, je základní řazení: druh, rod, dále pak poddruh, odrůda či sorta. Prozatím postačí rozdělení dřevin na jehličnaté a listnaté.

Z hlediska významu této kapitoly je z makroskopických znaků stromu podstatný kmen, který, podle druhu, představuje 55 až 90 % rostliny a je nejrovnější částí stromu. Kmen funguje jako spojnice kořenů a koruny, prochází jím cévní systém. Během růstu stromu kmen tvrdne a vytváří každý rok letokruhy. Ty jsou přírůstkem vegetačních období a dělí se na vrstvy jarního a letního dřeva. V závislosti na druhu, geografickém umístění a okolních vlivech, mají různou tloušťku, hustotu a tvrdost. Lze uvést, že kvalitnější dřevo pochází z lesa, nikoliv ze solitérů (samostatně rostoucích jedinců). Solitér musí odolávat povětrnostním vlivům výrazněji, než strom, chráněný podmínkami lesa. To u solitéru zapříčiňuje masivní sukovitost, zahuštění letokruhů, úbytek měkkého přírůstku obvykle na severní straně, tedy nestejně rozložení let a hustoty v řezu kmene.

U dřeva rozlišujeme morfologické znaky textury (kresbu, barvu, tvar a výskyt jednotlivých znaků dřeva, typických pro určité druhy), lesk, hmotnost, vlhkost, tepelnou roztažnost, tvrdost, pórovitost, dále pak chyby dřeva (odchyly v tvaru a textuře, točivost či křivost, sukovitost, trhliny, nádory, vodnatost, plísně a jiné houby, zapaření, poškození hmyzem a cizopasnými rostlinami, chyby vznikající poraněním rostoucího stromu, chyby vzniklé při těžbě a manipulaci a výše uvedené podmínky z konkrétního stanoviště růstu).

Vysušené dřevo má prakticky stejné elementární složení, nehlédě na druh. Průměrně obsahuje 49,5% uhlíku, 44,2% kyslíku a 6,3% vodíku. Kromě toho dřevo obsahuje i minerální látky v rozsahu 0,2 až 1,2%. Chemické složení je 43 až 52% celulózy, 20 až 35% hemicelulózy a 20 až 30% ligninu. Dále může obsahovat pryskyřici, tuk či vosk.

Mikroskopická struktura dřeva je pro tuto práci příliš obsáhlá. Pro daný účel postačí spíše hrubší dělení dřevin. Pro představu o odlišnosti je uvedeno porovnání anatomické stavby v řezu jehličnatého a listnatého dřeva. Pro zjednodušení dalšího rozboru bude místo označení „sítkovice“, „tracheidy“ a „tracheje“ v dalším textu použito jednoduššího označení „vlákna“ či „cévní svazky“. [9]



Obr. 29: Rozdíl struktury dřeva v řezu. a) Jehličnaté dřevo b) Listnaté dřevo [9]

### 5.1.1 Hustota

Hustota  $\rho$  udává hmotnost jednotkového objemu a vypočítá se z podílu hmotnosti tělesa  $m$  a objemu  $V$ , přitom pro výpočet hustoty dřeva jsou hmotnost i objem vypočteny při stejné vlhkosti. Ta může být pro teoretické výpočty i nulová ale obvykle se uvažuje hodnota „normová vlhkost“ ve výši 12 %. [9]

$$\rho = \frac{m}{V} [\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}], \quad (15)$$

Za nejtěžší dřevo se považuje Guajak, s hustotou  $\rho = 1363 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ .

Za nejlehčí pak Balsa,  $\rho = 130 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ .

Tab. 1: Hustota našich nejvýznamnějších dřevin, v absolutně suchém stavu [9]

Dřeviny	Hustota $\rho$ [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]
Smrk, Jedle, Topol	350-400
Lípa, Osika	400-450
Borovice	500
Vrba, Olše, Bříza	500-600
Jasan, Javor, Kaštan	630
Dub	650
Buk	680
Akát, Habr	730-800

Na hustotu dřeva mají vliv, kromě vlhkosti, i další faktory. Vliv tloušťky letokruhů a celkově podíl letního a zimního dřeva, kdy letní dřevo je hustší. Pokles hustoty a kvality dřeva v závislosti na stáří stromu. Rozdílná je i hustota dřeva vzhledem k jeho poloze v kmeni. Pro stabilizaci rozměrů, jejichž změnu nejčastěji zapříčiňuje změna vlhkosti, bývá dřevo ošetřeno nátěry a povlaky, impregnací, neutralizací OH skupin či tepelnou úpravou.

Pro téma práce je zajímavá i hustota dřevních kompozitů. Pro její výpočet platí stejné podmínky jako u dřeva. Tyto kompozity většinou sestávají z několika složek (lepidlo, dřevotřísky, dřevovlákná). Tímto způsobem, při selekci těch nejtěžších složek dřeva a jejich vhodnou úpravou, lze dosáhnout vyšší hustoty, než u dřeva původního.

Tab. 2: Hustota některých dřevních kompozitů [9]

Kompozitní materiál	Hustota $\rho$ [kg·m <sup>-3</sup> ]
Dřevotřískové desky - bukové	750
Dřevovláknité desky - tvrdé	850-1100
Dřevovláknité desky - polotvrdé	480-850
Dřevovláknité desky - měkké	250-400
Pilinové desky	600
Konstrukční likusové desky	360
Heraklit	200

Pro některé akustické účely je u kompozitů počítána plošná hmotnost  $\rho_p$ . [9]

$$\rho_p = \frac{m}{S} \text{ [kg·m}^{-3}\text{]}, \quad (16)$$

kde  $m$  je hmotnost kompozitu a  $S$  jeho plocha.

Hustota dřeva ovlivňuje jeho fyzikální a mechanické vlastnosti. Hustší, tedy i těžší dřevo, je často pevnější, tvrdší a odolnější. Naproti tomu ale může být i dřevo s nízkou hmotností, pevné a pružné. Poznatky o hustotě dřeva přímo souvisí s volbou daného dřeva, k využití pro výrobu hudebních nástrojů. [9]

#### 5.1.1.1 Lignamon

Jednou z možných úprav dřeva (nejčastěji bukového), pro zvýšení jeho hustoty, je jeho zahřátí na maximální teplotu 103°C, plastifikace amoniakovou párou a následná komprese. Takto modifikované dřevo se nazývá lignamon. Jeho výsledná hustota je závislá na míře stlačení, jež nabývá hodnot od 0,8 až 1,3 MPa.

Výroba lignamonu byla vyvinuta v šedesátých letech minulého století v Československu. Kromě strojírenství a výrobě nábytku byl hojně využíván i při výrobě částí hudebních nástrojů, protože svými vlastnostmi i vzhledem velmi věrohodně imituje tropické dřevo. [17]

#### 5.1.2 Akustické vlastnosti dřeva

Dřevo je pro své výborné akustické vlastnosti primárním materiálem pro výrobu akustických nástrojů a akustických prvků obecně. Akustickými vlastnostmi je myšleno tlumení, vedení nebo zesílení zvuku. Oproti ostatním technickým materiálům je šíření zvukových vln ve dřevě podstatně složitější. Je to dáno především anizotropním charakterem, jež souvisí se strukturou dřeva. Rychlost šíření zvuku ve dřevě se zvyšuje se zvětšujícím se modulem pružnosti a zmenšující se hustotou. [9]

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \text{ [m·s}^{-1}\text{]}. \quad (17)$$

Kvůli přítomnosti vláken ve dřevě je ale tento vzorec nedostatečný. Ve směru vláken je rychlost šíření zvuku nejvyšší a blíží se již rychlosti šíření zvuku

v kovech. Naproti tomu kolmo na vlákna je rychlost šíření zvuku průměrně třikrát menší. Podobně rozdílné jsou i hodnoty modulu pružnosti ve směru vláken a kolmo k nim. Poměr rychlosti podél a napříč vlákny je vyjádřen

$$\frac{c_{\parallel}}{c_{\perp}} = \sqrt{\frac{E_{\parallel}}{E_{\perp}}}, \quad (18)$$

kde  $c_{\parallel}$ ,  $c_{\perp}$  je rychlost šíření zvuku podél a napříč vlákny a  $E_{\parallel}$ ,  $E_{\perp}$  je modul pružnosti podél a napříč vlákny. [9]

Tab. 3: Průměrná rychlost zvuku v některých dřevinách (Kollman a Côté (1968)) [9]

Druh dřeva	$\rho$ [kg·m <sup>-3</sup> ]	Modul pružnosti $E$ [MPa]		Rychlost zvuku $c$ [m·s <sup>-1</sup> ]		$\frac{c_{\parallel}}{c_{\perp}}$
		$E_{\parallel}$	$E_{\perp}$	$c_{\parallel}$	$c_{\perp}$	
<b>Smrk</b>	470	11 000	550	4 790	1 072	4,47
<b>Jedle</b>	460	11 000	490	4 890	1 033	4,73
<b>Javor</b>	630	9 400	915	3 826	1 194	3,21
<b>Buk</b>	730	16 000	1 500	4 638	1 420	3,27
<b>Dub</b>	690	13 000	1 000	4 304	1 193	3,61

Rychlost šíření zvuku klesá při zvyšující se vlhkosti dřeva, protože voda vyplňuje kapiláry, ve kterých byl původně vzduch. Tím roste odpor prostředí proti šíření vlny. Ten se vypočítá jako součin hustoty dřeva a rychlosti šíření zvuku v něm.

$$Z = \rho \cdot c = \rho \sqrt{\frac{E}{\rho}} \text{ [kg·m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\text{]}, \quad (19)$$

kde  $Z$  značí akustický vlnový odpor. [9]

Ve dřevě se zvuk tlumí vnitřním třením a vyzařováním zvuku. Tlumení způsobené vyzařováním (radiací) závisí na poměru rychlosti šíření zvuku a hustotě materiálu. Dřevo, jež vykazuje nízké tlumení vnitřním třením a vysoké tlumení radiací zvuku se nazývá rezonanční dřevo či rezonanční dříví. Rezonanční dříví a jeho vlastnosti by obsáhly celou samostatnou kapitulu, potažmo diplomovou práci. V této práci postačí o rezonančním dříví uvést, že se využívá pro stavbu rezonančních desek dřevěných nástrojů a že ukazatelem kvality jeho vyzařování je akustická konstanta  $K_A$  [9]

$$K_A = \sqrt{\frac{E}{\rho^3}} \text{ [m}^4\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\text{]}, \quad (20)$$

Další definice rezonančního dříví uvedeny nebudou, protože na kameny marimby se z dřívě uvedených důvodů využívá dřevo oscilační, nikoli rezonanční. Oscilační dřevo vykazuje vysokou hustotu a vysokou pružnost. [9]

## 6 INOVACE NÁSTROJE

Inovace nástroje souvisí s vylepšením jeho vlastností, a to nejen zvukových (rozsah, barva, délka trvání tónu, hlasitost), ale i vlastností nástroje samotného (váha, rozměr, cena, vzhled). Dále by pak měla inovace hudebního nástroje sloužit k posunu jeho hráčů směrem k novým možnostem rozvoje své hry na daný nástroj.

Při současném vývoji technologií a při hlubokém prozkoumání a pochopení fyzikálních, mechanických a akustických vlastností dřeva se nabízí varianta inovace hudebních nástrojů jiným než původním materiálem. Další varianta inovace nástroje je jeho elektrifikací a s ní spojenými možnostmi.

Elektrifikací je myšlena úprava hudebního nástroje tak, že do jisté míry využívá elektrickou energii. Tato míra využití elektřiny pak nástroje dělí na elektroakustické, elektronické, případně kombinované.

Organologie (studium hudebních nástrojů) se v oblasti Elektrofonických nástrojů rozchází, je zastaralá a přes snahu erudovaných autorů odborné literatury se lidově uchovala nepřesná a nesprávná názvosloví. Jen pro lepší představu jsou zde uvedeny okrajové definice:

- U Elektroakustických, přesněji Elektrofonických, hudebních nástrojů je zvuk snímán elektromagneticky, ale nástroje samé jsou funkční i bez elektřiny.
- Elektronické nástroje tvoří zvuk pomocí tónového generátoru a nezbytně ke své funkci potřebují elektrickou energii (klávesy, samplery, syntetizátory)

Při inovaci je zapotřebí zvážit podstatu a závažnost změn, s ohledem na původní variantu. Při jiném uspořádání, odlišném způsobu tvorby zvuku i zásadně rozdílné barvě tónů se inovace nástroje pohybuje na hraně vytvoření nástroje nového. [3]

### 6.1 Nové materiály

Při nahrazení původního dřeva jiným dřevem či přímo jiným materiálem je nezbytné vycházet ze dříve uvedených vztahů a definic. V rozsahu současné úrovně znalosti, vyvstává možnost několika variant.

- Nahrazení dřevem, jenž obecně vykazuje horší vlastnosti pro dané téma, ale je dostupnější. Jeho úprava vhodnou metodou či kombinací metod, díky kterým, nabude vlastností podobných referenčním.
- Nahrazení syntetickým materiálem s vlastnostmi blízkými referenčním. V současnosti se experimentuje s acoustalodem, kelonem, zelonem jež v některých případech mohou vykazovat akustické vlastnosti podobné dřevu. Další možností by mohly být materiály s odpovídající hustotou či strukturou (akrylát, polymerická dřeva).
- Nahrazení kompozitem s vhodnými vlastnostmi. Zde se teoreticky nabízí dřevní kompozit, laminát s přídavkem lněných, skelných či jiných vláken, 3D tisk různé kombinace materiálů s vhodným nosným materiálem.

## 6.2 Elektrifikace

Jak bylo uvedeno, možností inovace nástroje je i jeho elektrifikace, ať již částečná či úplná. Všechny tyto možnosti ale souvisí s referenčními vzorky nahrané marimby.

- Elektroakustická varianta vychází z možnosti, nahrazení původního materiálu kamene jiným materiálem, který ale nebude vykazovat dostatečně podobné vlastnosti. Pokud by při hraní tento nový kámen vytvářel alespoň část frekvenční řady, v porovnání s referenční, mohla by být tato neúplná řada elektronicky doplněna odpovídajícími frekvencemi a dotvářet tak spektrum podobné či odpovídající referenčnímu. Pro větší míru inovace je pak možné přidávat ještě další frekvence, měnit jejich průběh a podle subjektivního hodnocení takto vzniklého tónu vytvářet nový zvuk marimby. U této varianty je ale nezbytné získat z kamene potřebný zvuk a v reálném čase ho zaznamenat, vyhodnotit a dle požadavků upravit. K tomu by mohl sloužit například elektretový mikrofon s nastavitelnou citlivostí, jenž by, umístěn těsně pod kamenem, snímal jeho signál. Takto získaný signál by byl vhodně vyhodnocen a uživatelem upraven na požadovaný. Výstupem by pak byly reproduktory či sluchátka. Vzhledem k charakteristice marimby by bylo nejvhodnější diskretizovat jednotlivé kameny pomocí jednotlivých reproduktorů, umístěnými pod celou konstrukcí, či nad kameny (nasměrovanými na hráče) a to takovým způsobem, aby nevznikala zpětná vazba s mikrofony.
- MIDI kontroler, tedy hardwarová konzole pracující na protokolu MIDI, vzhledem a uspořádáním shodná s marimbou, na niž hráč odpovídajícím způsobem hraje. Kameny, téměř libovolného materiálu, zde plní funkci spínačů jednotlivých tónů (jako klapky elektrických kláves). Podle složitosti mechanismu spínání pak mohou být zaznamenány parametry vznikající hraním (síla, rychlost, místo dopadu na kameni). Čím více je těchto parametrů zaznamenáno, následně vyhodnoceno a zohledněno při reprodukci tónů, tím realističtější je potom dojem ze hry na nástroj. Při reprodukci tónů pak lze použít referenční vzorky nasnímaných způsobů hry, a nebo upravit spektrum tónu podle zjištěných skutečností, odpovídajících danému stylu hry či místa dopadu paličky, uvedených v předchozích kapitolách. Také lze doplňovat jen vybrané frekvence, upravovat je a vytvářet tak zcela nový zvuk při zachování stylu hry na marimbu. Kromě toho lze samozřejmě použít vzorky jiných nástrojů a hrát na marimbově stavěný nástroj například zvuk harfy. U MIDI kontroleru je podstatný fakt, že kámen sám o sobě nijak nezní, přesněji nesmí znít ani trochu. Veškerý zvuk vychází z reproduktoru. Jako snímače pak mohou sloužit optická vlákna, tlakové snímače, optická čidla, či běžně využívané tlačítkové snímače elektrických kláves.



U takto snímaného sepnutí je pak vhodné vytvořit dvojkontaktní variantu spínače, díky které lze vyhodnotit rychlost stisku, tedy dynamiku úhozu.

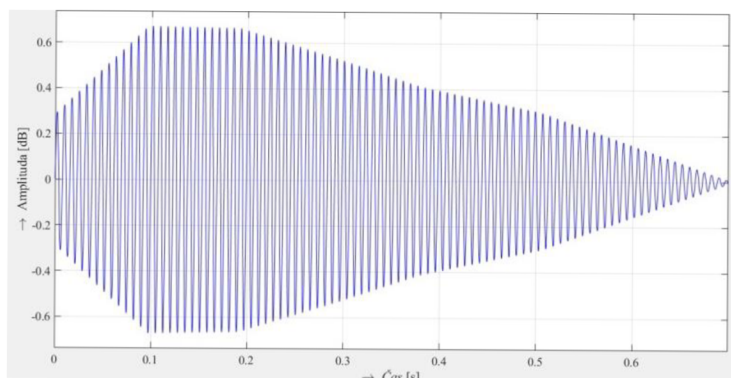
- V úvahu přichází i varianta úplného nahrazení hardwaru podobného marimbě a jeho simulace dotykovou obrazovkou, jeho projekcí na libovolnou plochu a prostorového snímání polohy paliček, případně úplné přenesení této vizualizace do virtuální reality. V takových případech by reprodukce zvuku mohla odpovídat systému MIDI kontroleru, ale uživatelské rozhraní by bylo zcela odlišné, nehmatatelné a bez elektrické energie i neviditelné.

## 7 ADITIVNÍ SYNTÉZA

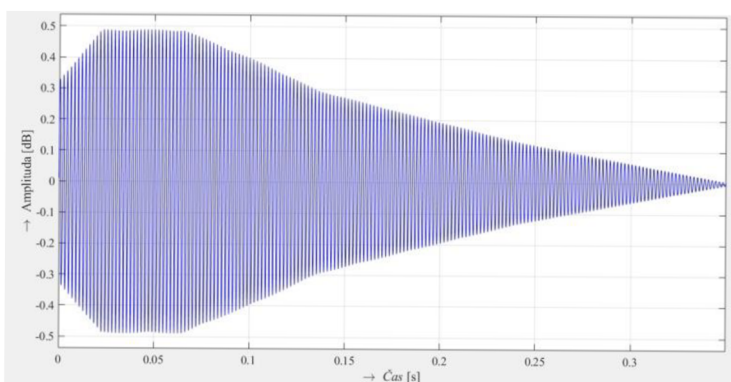
Jak bylo uvedeno, tón se skládá z více frekvencí o různé amplitudě (hladina energie), s jinou dobou trvání a různou fází. Tak, jak je možné takto složené tóny rozložit na jednotlivé složky, je možné je i zpětně skládat. Operace rozkladu se nazývá analýza a operace skládání syntéza. Aditivní syntéza sčítá sinusové vlny jednotlivých frekvenčních složek dohromady. Tím tvoří barvu tónu. Na příkladu Marimbového kamene C3 lze tento proces vidět. Základní frekvence má 130,81 Hz a dobu trvání 0,7 sekundy, čtvrtá harmonická frekvence 523,25 Hz a dobu trvání 0,35 s, desátá harmonická frekvence 1318,5 a dobu trvání 0,1 s.

Tyto informace lze získat analýzou. Pomocí počítačového softwaru lze tyto složky s příslušnými parametry vytvořit a samostatně si je poslechnout. Pomocí aditivní syntézy pak lze tyto tři frekvence sečíst dohromady a vytvořit tak počítačem generovaný tón, velmi blízký původnímu marimbovému.

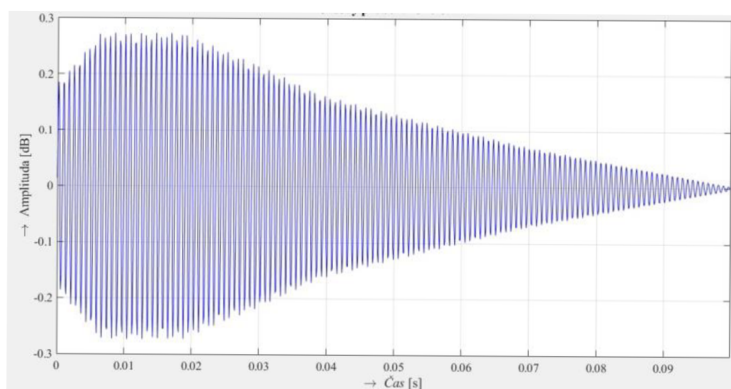
Aditivní syntéza může být využita v metodě doplnění spektra tónu zvukově chudého kamene, oproti referenčnímu, a zároveň i v metodě tvoření celého tónu u ostatních variant elektrifikačních inovací marimby. Volba různě strukturovaných frekvenčních řad a jejich výsledná zajímavost je otázkou subjektivního vjemu a záleží na jednotlivci, do jaké míry tón upraví. [7, 12]



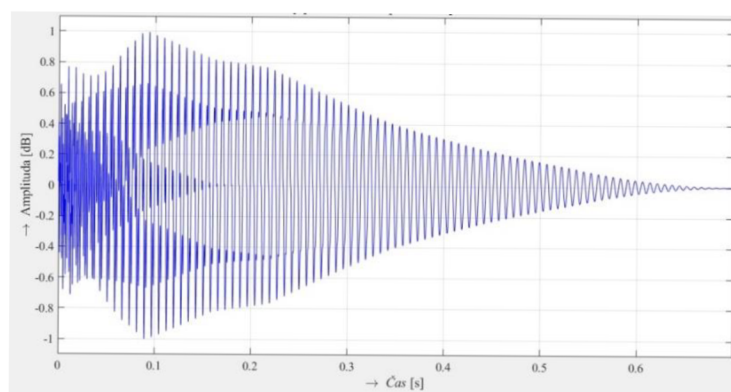
Obr. 30: Fundament (130,81 Hz) [12]



Obr. 31: Čtvrtá harmonická složka (523,25 Hz) [12]



Obr. 32: Desátá harmonická složka (1318,5 Hz) [12]



Obr. 33: Všechny tři frekvence sečtené aditivní syntézou [12]

## 8 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Pro posouzení využitelnosti některých materiálů pro stavbu marimby je nezbytné otestovat základní vlastnosti vybraných materiálů. Po získání dostatečného množství dat lze porovnat tyto zástupce s referenčním materiálem.

### 8.1 Kameny

V rámci diplomové práce byly změřeny a porovnány rozměry a spektra sedmi marimbových kamenů. Čtyři byly z palisandru a měly rozdílnou velikost, zastupovaly tedy různé tóny. Kromě toho byly i jinak řemeslně zpracované. Palisandr C2 byl dokonce prasklý, čímž zastupoval případ defektu a tím rozšiřoval škálu různorodosti vzorků. Další dva kameny byly z dubu s odlišně nahuštěnými léty (hustší označen jako „tmavý“ a řidší jako „světlý“) a jeden kámen byl bukový. Všechny tyto tři kameny byly vyrobeny pro studijní účely a svými rozměry jsou téměř shodné s palisandrem C2.

Dále, pro ověření teoretických poznatků o nevybroušených kamenech konstantního průřezu, byly ve spolupráci s Mendelovou univerzitou v Brně změřeny a porovnány tři vzorky dřevěných kamenů stejných rozměrů, ale s rozdílnou hustotou. Jeden byl z buku, druhý z habru a třetí z bukového lignamonu. Pro získání obsáhlejších výsledků byly přidány ještě hustší lignamon a silon. Oba konstantního průřezu, ale různých rozměrů oproti sobě i předchozím třem vzorkům.

V závěru experimentální části týkající se kamenů proběhl pokus naladit dřevěné kameny stejných rozměrů z předchozí části na stejný tón a poté byla vyhodnocena jejich odlišnost. Podobný postup byl též aplikován na silonový a polyetylenový kámen s analýzou chování těchto polymerů v průběhu ladění.

### 8.1.1 Vybroušené kameny

Z hmotnosti  $m$  a rozměrů  $d$ ,  $š$ ,  $tl\ k$ ,  $tl\ s$  (délka, šířka, tloušťka konců, tloušťka středu), při vhodném proložení oblouku přímkou, byl vypočítán objem  $V$  jednotlivých kamenů a podle vzorce (14) určena jejich hustota  $\rho$ . Ta je jedním z klíčových parametrů ovlivňujících výslednou barvu tónu.

Tab. 4: Rozměry vybroušených kamenů z různých materiálů, objem a hustota

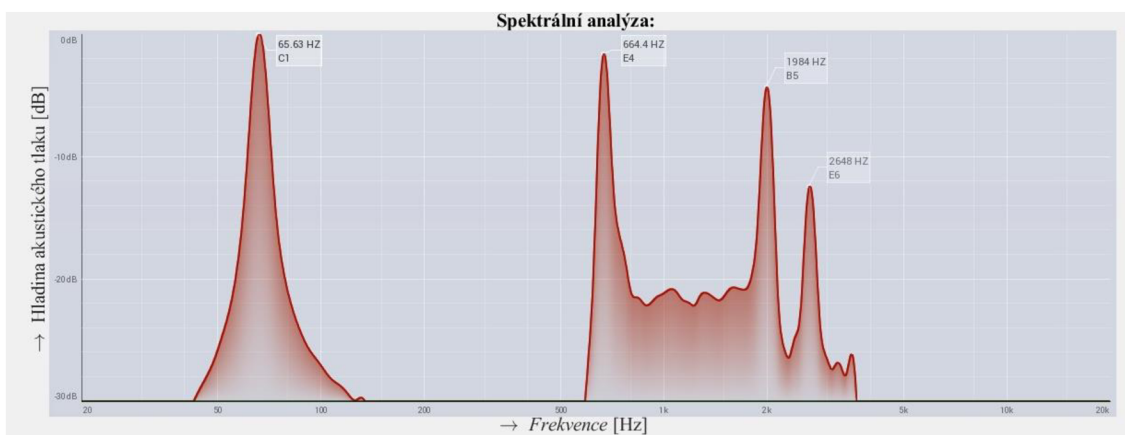
Kámen	$d$ [m]	$š$ [m]	$tl\ k$ [m]	$tl\ s$ [m]	$m$ [g]	$V$ [m <sup>3</sup> ]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
<b>Palisandr C2</b>	0,573	0,073	0,025	0,004	585	0,000589	993,39
<b>Palisandr C</b>	0,553	0,073	0,026	0,004	603	0,000543	1109,82
<b>Palisandr Dis3</b>	0,426	0,061	0,026	0,006	426	0,000441	965,12
<b>Palisandr E</b>	0,526	0,069	0,026	0,004	560	0,000508	1102,41
<b>Buk</b>	0,573	0,073	0,02	0,005	314	0,000510	615,36
<b>Dub světlý</b>	0,573	0,073	0,02	0,005	356	0,000510	697,67
<b>Dub tmavý</b>	0,573	0,073	0,02	0,005	381	0,000510	746,66

Z těchto údajů je evidentní vysoká hustota palisandrů. Rovněž je u dubového dřeva jasně patrné, že vyšší hustota koresponduje s hustším obsahem letokruhů ve dřevě. Pro porovnání rozdílů ve spektru byl zvuk kamenů nasnímán při držení v ruce, uchycené za místo uzlu. U všech kamenů byly tímto způsobem zaznamenány vzorky při různém místě dopadu paličky. Za místa dopadu byl zvolen střed délky kamene, třetina délky kamene, střed boční hrany nejdelší strany a čelo nejkratší strany. U všech nasnímaných vzorků bylo analyzováno frekvenční spektrum a zaznamenány významné frekvence, zobrazené jako amplitudové vrcholy.

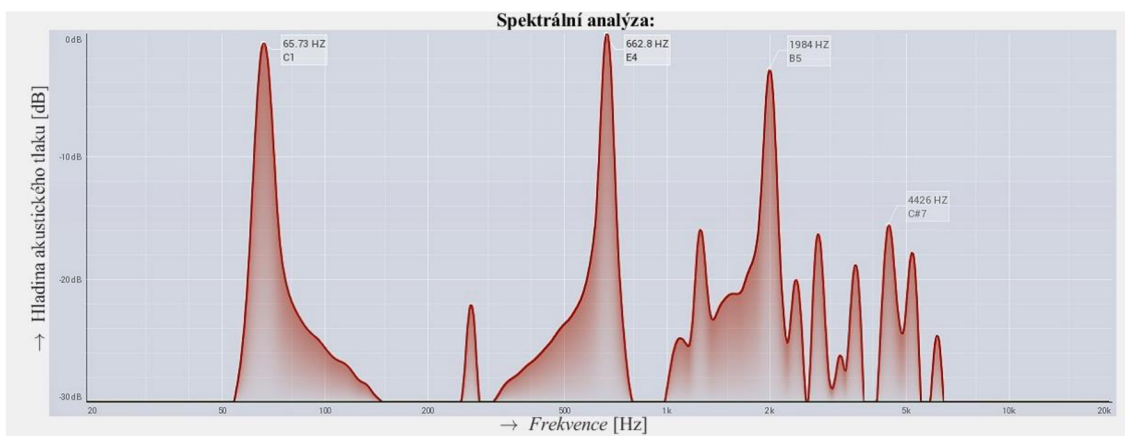
Pro přehlednější uspořádání jsou shodné či podobné frekvence uvedeny na jeden řádek tabulky. Tím je patrnější vliv místa dopadu na tvorbu specifických frekvencí. Pro srovnání vlivu místa dopadu kamene na amplitudy jednotlivých frekvencí jsou uvedeny grafy jejich spektrální analýzy pro místo úderu v polovině a třetině délky kamene.

Tab. 5: Frekvence palisandrového kamene C

Kámen	Palisandr C			
	1/2	1/3	bok	čelo
f [Hz]	65,63	65,73	65,62	65,77
f [Hz]	-	265,4	266,4	265,1
f [Hz]	664,4	662,8	662,6	663,2
f [Hz]	-	1244	1243	-
f [Hz]	-	-	1738	-
f [Hz]	1984	1984	1979	-
f [Hz]	-	2369	-	2365
f [Hz]	2648	2750	2739	-
f [Hz]	-	-	3166	-
f [Hz]	-	3538	3791	3559
f [Hz]	-	4426	4498	4407
f [Hz]	-	5179	5184	5233
f [Hz]	-	6130	6046	6093
f [Hz]	-	-	7119	7113
f [Hz]	-	-	8046	-



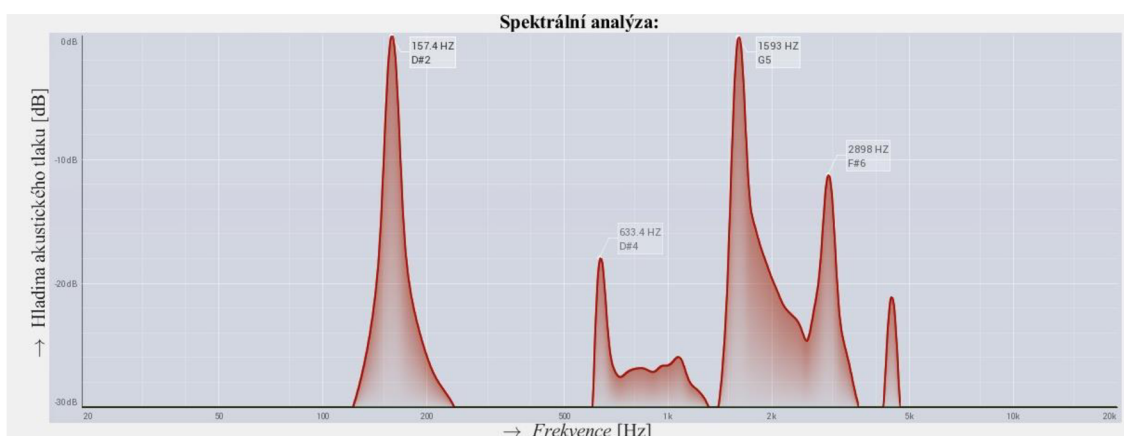
Obr. 34: Spektrum palisandru C s místem úderu v polovině kamene



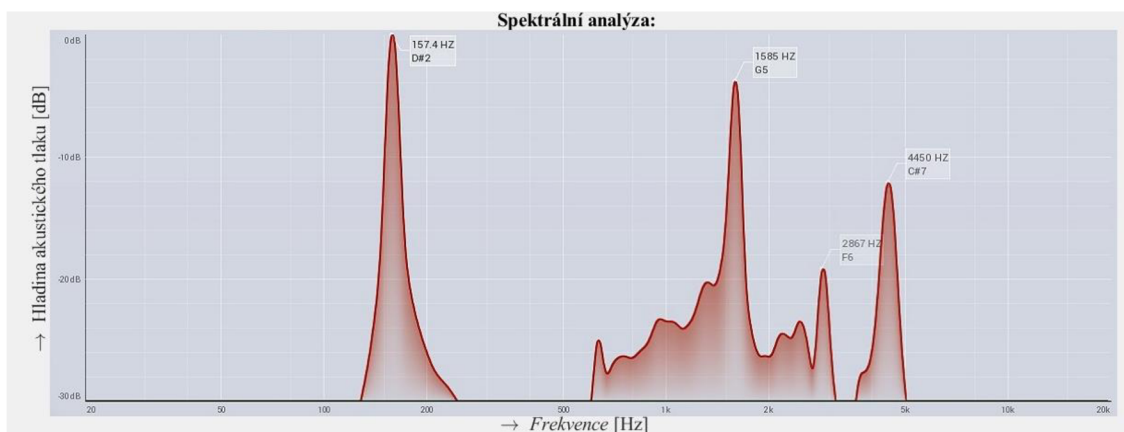
Obr. 35: Spektrum palisandru C s místem úderu ve třetině kamene

Tab. 6: Frekvence palisandrového kamene Dis3

Kámen	Palisandr Dis3			
	Místo	1/2	1/3	bok
f [Hz]	157,4	157,4	157,4	157,5
f [Hz]	633,4	630,9	628,8	630,1
f [Hz]	1593	1585	1588	1593
f [Hz]	-	-	2441	-
f [Hz]	2898	2867	2901	2903
f [Hz]	-	-	-	3533
f [Hz]	4419	4450	4488	4441
f [Hz]	-	-	5766	5751
f [Hz]	-	-	7135	-



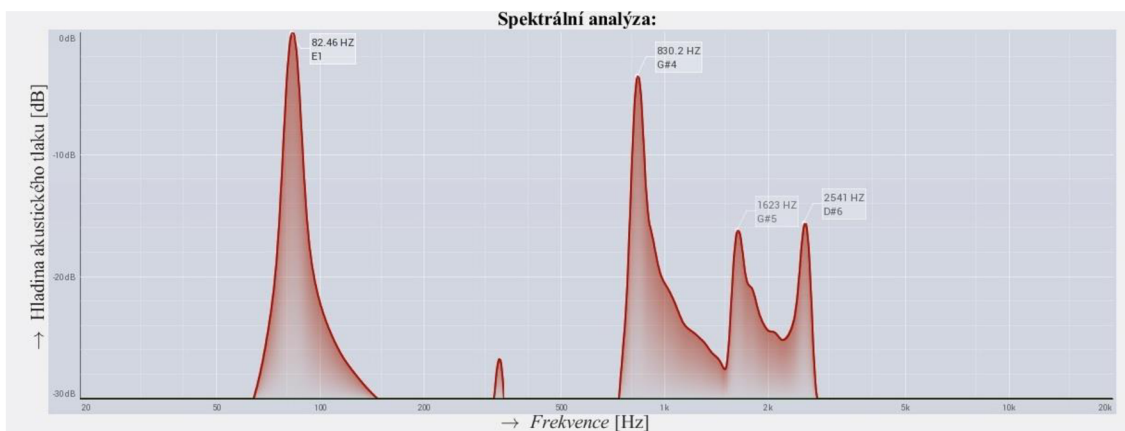
Obr. 36: Spektrum palisandru Dis3 s místem úderu v polovině kamene



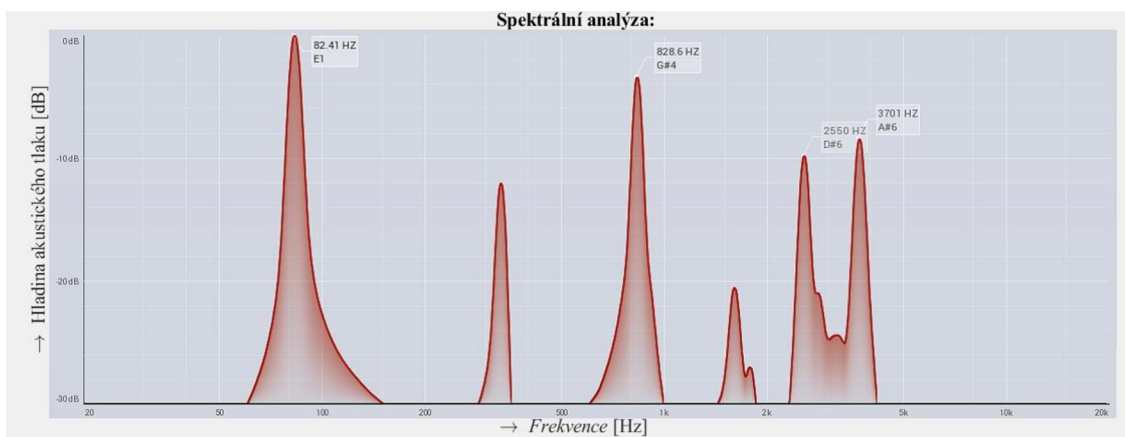
Obr. 37: Spektrum palisandru Dis3 s místem úderu ve třetině kamene

Tab. 7. Frekvence palisandrového kamene E

Kámen	Palisandr E			
	1/2	1/3	bok	čelo
f [Hz]	82,46	82,41	82,47	82,8
f [Hz]	329	330,7	332,1	329,4
f [Hz]	830,2	828,6	830,9	828,7
f [Hz]	1623	1595	1606	1598
f [Hz]	2541	2550	-	2575
f [Hz]	-	-	-	2772
f [Hz]	-	3701	-	3702
f [Hz]	-	-	-	4968
f [Hz]	-	-	-	5762



Obr. 38: Spektrum palisandru E s místem úderu v polovině kamene

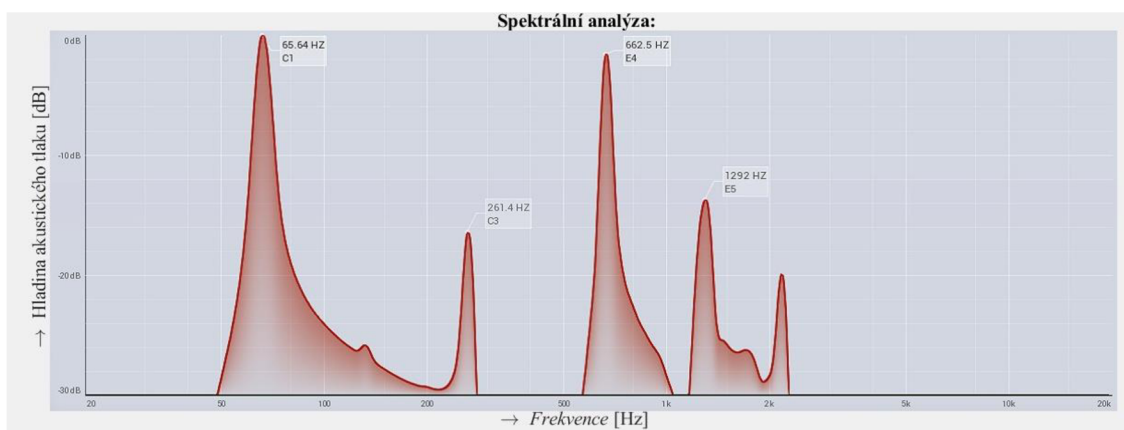


Obr. 39: Spektrum palisandru E s místem úderu ve třetině kamene

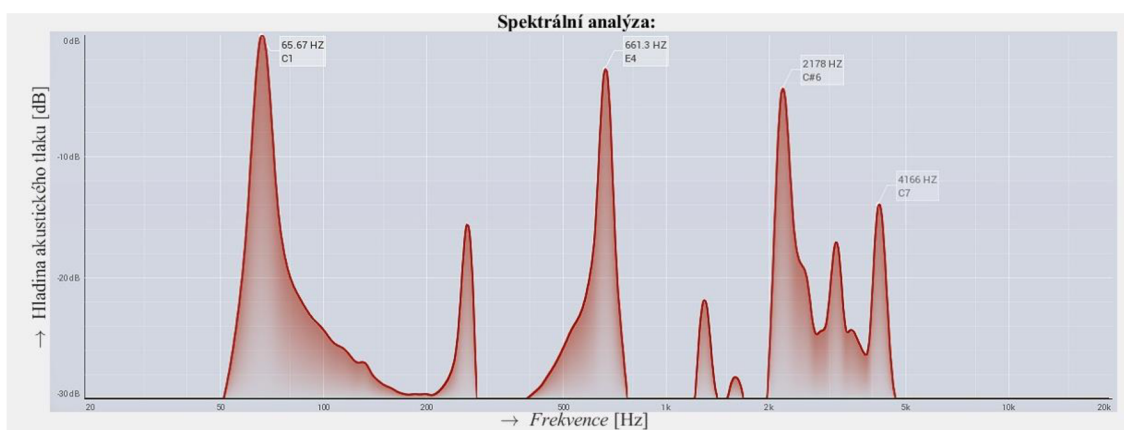


Tab. 8. Frekvence palisandrového kamene C2

Kámen	Palisandr C2 (defektní)			
	1/2	1/3	bok	čelo
f [Hz]	65,64	65,67	65,59	65,5
f [Hz]	261,4	261,1	261,1	263,3
f [Hz]	662,5	661,3	662,5	660,6
f [Hz]	-	-	775	772,1
f [Hz]	1292	1286	1346	1347
f [Hz]	2158	2178	2178	2183
f [Hz]	-	-	2572	2581
f [Hz]	-	3112	3088	3106
f [Hz]	-	-	-	3434
f [Hz]	-	4166	4209	4175
f [Hz]	-	-	4777	4820
f [Hz]	-	-	5740	5615
f [Hz]	-	-	6575	6485
f [Hz]	-	-	-	7746



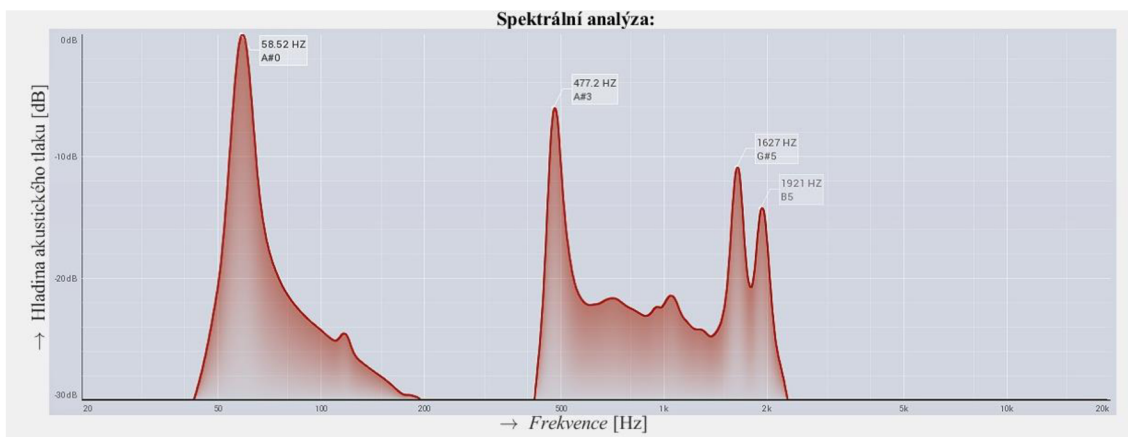
Obr. 40: Spektrum palisandru C2 s místem úderu v polovině kamene



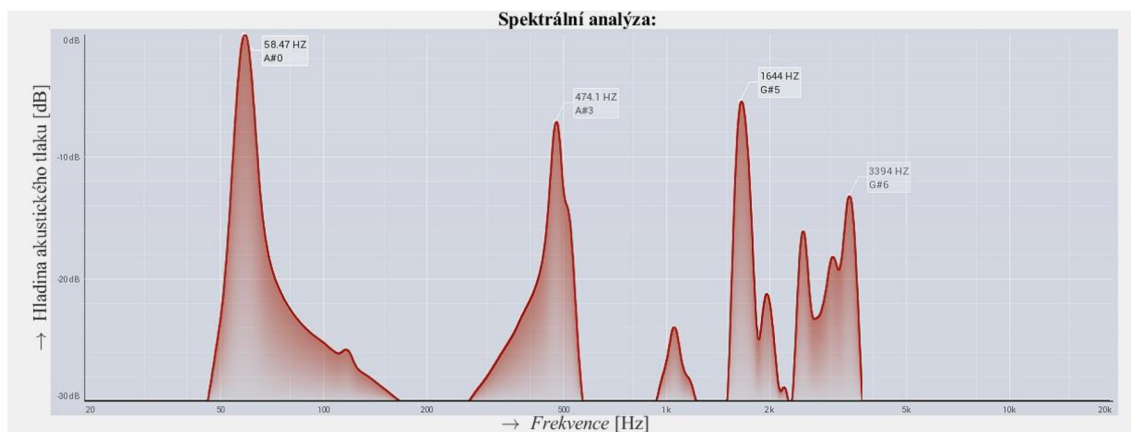
Obr. 41: Spektrum palisandru C2 s místem úderu ve třetině kamene

Tab. 9. Frekvence bukového kamene

Kámen	Buk			
	Místo	1/2	1/3	bok
f [Hz]	58,52	58,47	58,6	59,08
f [Hz]	-	-	-	197,8
f [Hz]	477,2	474,1	478,4	508
f [Hz]	-	1046	975	-
f [Hz]	1627	1644	-	-
f [Hz]	-	-	1724	1738
f [Hz]	1921	1950	-	-
f [Hz]	-	2487	2892	2489
f [Hz]	-	3394	-	3387
f [Hz]	-	-	-	3846
f [Hz]	-	-	4645	4539
f [Hz]	-	-	-	5311
f [Hz]	-	-	-	6428
f [Hz]	-	-	-	8347



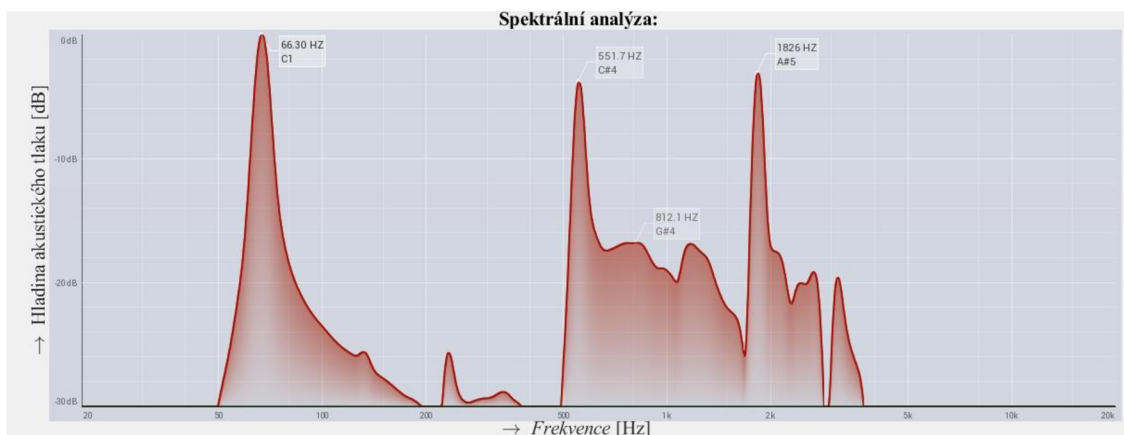
Obr. 42: Spektrum buku s místem úderu v polovině kamene



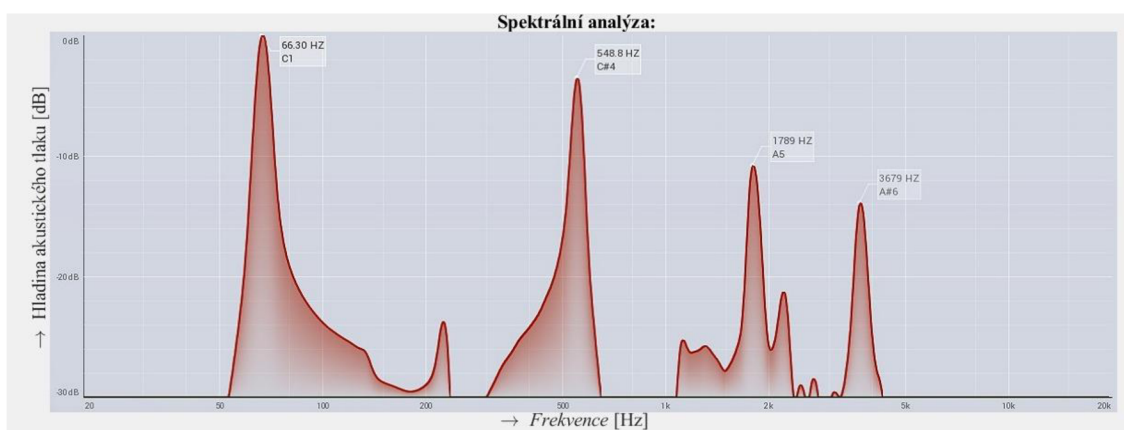
Obr. 43: Spektrum buku s místem úderu ve třetině kamene

Tab. 10. Frekvence světlého dubového kamene

Kámen	Dub světlý			
	1/2	1/3	bok	čelo
f [Hz]	66,3	66,3	66,45	66,28
f [Hz]	231,1	223,2	-	226
f [Hz]	551,7	548,8	547,1	549,7
f [Hz]	-	-	745,7	-
f [Hz]	-	-	1091	1113
f [Hz]	1826	1789	1778	1822
f [Hz]	-	-	2700	2696
f [Hz]	3112	3679	-	-
f [Hz]	-	-	4169	4149



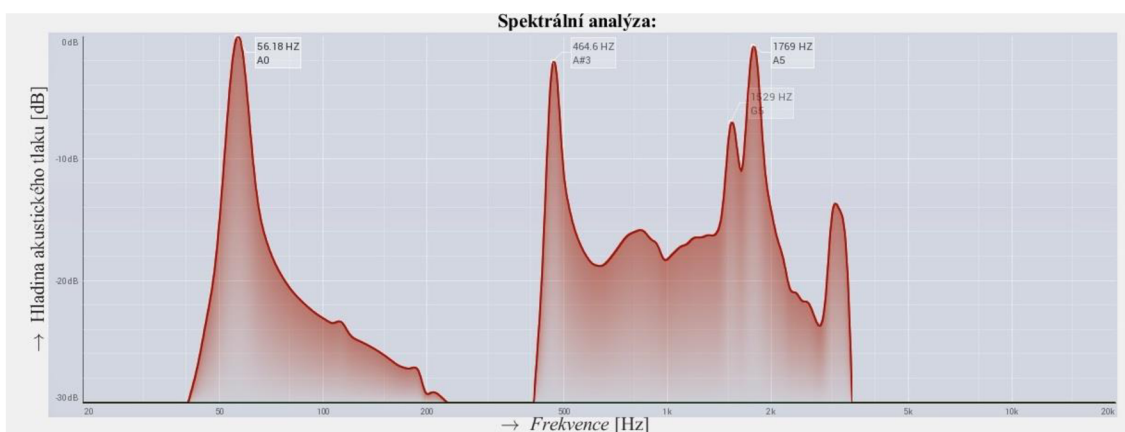
Obr. 44: Spektrum světlého dubu s místem úderu v polovině kamene



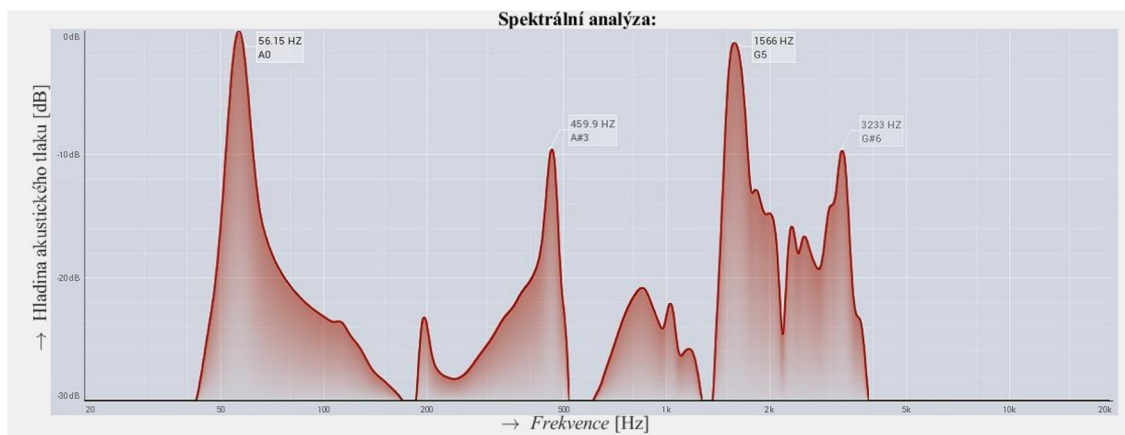
Obr. 45: Spektrum světlého dubu s místem úderu ve třetině kamene

Tab. 11. Frekvence tmavého dubového kamene

Kámen	Dub tmavý			
	1/2	1/3	bok	čelo
f [Hz]	56,18	56,15	56,53	56,23
f [Hz]	-	194,6	-	191,5
f [Hz]	464,6	459,9	465,8	463,4
f [Hz]	-	-	922,8	936,5
f [Hz]	1529	1566	-	1528
f [Hz]	1769	-	1756	-
f [Hz]	-	-	-	2272
f [Hz]	3054	3233	-	3604



Obr. 46: Spektrum tmavého dubu s místem úderu v polovině kamene



Obr. 47: Spektrum tmavého dubu s místem úderu ve třetině kamene

### 8.1.1.1 Chladního obrazce

Při experimentálním vyobrazení Chladního obrazců byl kámen pod místy běžného uchycení podložen dvěma molitanovými kvádry o rozměrech 7x4x4 cm, posypán jemnou vrstvou krupice a paličkou několikrát jemně udeřen do jeho středu. Na všech kamenech se tímto způsobem podařilo vykreslit uzlové čáry fundamentu. Ty korespondovaly s vyvrtanými dírami pro uchycení kamene provázkem. U některých kamenů byly čáry tenké a jasné. Čáry jiných kamenů nebyly natolik precizně vykreslené, a to bez ohledu na větší množství úderů. Tento jev souvisí s kvalitou kamene.



*Obr. 48: Podložení palisandrového kamene*



*Obr. 49: První ohybový mód vybuzený paličkou, palisandr Dis3*



*Obr. 50: První ohybový mód vybuzený paličkou, palisandr C2 (defektní)*

Při dalším pokusu o vyobrazení Chladniho obrazců byl pro rozvibrování palisandrového kamene E využit reproduktor, přiložený velmi blízko ke kameni. Kámen byl opět položen na molitanových kvádrech. K jeho dostatečnému rozkmitání bylo nezbytné s reproduktorem pohybovat po celé délce kamene. Pro vykreslení uzlů prvního ohybového módu byla na generátoru nastavena frekvence fundamentu (82,5 Hz). Pro vykreslení dalších uzlů pak nastavené dané frekvence, avšak kromě druhého ohybového módu (165 Hz) se zbylé obrazce dalších módů vykreslit nepodařilo, patrně vinou nedostatečné kvality technického zázemí.



*Obr. 51: První ohybový mód vybuzený reproduktorem*



*Obr. 52: Druhý ohybový mód vybuzený reproduktorem*

### 8.1.2 Kameny konstantního průřezu

Vzhledem k pravidelnému geometrickému tvaru bylo v tomto případě snazší určit hustotu ze změřených rozměrů a hmotnosti.

Tab. 12: Rozměry kamenů z různých materiálů, vypočítaný objem a hustota

Vzorek	d [m]	š [m]	tl [m]	V [m <sup>3</sup> ]	m [g] (± 0,2g)	ρ [kg/m <sup>3</sup> ]
<b>Lignamon 1</b>	0,593	0,07	0,03	0,001245	979,8	786,798
<b>Lignamon 2</b>	0,73	0,07	0,035	0,001789	1940,8	1085,155
<b>Habr</b>	0,73	0,07	0,035	0,001789	1328,2	742,634
<b>Buk</b>	0,73	0,07	0,035	0,001789	1137,6	636,064
<b>Silon</b>	0,618	0,072	0,027	0,001201	1301,6	1083,410

V předpokládaném místě uzlu, tedy přibližně ve 22 a 77 % délky, byly vzorky podloženy molitanem a podle předchozího postupu vyobrazení Chladního obrazců prvního ohybového módu bylo pak místo uzlu definováno přesněji. U všech kamenů byly pak úderem v polovině a třetině zaznamenány a určeny frekvence rezonančních módů.

Tab. 13: Frekvence kamenů konstantního průřezu

Vzorky	f1	f2	f3	f4	f5
<b>Lignamon 1</b>	376,8	996,1	1841	2833	-
<b>Lignamon 2</b>	324,1	830,2	1484	2198	-
<b>Habr</b>	327,9	857,5	1583	2409	-
<b>Buk</b>	319,5	829,3	1536	2343	-
<b>Silon</b>	114,7	313,9	615,3	995,5	1442

Pomocí přístroje FAKOPP Ultrasonic Timer byla u všech vzorků změřením latence impulsu mezi dvěma elektrodami, na známých délkách, určena rychlost šíření zvuku v podélném a příčném směru, což u dřevěných vzorků znamenalo podél a kolmo na vlákna. Z takto změřených rychlostí byl poté vypočítán Youngův modul pružnosti.

Tab. 14: Youngův modul pružnosti a rychlost šíření zvuku v kamenech

Vzorek	Modul pružnosti $E$ [MPa]		Rychlost zvuku $c$ [m.s <sup>-1</sup> ]		$\frac{c_{\parallel}}{c_{\perp}}$
	$E_{\parallel}$	$E_{\perp}$	$c_{\parallel}$	$c_{\perp}$	
<b>Lignamon 1</b>	14797	1237	4323,5	1250	3,45
<b>Lignamon 2</b>	25503	971	4843,1	945	5,12
<b>Habr</b>	17914	2069	4904,4	1666,6	2,94
<b>Buk</b>	14580	1780	4769,7	1666,6	2,86
<b>Silon</b>	2313	5485	1461	2250	0,64

Pro sjednocení vlhkosti dřev byly vzorky na čtyři týdny umístěny do klimatizované místnosti s teplotou 20°C a vlhkostí 65%. Poté proběhla stejná měření. Díky tomu lze sledovat vliv vlhkosti na hmotnost a hustotu čímž dojde ke zpomalení rychlosti šíření zvuku a snížení frekvencí rezonančních módů.

Tab. 15. Hmotnost, hustota a frekvence vzorků po ustálení

Vzorky	m [g]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Frekvence [Hz]				
			f1	f2	f3	f4	f5
<b>Lignamon 1</b>	986	791,616	375,4	991,3	1832	2791	-
<b>Lignamon 2</b>	1945	1087,28	323,6	831,1	1486	2204	-
<b>Habr</b>	1332	744,758	327,7	859,5	1584	2415	-
<b>Buk</b>	1146	640,872	318,7	828,2	1532	2344	-
<b>Silon</b>	1302	1083,41	114,4	313,6	608,6	994,3	1441

### 6.1.3 Ladění kamenů

Na dřevěných kamenech stejné délky byla vyznačena procenta délky, jež sloužila k orientaci. Poté byl broušením na fréze u jednotlivých kamenů postupně ubírán materiál z určitých oblastí a po každé změně provedena kontrola frekvenčního spektra. Tímto způsobem byl získán velmi přesný přehled závislosti změny frekvencí módů na odebírané oblasti. Díky tomu šlo kámen ladit.

Pro ladění kamene byly vytyčeny dva cíle. Naladit fundament na celý tón s minimální odchylkou a co nejpřesněji dodržet požadované intervaly ostatních frekvencí. K tomu byla v Excelu vytvořena ideální varianta, jež po zadání fundamentu vypočítá požadované frekvence odpovídající intervalům temperovaného ladění, tedy:

$$f_1 : 3,9584 \cdot f_1 : 10,6726 \cdot f_1 : 19,1693 \cdot f_1 : 27,0238 \cdot f_1.$$

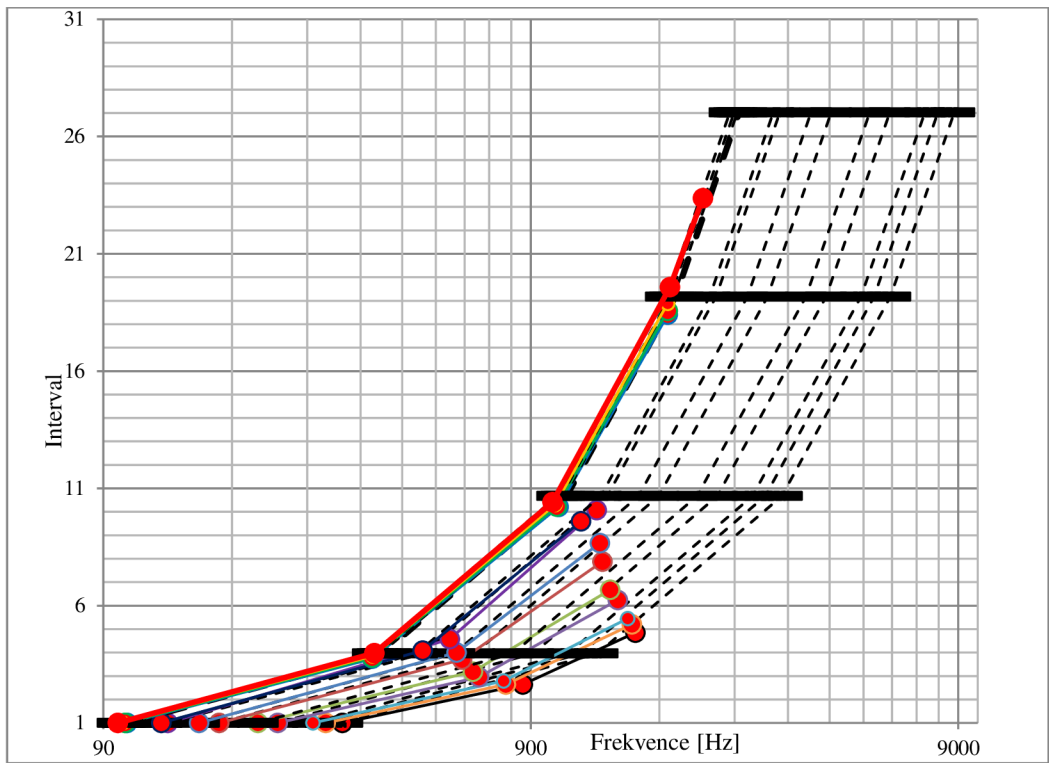
Po každé změně fundamentu bylo přesně patrné, jak vzdálené jsou ostatní frekvence od požadovaných ideálů. Pro názornost jsou průběh celého ladění, odebírání oblastí kamene a přesnost výsledku vloženy do grafů.

Tab. 16. Frekvence vzorků po naladění

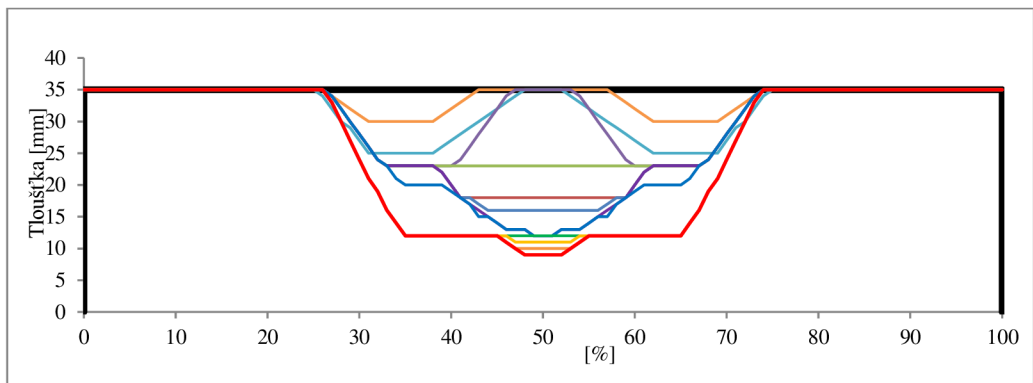
Vzorek	f1	f2	f3	f4	f5
<b>Habr</b>	97,3	387,3	1013	1905	2274
<b>Buk</b>	97,1	383,9	996,8	1896	-
<b>Lignamon</b>	97,6	402,6	1016	1764	2536

Barva výřezu odpovídá barvě frekvenční řady. V grafu průběhu ladění jsou ideální intervaly zobrazeny přerušovanou černou čarou. Červené body jsou získané frekvence. Na těchto grafech je evidentní rozšiřování intervalů až do konečného stavu, zobrazeného červeně.

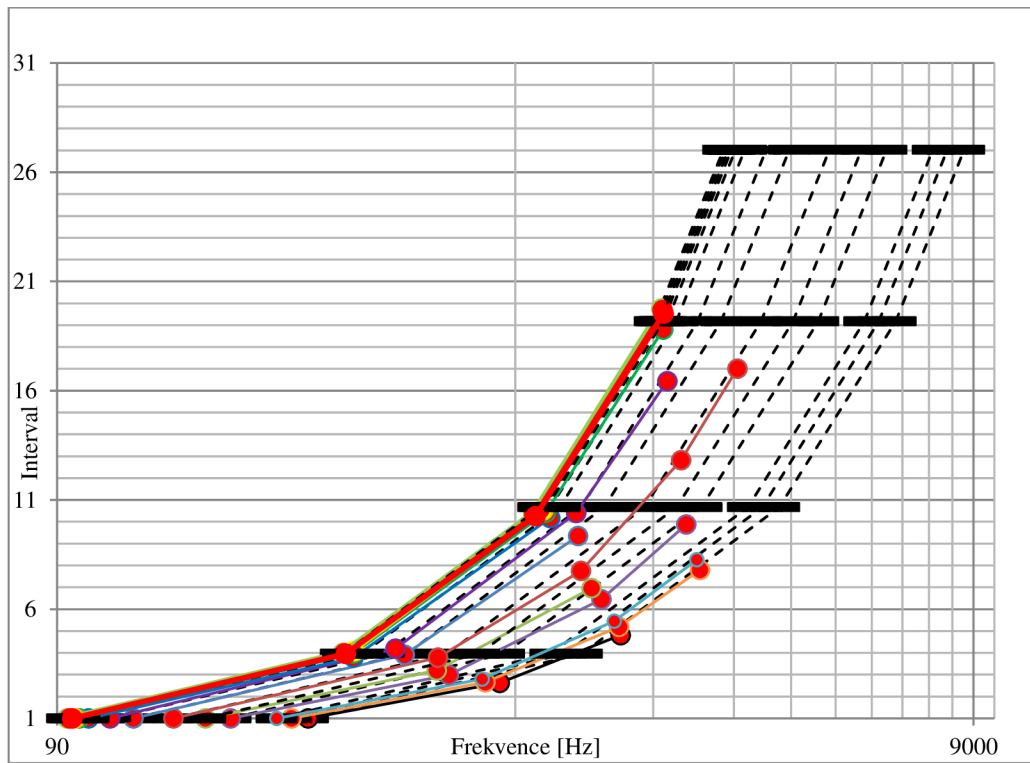




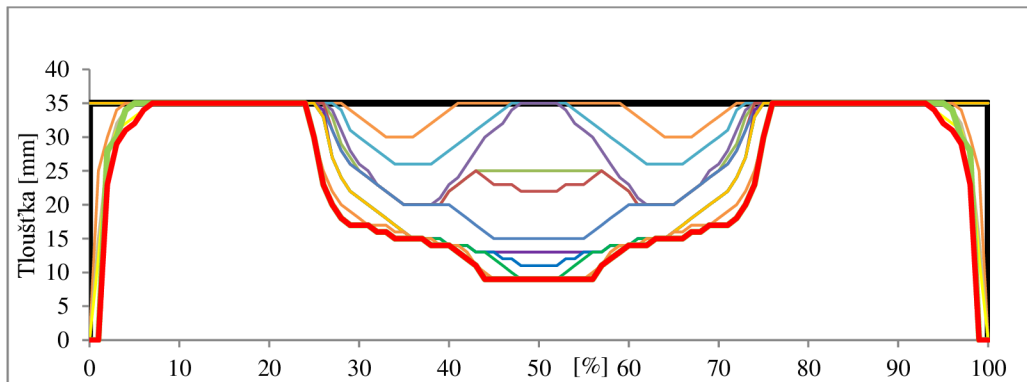
Obr. 53: Průběh ladění habru



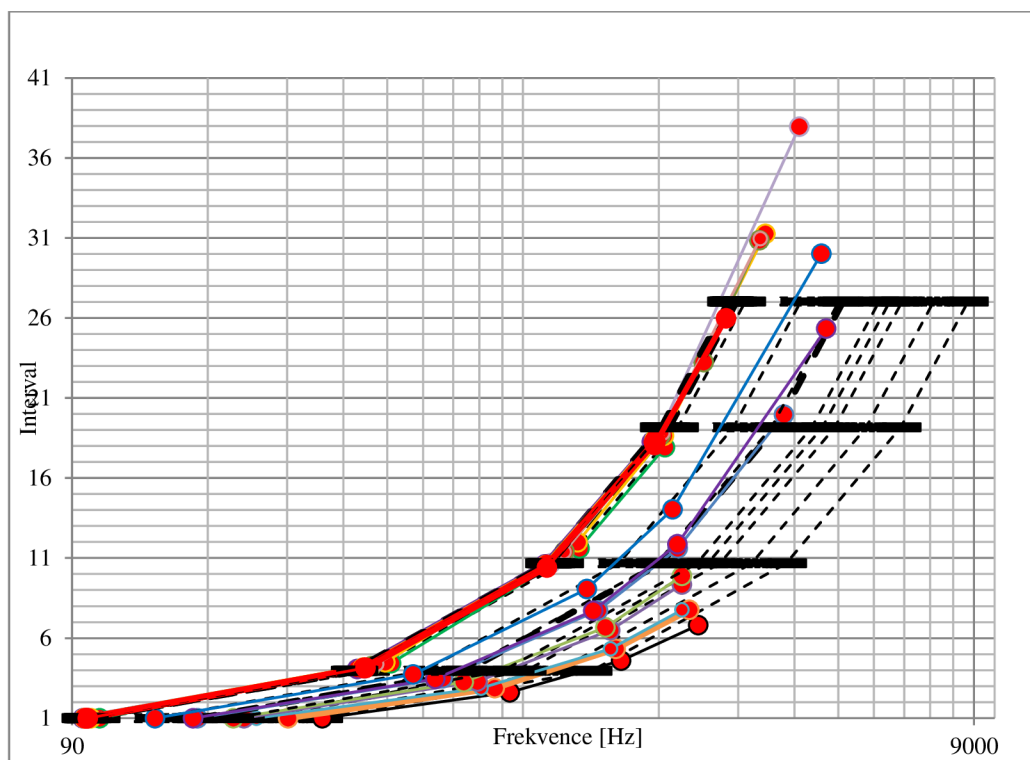
Obr. 54: Výřez habru



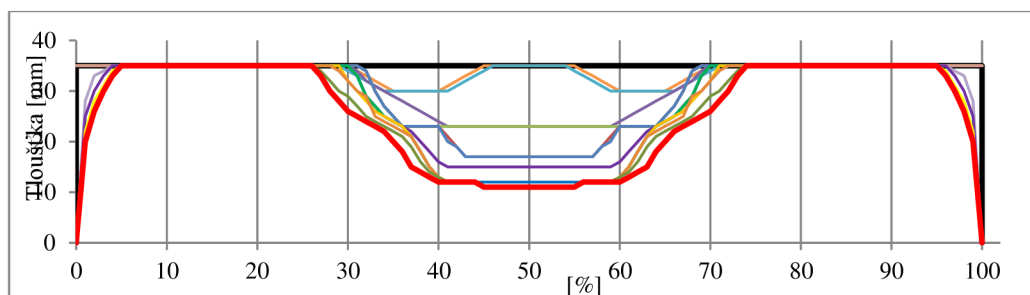
Obr. 55: Průběh ladění buku



Obr. 56: Výtřez buku

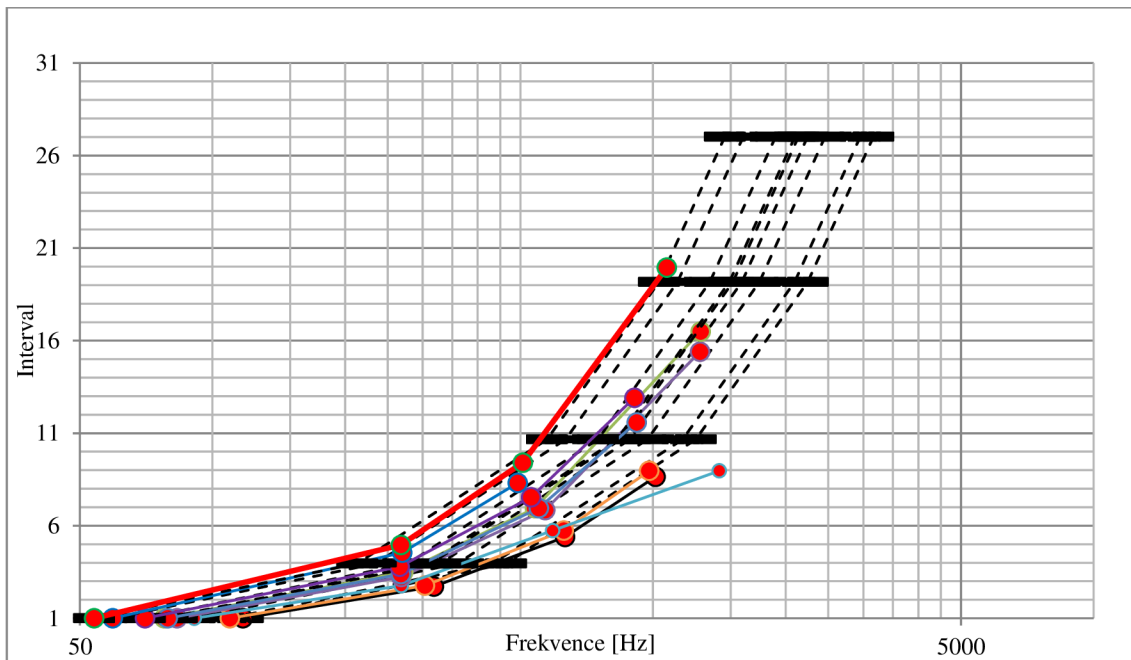


Obr. 57: Průběh ladění lignamonu

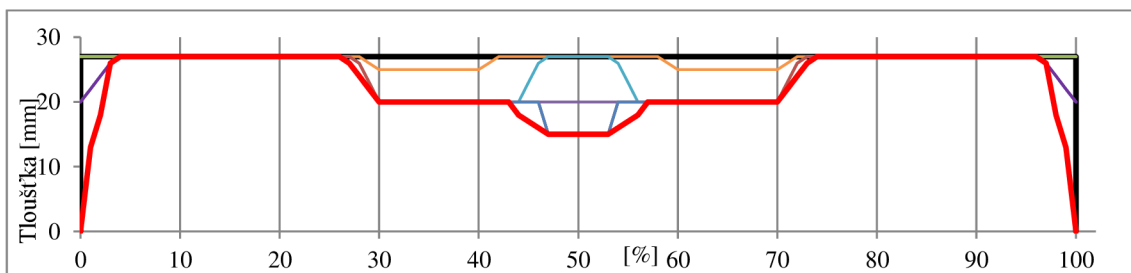


Obr. 58: Výřez lignamonu

Stejný postup byl aplikován i na silonový kámen. Ten sice ze začátku vykazoval podobný průběh zvětšování intervalů frekvencí, ale s každou další úpravou se amplitudy rezonančních frekvencí snižovaly, až se staly téměř nezřetelnými oproti ostatním. V praxi to znamená degradaci zvuku téměř na hluk. Srovnatelné výsledky pak vykazoval i polyetylenový kámen o hustotě  $953,6 \text{ kg/m}^3$ .



Obr. 59: Průběh ladění silonu



Obr. 60: Průběh ladění silonu

### 8.1.3 Rezonátory

Pro ověření teoretické části, týkající se rezonátorů, byl prozkoumán vliv materiálu, délky a rozdílné ucpávky konce rezonanční trubice na barvu tónu.

Materiály rezonátorů:

- ocelová trubice (vnitřní průměr = 4,2 cm, tloušťka stěny = 0,2 cm)
- novodurová trubice (vnitřní průměr = 4,5 cm, tloušťka stěny = 0,2 cm)
- mirelonová izolační trubice (vnitřní průměr = 5,2 cm, tloušťka stěny = 1 cm)

Ty byly zavěšeny na speciální, pro tento účel zkonstruovanou, kovovou konstrukci. Všechny tři materiály, ve dvou různých délkách, byly délkou naladěny na frekvence palisandrového kamene E, podle vzorce (7). Dlouhá trubice o délce 104 cm, odpovídající frekvenci 82,5 Hz a krátká 52 cm odpovídající 165 Hz.



*Obr. 61: Rezonátory: a) ocel, b) novodur, c) mirelon*

U všech rezonátorů, při různých ucpávkách, byly mikrofonem nasnímány dva typy vzorků. Pro mikrofon nahoře, tedy z boku kamene, v místě u horního otvoru rezonátoru a pro mikrofon dole, u spodního otvoru rezonanční trubice. Vzorky z boku kamene korespondují s vyzařováním v místě stojícího hráče. U vzorků spodního ústí rezonátoru byly sledovány frekvence nejvýrazněji prostupující danou ucpávkou. Ty pak v kombinaci s přímo vyzářenými frekvencemi z horního konce trubice dotvářejí celkový tón kamene pro posluchače.

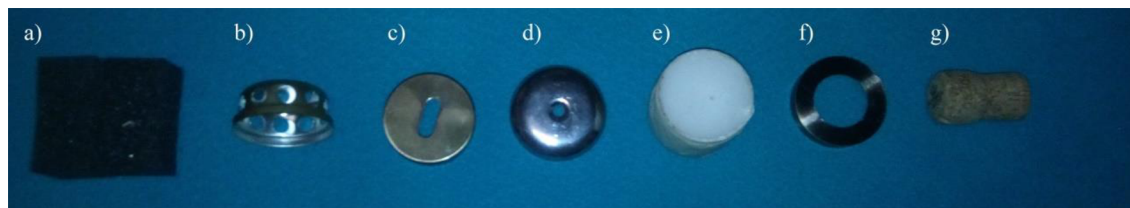


*Obr. 62: Příklad snímání v blízkosti kamene a ocelového rezonátoru*

Výsledně se frekvence při oněch dvou umístěních mikrofonu lišily převážně hlasitostí, takže je v tabulce zaznamenána jejich výsledná kombinace.

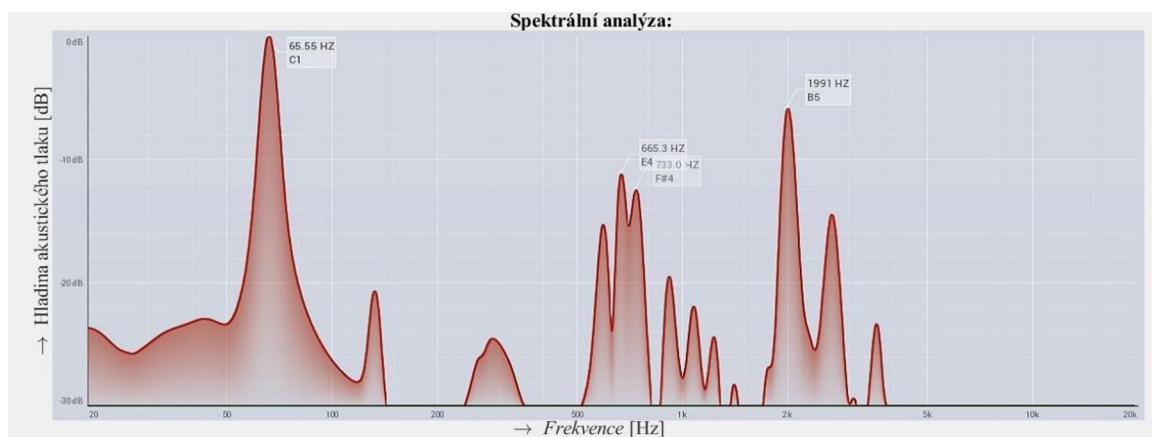
Jako experimentální ucpávky byly zvoleny dostatečně odlišné předměty jako: vosková svíce, molitan, korková zátka. Tyto trubici zcela ucpaly a díky jejich různým pohltivým a odrazivým vlastnostem měly jako ucpávky odlišný charakter.

Dále byly otestovány plechové kryty s různými průměry otvorů v jejich středu. Také bylo vyzkoušeno tenké plechové víčko svíčky, jež má otvory po stranách. U těchto plechových krytů, které zcela neuzavřely trubici, proběhlo pozorování vlivu velikosti, tvaru a místa otvoru na celkový tónbr.



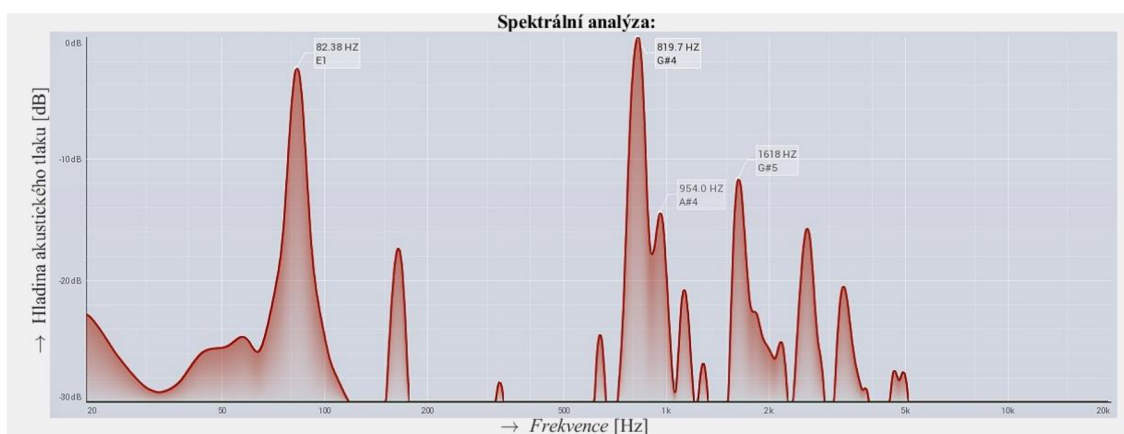
Obr. 63: Ucpávky: a) molitan, b) víčko, c) oválný otvor, d) min. otvor, e) svíce, f) max. otvor, g) korek

Při některých ucpávkách docházelo vlivem zkrácení či prodloužení trubice k jejímu rozladění podle vzorce (8), což kvůli zachování jednotných délek trubic pro další pokusy nemohlo být ovlivněno. Pro obsáhlost naměřených dat jsou jejich tabulky v příloze diplomové práce. Jako příklad jsou uvedeny pouze některé grafy, na nichž je patrný rozdíl ucpávek a materiálu. Pro zajímavost je uvedeno i spektrum palisandru C s rezonátorem pro E. To je totiž další možnost inovace barvy zvuku. Použití kamenů na rezonátory, délkou odpovídající jiným kamenům. Efekt je spíše negativní.

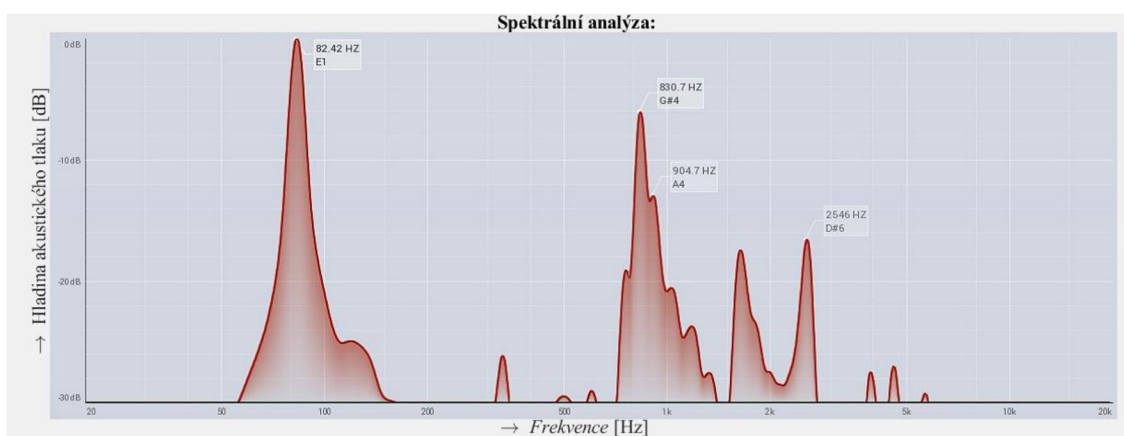


Obr. 64: Spektrum kamene C s rezonátorem E

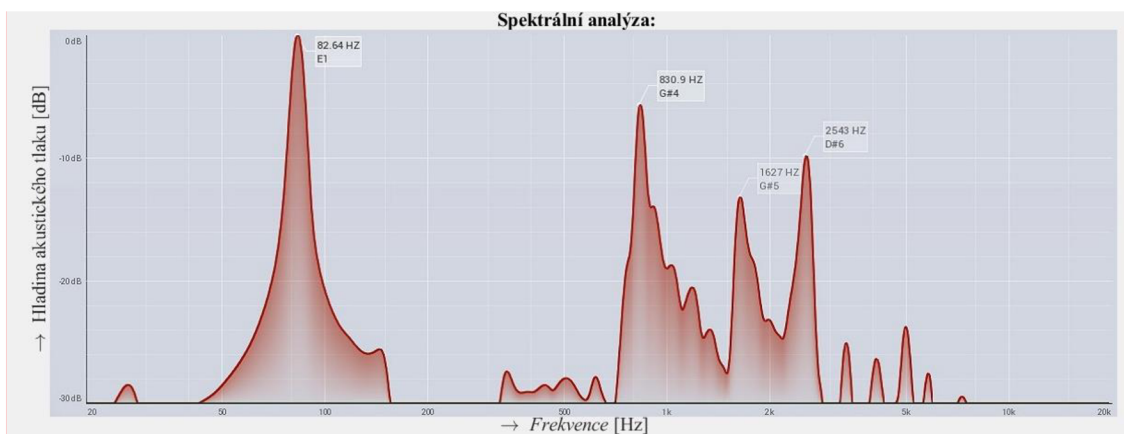
Jako příklad vlivu ucpávek na spektrum uvedena pouze dlouhá ocelová trubice.



*Obr. 65: Spektrum bez ucpávky*

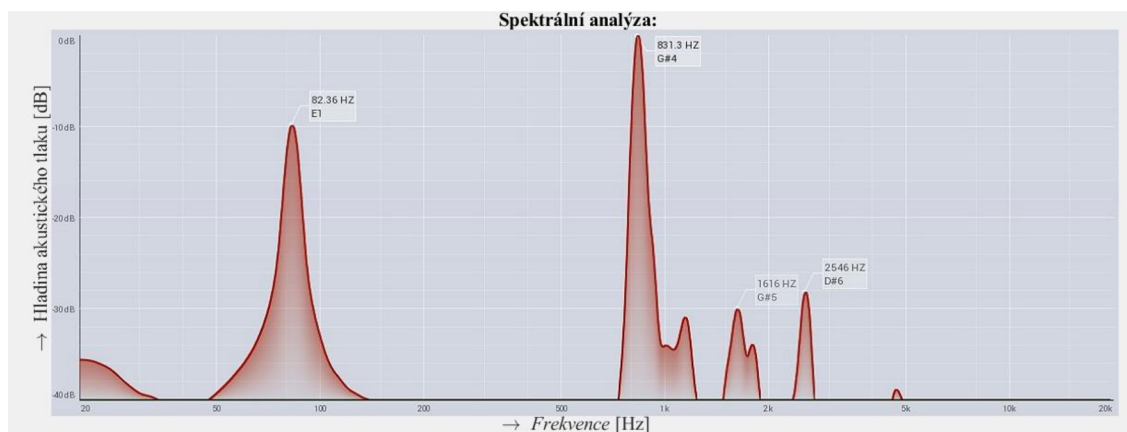


*Obr. 66: Spektrum s korkovou ucpávkou*

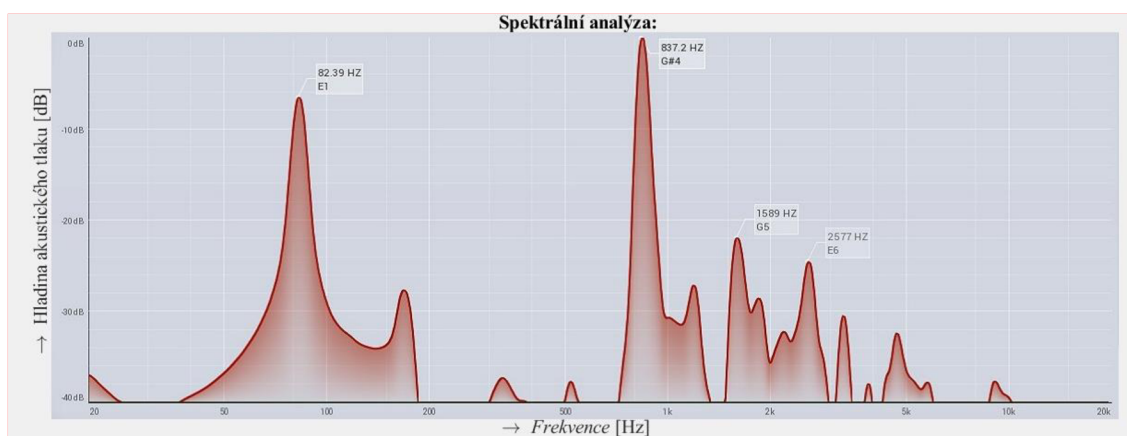


*Obr. 67: Spektrum s plechovou ucpávkou s oválným otvorem*

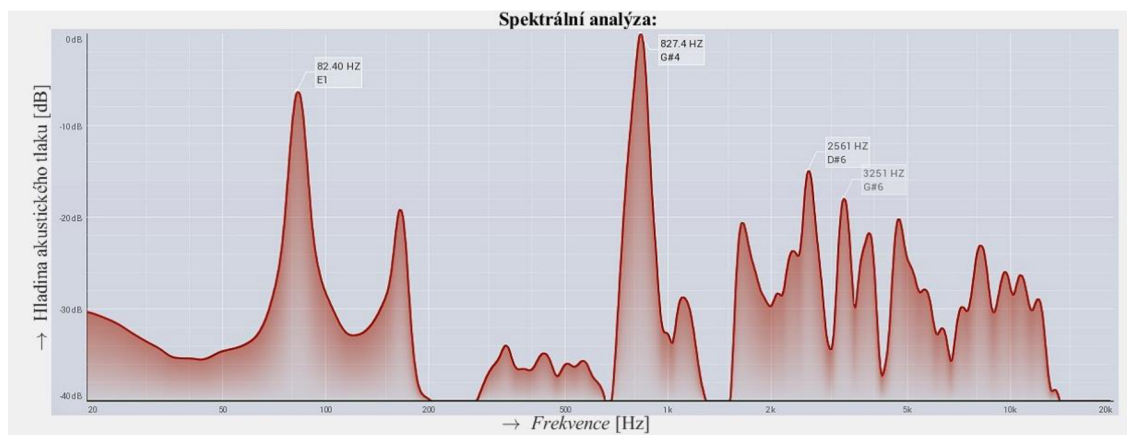
Jako příklad rozdílů materiálů uvedena pouze krátká trubice, ucpávka svíce.



Obr. 68: Spektrum krátké ocelové trubice



Obr. 69: Spektrum krátké nirové trubice



Obr. 70: Spektrum krátké mirlonové trubice



## 9 DISKUSE

### 9.1 Kameny

#### 9.1.1 Vybroušené kameny

Z uvedených dat a grafů lze vyčíst frekvenční změny pro různá místa úderu. Zároveň je patrné i bohatší spektrum palisandrových kamenů oproti kamenům dubovým a bukovému.

Při určování kvality kamenů lze vycházet z tabulkových hodnot frekvencí tónů. Palisandrové kameny korespondují svým názvem (tónem) s frekvencí fundamentu. Sice je zvláštní, že defektní C a C2 obsahují podobné frekvence, včetně základní, ale jejich výrobce není uveden a tudíž se může jednat o kameny stejného tónu, různých marimb, kde C2 může značit pořadové číslo, nikoliv tónové označení.

U dubu, buku a palisandru C2 je pak zajímavé, vzhledem k jejich proporční podobnosti, porovnat frekvenční rozdíly, vznikající převážně odlišností materiálu. Ze samé podstaty problému nelze předpokládat, že budou dřeva s různou hustotou vykazovat stejné akustické vlastnosti, budou-li upravena na stejný tvar v poměru 1:1.

Veškeré odchylky od předpokládaných hodnot jsou způsobeny nedostatečným naladěním, tedy nevhodným vybroušením oblouku. U palisandrových kamenů je tendence požadovaného poměru frekvencí velmi přesná pro čisté ladění. U dubu a buku jsou pak reálné hodnoty od předpokládaných dosti vzdálené.

U palisandrového kamene C2 se úderem z boku a čela podařilo zaznamenat první podélný mód s frekvencí kolem 777 Hz, odpovídající uvedenému předpokladu, přibližně dvanáctinásobku fundamentu.

Lze uvést, že i subjektivně obsahují palisandrové kameny mnohem bohatší a plnější témb. Také jejich doba dozvuku byla výrazně delší, než u kamenů dubových a bukového. Ty byly celkově málo výrazné a tiché.

#### 9.1.2 Kameny konstantního průřezu

Vyobrazení uzlových čar fundamentu na nevybroušených kamenech je, vzhledem k jejich slabému kmitání, podstatně náročnější a méně ostré než na kamenech vybroušených. Silon měl, oproti dřevu, vyobrazení výrazněji rozostřené.

Porovnáním výsledků před a po ustálení vzorků je patrné, že dřevěné vzorky jsou oproti silonu ovlivněny vlhkostí, avšak nejedná se zde o zásadní změny.

Celkový výsledek měření kamenů s konstantním průřezem je pak velmi překvapivý. Při stejném měření všech vzorků vyšlo najevo, že dřevěné vykazují jiný poměr frekvencí módů, než je uváděno v literatuře. Silon má k těmto poměrům nejbliže.

Tab. 17: Poměry frekvencí vůči fundamentu

Intervaly k f1	f2	f3	f4	f5
<b>Teoretické</b>	<b>2,756</b>	<b>5,404</b>	<b>8,933</b>	<b>13,345</b>
<b>Lignamon 1</b>	2,641	4,880	7,435	-
<b>Lignamon 2</b>	2,568	4,592	6,811	-
<b>Habr</b>	2,623	4,834	7,370	-
<b>Buk</b>	2,599	4,807	7,355	-
<b>Silon</b>	2,741	5,320	8,691	12,596

Možná příčina odlišnosti výsledků dřeva od předpokládaných výsledků uváděných v literatuře je ta, že autor pracuje s fyzikálním modelem vztaženým k homogenním materiálům (ocel, hliník, měď, sklo), čímž získává výsledky s menším rozptylem pro daný materiál, kdežto dřevo je nehomogenní a anizotropní.

Vzhledem k následnému ladění kamene přesným upravením intervalů, nelze již v této části vyvodit závěr o vhodnosti některého vzorku pro stavbu marimby, nicméně je zajímavá skutečnost vyššího počtu frekvencí u silonu.

### 9.1.3 Ladění kamenů

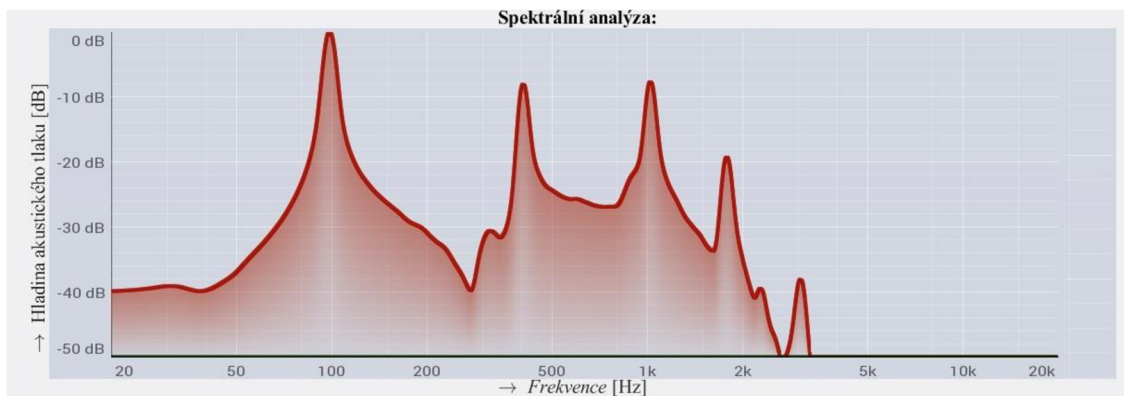
V části ladění byl na všechny dřevěné vzorky aplikován stejný postup ladění. Čím vyšší měl vzorek hustotu, tím hůře se odbrušoval. Nakonec všechny dosáhly velmi podobných rozměrů i frekvencí.

Předpokládá se možnost dalšího vyladění, dokonce až do splnění ideálních poměrů frekvencí, ale kvůli zachování vzorků pro další výzkum Mendelovy univerzity v Brně musely být vzorky laděny velmi opatrně, aby nedošlo k překročení hranice, kdy již vzorek nejde doladit žádným způsobem. Z tohoto důvodu nebyl využit plný potenciál kamene, kterého bylo možno dosáhnout dalším ztenčením středu a zvětšením oblouku. Lze však konstatovat, že i úpravy kamene v aplikovaném rozsahu splňují nastavené cíle, totiž: naladit kameny na stejný tón, s co nejmenší odchylkou (G1: habr = -12 centů, buk = -15 centů, lignamon = -7 centů) a s co nejpřesnějším dodržáním frekvenčních poměrů.

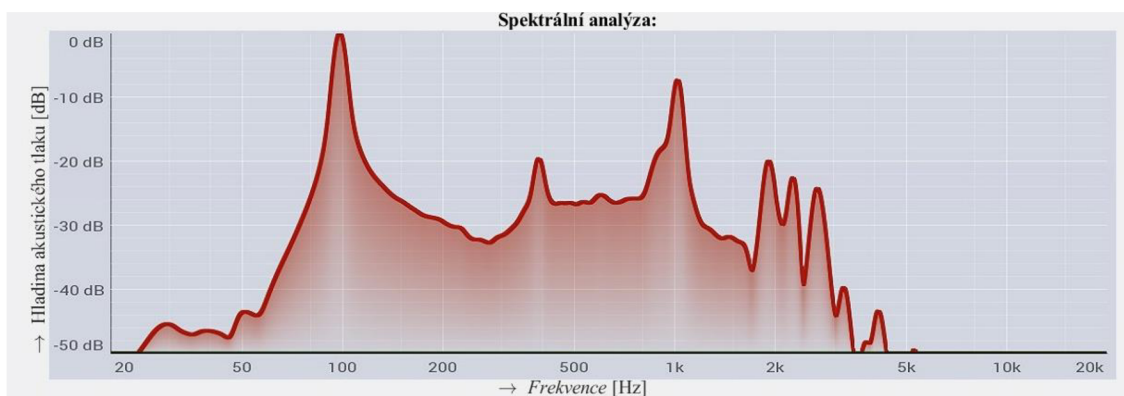
Tab. 18: Poměry naladěných frekvencí vůči fundamentu

Intervaly k f1	f2	f3	f4	f5
<b>Teoretické</b>	<b>3,9584</b>	<b>10,6726</b>	<b>19,1693</b>	<b>27,0238</b>
<b>Lignamon 2</b>	4,125	10,410	18,074	25,984
<b>Habr</b>	3,980	10,411	19,579	23,371
<b>Buk</b>	3,952	10,263	19,520	
<b>Silon</b>	4,968	9,396	19,944	

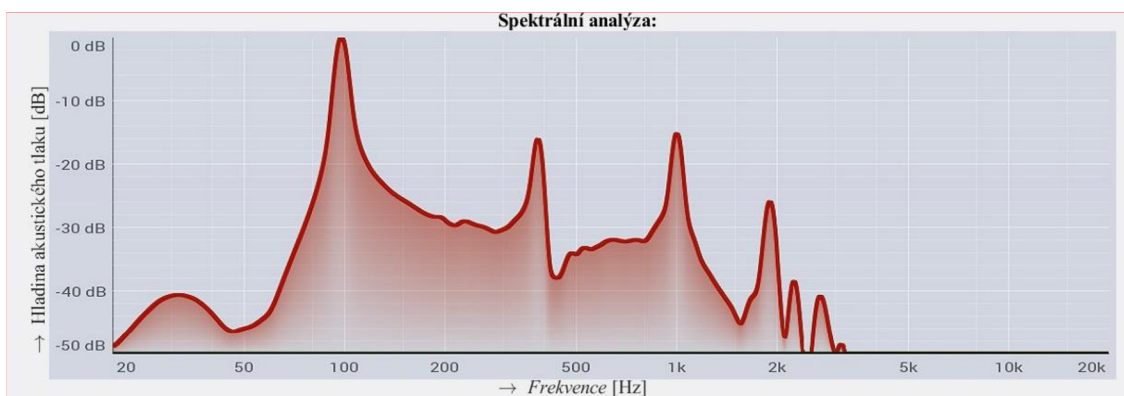
Splnění těchto podmínek samo o sobě nevypovídá o kvalitě dřeva, neboť se ukázalo, že při dostatečné preciznosti lze kontrolovat frekvence v rámci desetin Herzů. Výsledky tedy svědčí o tom, že základní ladění lze provést téměř na libovolném dřevě. Co však o kvalitě marimbových kamenů vypovídá, je narůstající počet vyšších frekvencí, jež postupem ladění zvyšují amplitudu, čímž se barva kamene stává výraznější, plnější a samozřejmě hlasitější.



Obr. 71: Spektrum lignamonu



Obr. 72: Spektrum habru



Obr. 73: Spektrum buku

Při porovnání spekter naladěných kamenů je patrné, že rezonanční frekvence lignamonu vykazují větší diskretnost a lze tedy tvrdit, že lignamon je z těchto tří vzorků nejvhodnější. Silonový kámen se během ladění tavil, což může být jednou z příčin výsledného neúspěchu. Další možností je narušení jeho struktury a výsledná změna chování. V každém případě došlo během ladění k degradaci z počátku slibného kamene.

Pro rozšíření poznatků o vhodnosti plastů byl otestován též malý polyetylenový kámen, jenž byl hustotou podobný silonu a během ladění vykázal srovnatelnou degradaci. Z takto získaných zkušeností lze vyloučit silon a polyetylen pro marimbové kameny charakteristického tvaru a zvuku.

## 9.2 Rezonátory

Je evidentní, že frekvence, zastoupené ve všech případech, jsou platné pro předpokládanou charakteristiku rezonátoru, jenž délkou vykazuje naladění pro zesílení hlavních frekvencí daného kamene. Také je zde samozřejmě velké zastoupení frekvencí přímo z kamene. Často objevující se frekvence, které vykazoval i kámen bez rezonátoru, byly očekávatelné a zajímavá je jejich absence v případech některých ucpávek či materiálů rezonátorů. Pro nově vznikající frekvence pak jednoznačně platí jejich závislost na daném materiálu či ucpávce. Použitelnost v praxi lze v některých případech poslechem zavrhnout již nyní, ale pro posouzení zbývajících je potřeba vyhodnotit jejich vhodnost pro různá použití. Z poslechu je jasně patrná odlišná délka rezonátorů s podporou fundamentu nebo oktávového násobku.

Nejzajímavější poznatky z hlediska rozdílů ucpávek:

- Pokud byla trubice prázdná, vykazovaly ocel a plast poměrně velkou míru rozladění. U mirelonu toto rozladění tolik patrné nebylo.
- Molitanová ucpávka dle očekávání část zvuku pohltila a způsobila tak tichý a nevýrazný tón. Nejpatrnější to bylo v basech. V kombinaci s dlouhou mirelonovou trubicí sice také způsobila ztrátu basů, ale celkově byla vysoká část spektra jasnější než v případech kombinace molitanu a ostatních trubic.
- Korková zátka působila nejzajímavěji. Celkový dojem bylo bohaté spektrum s lehkým úbytkem basů. V tomto případě však kombinace s mirelonem nefungovala a vykazovala mnohem horší vlastnosti, než u trubice ocelové či plastové.
- Vosková svíce zafungovala jako nejefektivnější ucpávka z hlediska podpory oktávových rozdílů. V případě ostatních ucpávek u krátkých rezonátorů byla zřetelná i základní frekvence. V tomto případě snad nikdy nebylo pochyb, zda se jedná o dlouhou či krátkou trubicí, protože požadovaná frekvence byla nejvýraznější ze všech a u krátkých trubic byl fundament mnohem méně zřetelný.

Obecně lze říci, že ucpávky oproti sobě sice vykazovaly jisté rozdíly, ty ale byly zanedbatelné v celkovém porovnání vlivu jakékoliv ucpávky na barvu tónu, oproti rezonátoru bez ucpávky.

Z hlediska materiálu rezonátoru:

- Ocel se jeví jako nejlepší volba s jasným témbrem.
- Novodur byl rozhodně nejhorším materiálem pro rezonátor. Dlouhá trubice vykazovala nejčastější rozladění. Krátká by pak mohla být v případě svíčky či plechových krytů akceptovatelná, ale celkový dojem z plastového rezonátoru je negativní.

- Mirelon naopak velmi překvapil, protože vynikl výrazně odlišnými vlastnostmi, než ocel a plast. V některých případech byl z předchozích zkušeností očekáván úbytek basů, ale byly podpořeny. Opačně to fungovalo i s výškami. Obecně se dalo předpokládat, že bude mirelon nejhorší z materiálů, ale jeho vlastnosti mohou být pro splnění specifických nároků interpretů či autorů nezanedbatelné.

U všech rezonátorů pak dle očekávání došlo k celkovému zesílení hladiny akustického tlaku.

### 9.3 Inovace

V příslušné kapitole byla nastíněna vlastní vize inovace marimby jako nástroje samého i z hlediska jeho témburu. Byly vyjmenovány některé materiály, jež by mohly dřevo palisandru nahradit, a byla také uvedena možnost elektrifikace nástroje pro jeho další vývojový posun.

V počítačovém programu 123D Design, určeného pro modelování objektů pro 3D tisk, byl vytvořen marimbový kámen, rozměry odpovídající palisandru C2.



*Obr. 74: Vymodelovaný kámen*

Ten může posloužit jako model pro 3D tisk z plastu či jiného materiálu. Jak totiž předchozí pokusy ukázaly, broušení plastového bloku do tvaru marimbového kamene má na výsledný zvuk negativní vliv. Za předpokladu ovlivnění procesem a nikoli materiálem, nelze striktně plast vyloučit, ale pro jeho další zkoumání v dané problematice je vhodnější vytvořit jej již v požadovaném tvaru.

Ten ale v tento okamžik nelze přesně definovat, takže je zapotřebí prozkoumat několik variant tvarů pro jednotlivý polymer. Jedním z hlavních faktorů je potřebná hustota, ale také struktura. 3D tisk pak právě u vnitřní struktury nabízí široké pole možností pro experimentální práci. U většího objemu tělesa, jež by bylo při jiné stavbě uvnitř plné, 3D tisk vytváří vnitřní hexagonální komory, většinou prázdné. Pokud by se tyto vyplnily potřebnou směsí, či pokud by se vnitřní struktura změnila z hexagonální na vláknitou (při použití vhodného kompozitního prvku), mohla by tato metoda vést ke srovnatelné anizotropii a nehomogenitě, blízké dřevu.

Kameny z 3D tisku pak mohou být (podle kvality zvuku) použity i jako kameny pro varianty s určitou mírou elektrifikace. U ní je nutné vytvořit prototyp, na němž bude ověřena funkčnost varianty.

Pro otestování aditivní syntézy byla v programu Pure Data vytvořena jednoduchá varianta, ověřená MIDI klávesami. Podle nahraného referenčního vzorku je vyhodnocen průběh tónu a amplitudy jednotlivých frekvencí. MIDI zpráva, podle klávesy, je převedena na frekvenci příslušného fundamentu. K němu jsou, podle intervalů, vypočteny jeho násobky, určující hodnotu dalších frekvencí. Dle požadavků uživatele lze vybrat tón odpovídající:

- teoretickému předpokladu kmitající desky
- vybroušenému kamenu, naladěnému v temperovaném ladění
- vybroušenému kamenu, naladěnému v přirozeném ladění
- xylofonu

Doba trvání jednotlivých frekvencí odpovídá referenčnímu vzorku. Ten je pro všechny tóny shodný. Možnosti celé varianty tkví ve výběru referenčního vzorku, jenž ani nemusí být zvukem marimby. Výsledný tón udává výpočet. Referenční vzorek pouze ovládá průběh. Lze jej samozřejmě také přehrát. Při kompletní knihově marimbových tónů lze pak k reálně nasnímaným vzorkům libovolně přidávat frekvence odpovídající sudé harmonické řadě marimby, liché řadě xylofonu, inharmonickým shlukům vibrafonu, jejich celkové kombinaci či pouze některým jejich intervalům, případně i vytvoření zcela nových poměrů. To vše by mělo vést k obohacení a inovaci barvy zvuku marimby. V případě potřeby, při vhodném snímání, lze nahradit referenční vzorek vstupem mikrofonu a ovládat průběh fyzickým kamenem.

Stejně jako úprava frekvencí, je možná i úprava průběhu tónu i jednotlivých složek. Obecně syntéza přináší téměř nekonečnou škálu možností úpravy zvuku dle libosti.

Je ale zapotřebí takto vzniklý zvuk analyzovat a subjektivně posoudit jeho přínos pro rozvoj marimby a hudebníků a také jeho potenciál v oblasti současného umění. Celá tato varianta v Pure Data slouží pouze jako prototyp pro ověření teoretických předpokladů o aditivní syntéze marimbového zvuku.

## 10 ZÁVĚR

- V rámci vlastního měření bylo nasnímáno 210 vzorků kamenů a rezonátorů, zaznamenáno na mikrofon Rode NT1-A, v DAW prostředí Cubase LE AI Elements 9 a vyhodnoceno pomocí pluginu MAnalyzer od Melda Production Audio Technologies.
- Pro srovnání již vybroušených kamenů byly naměřeny referenční hodnoty palisandru, jež dále sloužily k porovnávání vhodnosti dalších materiálů, případně tvarů. Díky tomu lze vyloučit shodný tvar pro materiály jiné hustoty a vybrat nejvhodnější materiál z posuzovaných vzorků.
- Prozkoumáním rezonátorů různých materiálů, délek a za použití odlišných ucpávek byl subjektivně vyloučen novodurový rezonátor a pro možné využití v rámci specifické inovace barvy zvuku marimby navržen mirelonový a ocelový.
- V programu Pure Data byl navržen a otestován prototyp aditivní syntézy, použitelný pro více variant inovace elektrifikací.

## 11 SEZNAM LITERATURY

- [1] COLEMAN, S. *The marimba book: How to make marimbas and how to play them*. New York City: Issued by the Lincoln School, c1926.
- [2] ROSSING, T. *Science of percussion instruments*. Hackensack, N.J.: World Scientific, c2000. Series in popular science, v. 3. ISBN 98-102-4158-5.
- [3] KURFÜRST, P. *Hudební nástroje*. Praha: TOGGA, 2002. ISBN 80-902912-1-X.
- [4] MICHELS, U. *Encyklopedický atlas hudby*. Praha: Nakladatelství Lidové noviny, 2000. Series in popular science, v. 3. ISBN 80-710-6238-3.
- [5] RAGER, D. *The History of the Marimba: Music Faculty Publications* [online]. 2008 [cit. 2018-11-01]. Dostupné z: [http://engagedscholarship.csuohio.edu/clmusic\\_facpub/1](http://engagedscholarship.csuohio.edu/clmusic_facpub/1). Cleveland State University.
- [6] HALENZ, H. F. *CRAFTS AND HOBBIES: How to Build a Marimba* [online]. 1956, 7 [cit. 2018-11-25]. Dostupné z: <http://www.bernettmusic.com/marimba/Marimba.pdf>
- [7] SYROVÝ, V. *Hudební akustika*. Praha: AMU, 2003. ISBN 978-80-7331-127-8.
- [8] VAŠINA, M. *Studium materiálů z hlediska tlumení zvuku a vibrací: Study of materials in terms of sound and vibration damping : teze habilitační práce*. Brno: VUTIUM, 2010. ISBN 978-80-214-4218-4.
- [9] POŽGAJ, A. *Štruktúra a vlastnosti dreva*. 2. Bratislava: Priroda, 1997. ISBN 80-07-00960-4.
- [10] Acoustics: Basic Acoustics of the Marimba. *Wikibooks* [online]. 31. 6. 2017 [cit. 2018-11-07]. Dostupné z: [https://en.wikibooks.org/wiki/Acoustics/Basic\\_Acoustics\\_of\\_the\\_Marimba](https://en.wikibooks.org/wiki/Acoustics/Basic_Acoustics_of_the_Marimba)
- [11] KARCHOVÁ, K. *Marimba a malý buben jako specifické hudební nástroje*. Brno, 2016. Diplomová práce. Janáčkova akademie múzických umění v Brně. Vedoucí práce Odb.as. Kamil Slezák.
- [12] LA FAVRE, J. *The La Favre 5-octave marimba* [online]. 2004 [cit. 2018-11-04]. Dostupné z: <http://lafavre.us/marimba.htm>
- [13] SCHIMMEL, J. *Elektroakustika*. Elektroakustika. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2013. s. 1-167. ISBN: 978-80-214-4716- 5.
- [14] *FS: Ruční výroba paliček na bicí nástroje* [online]. [cit. 2018-11-12]. Dostupné z: <http://www.fskrla.cz/produkty/marimba-vibrafon/>
- [15] *Bici.cz: Mrimby* [online]. [cit. 2018-11-20]. Dostupné z: <https://www.bici.cz/Bici/Orchestrální-a-melodicke-bici/Marimby/>
- [16] FLETCHER, N. a ROSSING, T. *The physics of musical instruments*. 2nd ed. New York: Springer, 1998. ISBN 0387983759.
- [17] TROPPOVÁ, E. TIPPNER, J. HRČKA, J. a HALACHAN, P. *Quasi-Stationary Measurements of Lignamon Thermal Properties*, *BioResources*, 8 (2013) 6288–6296.



## 12 SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

$K_A$	$[m^4 \cdot kg^{-1} \cdot s^{-1}]$	akustická konstanta
$Z$	$[kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}]$	akustický vlnový odpor
$C$		deformace
$L$	$[m]$	délka
$\delta$		fázový posun / dekrement útlumu
$\rho$	$[kg \cdot m^{-3}]$	hustota
$f$	$[Hz]$	kmitočet
$\perp$		kolmo
$I$	$[m^4]$	kvadratický moment průřezu
MIDI		Musical Instruments Digital Interface
$\sigma$		napětí
$V$	$[m^3]$	objem
$T$	$[s]$	perioda
$S$	$[m^2]$	plocha
$N$		počet
$n$		pořadí
$  $		podélně
$\epsilon$		poměrná deformace
$\ln$		přirozený logaritmus
$c$	$[m \cdot s^{-1}]$	rychlost šíření vln
$F$	$[N]$	síla
$\xi$		součinitel kritického tlumení
3D		trojrozměrné
$\omega$	$[rad \cdot s^{-3}]$	úhlový kmitočet
$y_i$		velikost amplitudy
$\lambda$	$[m]$	vlnová délka
$\eta$		výchylka
$E$	$[MPa]$	Youngův modul pružnosti
$\Delta$		změna

## 13 SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obr. 1. Historický vývoj
- Obr. 2. Rozdíl mezi xylofonem a marimbou
- Obr. 3. Model kamene
- Obr. 4. Upevnění oscilátorů idiofonů
- Obr. 5. Kmity kamene
- Obr. 6. Vliv úpravy kamene na zvětšení intervalů frekvencí módů
- Obr. 7. Určení kmiten a uzlů u pevného a volného konce oscilátoru
- Obr. 8. Chladniho obrazce: První ohybový mód
- Obr. 9. Chladniho obrazce: První torzní mód
- Obr. 10. První torzní mód kmitů
- Obr. 11. Chladniho obrazce: Druhý ohybový mód
- Obr. 12. Chladniho obrazce: Druhý torzní mód
- Obr. 13. Druhý torzní mód kmitů
- Obr. 14. Chladniho obrazce: Třetí ohybový mód
- Obr. 15. Chladniho obrazce: První podélný mód
- Obr. 16. Chladniho obrazce: Třetí torzní mód
- Obr. 17. Třetí torzní mód kmitů
- Obr. 18. Chladniho obrazce: Čtvrtý ohybový mód
- Obr. 19. Vliv rezonátoru na časovou obálku tónu.
- Obr. 20. Závislost délky rezonátoru na frekvenční výšce kamene
- Obr. 21. Rozdílné marimby stejného výrobce, firmy Musser
- Obr. 22. Marimbové paličky
- Obr. 23. Rozdíly spektra tónu podle místa dopadu paličky
- Obr. 24. Časová závislost napětí a poměrné deformace ideálně elastického materiálu
- Obr. 25. Časová závislost napětí a poměrné deformace ideálně viskózního materiálu
- Obr. 26. Časová závislost napětí a poměrné deformace viskoelastických materiálů
- Obr. 27. Časový průběh tlumených kmitů
- Obr. 28. Porovnání materiálů z hlediska vnitřního tlumání a modulu pružnosti
- Obr. 29. Rozdíl struktury dřeva v řezu
- Obr. 30. Fundament (130,81 Hz)
- Obr. 31. Čtvrtá harmonická složka (523,25 Hz)
- Obr. 32. Desátá harmonická složka (1318,5 Hz)
- Obr. 33. Všechny tři frekvence sečtené aditivní syntézou
- Obr. 34. Spektrum palisandru C s místem úderu v polovině kamene
- Obr. 35. Spektrum palisandru C s místem úderu ve třetině kamene

- Obr. 36. Spektrum palisandru Dis3 s místem úderu v polovině kamene  
Obr. 37. Spektrum palisandru Dis3 s místem úderu ve třetině kamene  
Obr. 38. Spektrum palisandru E s místem úderu v polovině kamene  
Obr. 39. Spektrum palisandru E s místem úderu ve třetině kamene  
Obr. 40. Spektrum palisandru C2 s místem úderu v polovině kamene  
Obr. 41. Spektrum palisandru C2 s místem úderu ve třetině kamene  
Obr. 42. Spektrum buku s místem úderu v polovině kamene  
Obr. 43. Spektrum buku s místem úderu ve třetině kamene  
Obr. 44. Spektrum světlého dubu s místem úderu v polovině kamene  
Obr. 45. Spektrum světlého dubu s místem úderu ve třetině kamene  
Obr. 46. Spektrum tmavého dubu s místem úderu v polovině kamene  
Obr. 47. Spektrum tmavého dubu s místem úderu ve třetině kamene  
Obr. 48. Podložení palisandrového kamene  
Obr. 49. První ohybový mód vybuzený paličkou, palisandr Dis3  
Obr. 50. První ohybový mód vybuzený paličkou, palisandr C2 (defektní)  
Obr. 51. První ohybový mód vybuzený reproduktorem  
Obr. 52. Druhý ohybový mód vybuzený reproduktorem  
Obr. 53. Průběh ladění habru  
Obr. 54. Výřez habru  
Obr. 55. Průběh ladění buku  
Obr. 56. Výřez buku  
Obr. 57. Průběh ladění lignamonu  
Obr. 58. Výřez lignamonu  
Obr. 59. Průběh ladění silonu  
Obr. 60. Výřez lignamonu  
Obr. 61. Rezonátory  
Obr. 62. Příklad snímání v blízkosti kamene a ocelového rezonátoru  
Obr. 63. Ucpávky  
Obr. 64. Spektrum kamene C s rezonátorem E  
Obr. 65. Spektrum bez ucpávky  
Obr. 66. Spektrum s korkovou ucpávkou  
Obr. 67. Spektrum s plechovou ucpávkou s oválným otvorem  
Obr. 68. Spektrum krátké ocelové trubice  
Obr. 69. Spektrum krátké novodurové trubice  
Obr. 70. Spektrum krátké mirelonové trubice  
Obr. 71. Spektrum lignamonu

Obr. 72. Spektrum habru

Obr. 73. Spektrum buku

Obr. 74. Vymodelovaný kámen

## 14 SEZNAM TABULEK

- Tab. 1: Hustota našich nejvýznamnějších dřevin, v absolutně suchém stavu
- Tab. 2: Hustota některých dřevních kompozitů
- Tab. 3: Průměrná rychlost zvuku v některých dřevinách
- Tab. 4: Rozměry vybroušených kamenů z různých materiálů, objem a hustota
- Tab. 5: Frekvence palisandrového kamene C
- Tab. 6: Frekvence palisandrového kamene Dis3
- Tab. 7: Frekvence palisandrového kamene E
- Tab. 8: Frekvence palisandrového kamene C2
- Tab. 9: Frekvence bukového kamene
- Tab. 10: Frekvence světlého dubového kamene
- Tab. 11: Frekvence tmavého dubového kamene
- Tab. 12: Rozměry kamenů z různých materiálů, vypočítaný objem a hustota
- Tab. 13: Frekvence kamenů konstantního průřezu
- Tab. 14: Youngův modul pružnosti a rychlost šíření zvuku v kamenech
- Tab. 15: Hmotnost, hustota a frekvence vzorků po ustálení
- Tab. 16: Frekvence vzorků po naladění
- Tab. 17: Poměry frekvencí vůči fundamentu
- Tab. 18: Poměry naladěných frekvencí vůči fundamentu

## 15 SEZNAM PŘÍLOH NA CD

Příloha č. 1	Aditivní syntéza	PD File
Příloha č. 2	Aditivní syntéza vzorek	Wav. soubor
Příloha č. 3	Kameny konstantního průřezu	List aplikace Microsoft Excel
Příloha č. 4	Kameny marimby, rezonátory	List aplikace Microsoft Excel
Příloha č. 5	Ladění kamene	List aplikace Microsoft Excel
Příloha č. 6	Vzorky marimbové kameny	Složka s Wav. soubory
Příloha č. 7	Vzorky rezonátory	Složka s Wav. soubory
Příloha č. 8	Ladění kamene	Složka s Wav. soubory