

ČESKÁ ZĚMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE
FAKULTA LESNICKÁ A DŘEVAŘSKÁ

**VLIV DŘEVA NA KVALITU ZVUKU ELEKTRICKÝCH
STRUNNÝCH NÁSTROJŮ**

2022

Bc. Denis SMUŽANICA

ČESKÁ ZĚMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE
FAKULTA LESNICKÁ A DŘEVAŘSKÁ

**VLIV DŘEVA NA KVALITU ZVUKU ELEKTRICKÝCH
STRUNNÝCH NÁSTROJŮ**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Studijní program:

Dřevařské inženýrství

Katedra:

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Adam Sikora, Ph.D.

Praha 2022

Bc. Denis SMUŽANICA

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta lesnická a dřevařská

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Denis Smužanica

Dřevařské inženýrství

Název práce

Vliv dřeva na kvalitu zvuku elektrických strunných nástrojů

Název anglicky

The effect of wood on the sound quality of electric string instruments

Cíle práce

Cíle práce můžeme rozdělit na teoretické a praktické. V případě teoretických cílů práce se jedná o sumarizaci poznatku předmětné problematiky volby druhu dřeva na výslednou kvalitu zvuku elektrických strunných nástrojů. Praktickým cílem práce je zjištění vlivu vybraných vlastností dřeva na kvalitu zvuku elektrických strunných nástrojů. Z hlediska zvolených vlastností se práce bude zaměřovat na několik druhů dřeva s rozdílnou hustotou, jejich tvrdost a dynamický modul pružnosti. Práce budou zkoumat vliv těchto parametrů na výslednou hlasitost a frekvenci zvuku.

Metodika

1. Literární rozbor problematiky volby dřeva a jeho vliv na akustické vlastnosti elektrických strunných nástrojů.
2. Navržení metodiky s testováním.
3. Experimentální zjištění vlivu volby dřeva na akustické vlastnosti elektrických strunných nástrojů.
4. Statistické vyhodnocení.
5. Práci čleňte do standardních kapitol – úvod, literární rozbor, cíl práce, materiál a metodika, výsledky, diskuze, závěr, použitá literatura a souhrn.

Harmonogram práce:

1. Konceptní řešení práce (říjen 2021).
2. Analýza problematiky s důrazem na téma práce (listopad 2021).
3. Metodika práce (listopad 2021).
4. Měření a vyhodnocení (prosinec 2021).
5. Výsledky a diskuse (leden 2022).
6. Závěr (březen 2022).

Doporučený rozsah práce

70 – 80 stran

Klíčová slova

elektrické kytary, akustika, hlasitost zvuku, frekvence zvuku, vlastnosti dřeva

Doporučené zdroje informací

- El-Hadad, A., Brodie, G.I., Ahmed B.S. (2018). "The Effect of Wood Condition on Sound Wave Propagation," *Open Journal of Acoustics* 8(3), pp. 37-51. DOI: 10.4236/oja.2018.83004
- Požgaj, A., Chovanec, D., Kurjatko, S., a Babiak, M. (1993). "Štruktúra a Vlastnosti Dřeva," *Príroda a. s.*, Bratislava, Slovakia, pp. 486. ISBN: 80-07-00600-1
- Puszyński, J., Moliński, W., a Preis, A. (2015). "The Effect of Wood on the Sound Quality of Electric String Instruments," *Acta Physica Polonica A* 127(1), pp. 114-116. DOI: 10.12693/APhysPolA.127.114
- Smardzewski, J., Batko, W., Kamisinski, T., Flach, A., Pilch, A., Dziurka, R., Mirski, R., Roszyk, E., and Majewski, A. (2014). "Experimental Study of Wood Acoustic Absorption Characteristics," *Holzforschung* 68(4), pp. 467-476. DOI: 10.1515/hf-2013-0160
- Wegst, U.G.K. (2006). "Wood for Sound," *American Journal of Botany* 93(10), pp. 1439–1448. DOI: 10.3732/ajb.93.10.1439
-

Předběžný termín obhajoby

2021/22 LS – FLD

Vedoucí práce

Ing. Adam Sikora, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů

Elektronicky schváleno dne 23. 9. 2021

doc. Ing. Roman Fojtík, Ph.D.

Vedoucí ústavu

Elektronicky schváleno dne 15. 2. 2022

prof. Ing. Róbert Marušák, PhD.

Děkan

V Praze dne 06. 03. 2022

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval mému vedoucímu diplomové práce Ing. Adamovi Sikorovi Ph.D. za jeho trpělivost, vedení a cenné rady, které mi velmi pomohli při psaní mé diplomové práce.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Vliv dřeva na kvalitu zvuku elektrických strunných nástrojů vypracoval samostatně pod vedením Ing. Adama Sikory, Ph.D. a použil jen prameny, které uvádím v seznamu použitých zdrojů. Jsem si vědom, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.

Jsem si vědom, že odevzdáním diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Svým podpisem rovněž prohlašuji, že elektronická verze práce je totožná s verzí tištěnou a že s údaji uvedenými v práci bylo nakládáno v souvislosti s GDPR.

V Praze dne

Podpis autora

.....

Abstrakt ve státním jazyce

V této diplomové práci je řešen vliv vybraných vlastností dřeva, konkrétně hustoty, dynamického modulu pružnosti a tvrdosti na kvalitu a charakteristiku zvukového zabarvení elektrických strunných nástrojů se zaměřením na elektrické kytary. Praktické zkoumání probíhalo pomocí metodicky vytvořeného modelu, který představoval zjednodušení uchycení strun na několika druhů dřev. Byly použity kytarové struny E1 a E6. Na těchto modelech byla změřena hustota, tvrdost podle Brinella pomocí tvrdoměru a dynamický modul pružnosti pomocí nedestruktivní metody používající rychlost šíření zvuku. Pro rozeznění struny jsme vyvinuli kyvadlový systém, který zabezpečil stejné síly a směry úderu kytarového trsátka. Vzniklý zvuk byl snímán a nahráván. Analyzované byly charakteristiky hlasitosti (LAeq, LCpeak a LAF max) a vzniklé vyšší harmonické frekvence. Určením zastoupení sudých nebo lichých harmonických frekvencí bylo popsáno zabarvení zvuku. Výsledky přispěly k hlubšímu porozumění toho, jak konkrétní vlastnosti dřeva ovlivňují zvuk u elektrických hudebních nástrojů pro specifické užití v praxi. Na závěr je doporučeno další důkladné zkoumání této problematiky na reálných elektrických strunných nástrojích, které by mohly poskytnout naprosto přesné podmínky a podpořit tak dosažené výsledky.

Klíčová slova: zvuk, dřevo, elektrické nástroje, modul pružnosti, hustota, tvrdost

Abstrakt v cizím jazyce

This thesis is focused on the influence of certain wood characteristics, specifically wood density, modulus of elasticity and hardness on the quality and characteristic timbre of sound of electric string instruments, focusing on electric guitars. A methodically developed model of guitar from different wood species was used for the practical research. Guitar strings E1 and E6 were used for bigger scale of data. Wood density, Brinell hardness and dynamic modulus of elasticity were determined by using a densometer and non-destructive method using speed of sound propagation. A pendulum system was developed to secure the same power and directions of the guitar pick hit. The resulting sound was sensed and recorded. Certain characteristics of loudness (LAeq, LCpeak and LAFmax) and harmonic frequencies were analysed. The sound timbre was described by determining the representation of even and odd harmonic frequencies. The results helped for deeper understanding of the influence of specific wood characteristics on produced sound of electric string instruments for specific use in practice. For completely accurate conditions for this test the further investigation of this issue with use of real electric string instruments is recommended.

Key words: sound, wood, electric string instruments, modulus of elasticity, density, hardness

Cíl práce

Cílem této diplomové práce je analýza vlivu vybraných vlastností dřeva na kvalitu a specifickou charakteristiku zvuku strunných elektrických hudebních nástrojů. Bylo stanoveno několik konkrétních mechanických a fyzikálních vlastností u různých druhů dřeva, u kterých je velký předpoklad na prokázání vlivu hustoty, tvrdosti a dynamického modulu pružnosti na zvuk vydávaný elektrickými strunnými nástroji. Popsání různých vlivů druhu dřeva na parametry hlasitosti (LA_{eq} , LC_{peak} a LAF_{max}) a zastoupení vyšších harmonických frekvencí ve zvuku umožní uživatelům a výrobcům těchto nástrojů lépe porozumět vlivu dřeva na finální zvuk a zároveň umožní konkretizovat možnosti a předpoklady jednotlivých nástrojů. Tyto výsledky mohou zároveň pomoci k užívání a zkoušení nových, cenově dostupnějších druhů dřev v hudebním průmyslu, což uleví oblíbeným a tradičním druhům dřeva, které jsou pro velký zájem ohrožené a je jich nedostatek.

Obsah

Cíl práce	8
Obsah	9
Seznam ilustrací	10
Seznam tabulek	12
Seznam příloh	13
Úvod	14
1 Dřevo jako akustický materiál	16
1.1 Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva	17
1.1.1 Hustota dřeva	18
1.1.2 Pružnost dřeva.....	20
1.1.3 Tvrdost dřeva	21
1.2 Akustické vlastnosti dřeva.....	22
1.2.1 Rychlost šíření zvuku skrze dřevo	23
1.2.2 Akustický vlnový odpor a tlumení zvuku	25
1.2.3 Rezonanční vlastnosti dřeva	27
1.3 Struktura a kresba dřeva	29
2 Elektrické hudební nástroje a dřevo na jejich výrobu	32
2.1 Výběr vhodného materiálu pro hudební nástroje	32
2.2 Vliv dřeva na zvuk elektrických strunných nástrojů	37
3 Metodika a výsledky praktické části	41
3.1 Popis druhů dřeva použitých na vzorky	44
3.2 Výsledky měření.....	46
3.2.1 Výsledky z elektromagnetického snímače (struna E1)	47
3.2.2 Výsledky z elektromagnetického snímače (struna E6)	48
3.2.3 Výsledky z piezoelektrického snímače (struna E1)	50
3.2.4 Výsledky z piezoelektrického snímače (struna E6)	52
3.2.5 Vztahy mezi vlastnostmi dřeva a hlasitostmi.....	53
4 Výsledky a diskuse	62
5 Závěr	64
6 Seznam použité literatury	65
7 Přílohy	69

Seznam ilustrací

Obr. 1 Základní směry v kmeni (NIS, 2013)	16
Obr. 2 Využití dřeva na jednotlivé části kytar podle modulu pružnosti a hustoty (Bennett, 2016)	21
Obr. 3 Zkouška tvrdosti podle Brinella (www.hanyko-praha.cz).....	21
Obr. 4 Závislost rychlosti šíření zvuku na hustotě dubového dřeva (Kollmann & Krech, 1960)	24
Obr. 5 Závislost rychlosti šíření zvuku rovnoběžně s vlákny v smrkovém a dubovém dřevě na jejich vlhkosti (Kollmann & Krech, 1960).....	25
Obr. 6 Závislost tlumení vlnění zvuku od akustického vlnového odporu pro dřeviny a další materiály (Kollmann & Cote, 1968)	26
Obr. 7 Zvláštní kresby dřeva (Chovanec, 1991).....	29
Obr. 8 Široký a úzký vlnitý lesk na dřevě jasanu (Požgaj a kol., 1993).....	30
Obr. 9 Očkový javor (www.avbasses.com)	31
Obr. 10 Znázornění materiálových vlastností dřeva - Youngův modul pružnosti v porovnání s hustotou dřevin (Wegst, 2006).....	33
Obr. 11 Rychlost zvuku v porovnání s hustotou dřevin (Wegst, 2006).....	33
Obr. 12 Koeficient zvukového vlnění v porovnání se ztrátovým koeficientem (Wegst, 2006)	34
Obr. 13 Youngův modul pružnosti v porovnání se ztrátovým koeficientem (Wegst, 2006)	35
Obr. 14 Schéma signálu v kytarě se snímačem na kobylce (Karjalainen a kol., 1999)..	37
Obr. 15 Vliv různých druhů dřeva na výsledný zvuk elektrické kytary (Nusselder, 2021)	39
Obr. 16 Rozměry a parametry vzorku (Puszynski a kol., 2015).....	41
Obr. 17 FAKOPP Ultrasonic Timer (autor).....	42
Obr. 18 Vyrobené kyvadlo pro zajištění stejných podmínek rozvibrování (autor)	43
Obr. 19 Aktuální měření (autor)	44
Obr. 20 Zapojení snímačů (autor).....	45
Obr. 21 Jasan-1-E1 elektromagnetický snímač (autor)	47
Obr. 22 Merbau-1-E1 elektromagnetický snímač (autor).....	47
Obr. 23 Olše-1-E1 elektromagnetický snímač (autor).....	48
Obr. 24 Jasan-1-E6 elektromagnetický snímač (autor)	48
Obr. 25 Merbau-1-E6 elektromagnetický snímač (autor).....	49
Obr. 26 Olše-1-E6 elektromagnetický snímač (autor).....	49
Obr. 27 Jasan-1-E1 piezoelektrický snímač (autor).....	50

Obr. 28 Merbau-1-E1 piezoelektrický snímač (autor).....	51
Obr. 29 Olše-1-E1 piezoelektrický snímač (autor).....	51
Obr. 30 Jasan-1-E6 piezoelektrický snímač (autor).....	52
Obr. 31 Merbau-1-E6 piezoelektrický snímač (autor).....	52
Obr. 32 Olše-1-E6 piezoelektrický snímač (autor).....	53
Obr. 33 Hustota zkušebních vzorků (autor).....	54
Obr. 34 Tvrdost zkušebních vzorků (autor).....	55
Obr. 35 Dynamický modul pružnosti zkušebních vzorků (autor)	56
Obr. 36 Korelace hustoty a průměrné naměřené hlasitosti (autor).....	57
Obr. 37 Korelace tvrdosti a průměrné naměřené hlasitosti (autor).....	57
Obr. 38 Korelace dynamického modulu pružnosti a průměrné hlasitosti (autor).....	58
Obr. 39 Korelace tvrdosti a vrcholu hlasitosti (autor)	58
Obr. 40 Korelace hustoty a vrcholu hlasitosti (autor).....	59
Obr. 41 Korelace hustoty a parametru LAFmax (autor).....	59
Obr. 42 Korelace tvrdosti a parametru LAFmax (autor)	60
Obr. 43 Korelace hustoty a tvrdosti (autor)	61

Seznam tabulek

Tab. 1 Korelace Youngova modulu pružnosti, pevnosti kolmo na vlákna a hustoty měkkých a tvrdých dřevin (Ross, 2010)	17
Tab. 2 Průměrné hodnoty hustoty vybraných dřevin často užívaných k výrobě elektrických kytar (Meier, 2017)	19
Tab. 3 Průměrné rychlosti šíření zvuku ve dřevě (Kollmann & Cote, 1968)	24
Tab. 4 Akustický vlnový odpor vybraných médií (Kollmann & Cote, 1968)	26
Tab. 5 Akustické konstanty některých dřevin (Požgaj a kol., 1993)	28
Tab. 6 Duncanův test - hustota (autor)	55
Tab. 7 Duncanův test - tvrdost (autor)	56
Tab. 8 Duncanův test - dynamický modul pružnosti (autor)	57

Seznam příloh

Příloha 1 Naměřené výsledky u vzorků jasanu (autor).....	69
Příloha 2 Naměřené výsledky u vzorků merbau (autor).....	69
Příloha 3 Naměřené výsledky u vzorků olše (autor).....	70
Příloha 4 Jasan-2-E1 elektromagnetický snímač (autor)	70
Příloha 5 Jasan-2-E1 piezoelektrický snímač (autor)	71
Příloha 6 Jasan-3-E1 elektromagnetický snímač (autor)	71
Příloha 7 Jasan-3-E1 piezoelektrický snímač (autor)	72
Příloha 8 Jasan-2-E6 elektromagnetický snímač (autor)	72
Příloha 9 Jasan-2-E6 piezoelektrický snímač (autor)	73
Příloha 10 Jasan-3-E6 elektromagnetický snímač (autor)	73
Příloha 11 Jasan-3-E6 piezoelektrický snímač (autor)	74
Příloha 12 Merbau-2-E1 elektromagnetický snímač (autor)	74
Příloha 13 Merbau-2-E1 piezoelektrický snímač (autor)	75
Příloha 14 Merbau-3-E1 elektromagnetický snímač (autor)	75
Příloha 15 Merbau-3-E1 piezoelektrický snímač (autor)	76
Příloha 16 Merbau-2-E6 elektromagnetický snímač (autor)	76
Příloha 17 Merbau-2-E6 piezoelektrický snímač (autor)	77
Příloha 18 Merbau-3-E6 elektromagnetický snímač (autor)	77
Příloha 19 Merbau-3-E6 piezoelektrický snímač (autor)	78
Příloha 20 Olše-2-E1 elektromagnetický snímač (autor)	78
Příloha 21 Olše-2-E1 piezoelektrický snímač (autor).....	79
Příloha 22 Olše-3-E1 elektromagnetický snímač (autor)	79
Příloha 23 Olše-3-E1 piezoelektrický snímač (autor).....	80
Příloha 24 Olše-2-E6 elektromagnetický snímač (autor)	80
Příloha 25 Olše-2-E6 piezoelektrický snímač (autor).....	81
Příloha 26 Olše-3-E6 elektromagnetický snímač (autor)	81
Příloha 27 Olše-3-E6 piezoelektrický snímač (autor).....	82

Úvod

Můžeme s jistotou říct, že hudební nástroje vždy hrály důležitou roli ve společenském, kulturním, náboženském a uměleckém aspektu života. Zároveň také v minulosti více než dnes vyjadřovaly individuální a komunitní identitu a reflektovaly místní geografii a životní podmínky (Post, 2013). Hudební nástroje procházely průběhem času velkým vývojem. Měnily se druhy nástrojů, jejich obliba, používané materiály a také způsoby, jakým vytvářejí zvuk. Můžeme ale říct, že dřevo jako materiál na výrobu hudebních nástrojů mělo díky svojí dostupnosti, díky svým akustickým a estetickým vlastnostem a jednoduchostí opracování na celé odvětví ohromný vliv a řadí se mezi nejužívanější materiál pro výrobu hudebních nástrojů vůbec. V moderní hudbě u strunných nástrojů, jako jsou kytary, housle a piana je zapotřebí, aby se vibrační energie strun přenášela na větší objekt, který by ten zvuk mohl vyzařovat efektivněji. Skoro ve všech případech je tento radiační objekt vyroben ze dřeva (Fletcher & Rossing, 1998).

Tato práce se zaměřuje právě na vliv tohoto přírodního materiálu na kvalitu zvuku elektrických strunných hudebních nástrojů a konkrétněji elektrických kytar. U určování kvality zvuku na strunných nástrojích zkoumáme hlasitost, trvání hlasitosti a zastoupení vyšších harmonických frekvencí, které zvuku dodávají barevnost a odlišují od sebe znění dvou stejně vysokých tónů. Zabarvení zvuku je ovlivněno počtem a hlasitostí sudých nebo lichých vyšších harmonických frekvencí. Stejně jako se v průběhu času měnily používané a upřednostňované materiály na různé hudební nástroje, tak se také měnily trendy a používání různých druhů dřeva v elektrických kytarách. Do současnosti neproběhlo mnoho výzkumů na tento vliv a hudební veřejnost se neshodne na důležitosti tohoto vlivu, a proto neexistuje mnoho dat, které by popisovaly a potvrzovaly vliv různých dřevin na výsledný zvuk elektrických hudebních nástrojů. Existuje ale předpoklad, že se zvyšující se hustotou ztrácí dřevo vibrační potenciál, a to ovlivňuje zvuk nástroje. U elektrických strunných nástrojů vzniká zvuk snímáním vibrací struny, takže dřevo neovlivňuje výsledný zvuk přímo. Na druhou stranu je rozdíl mezi upnutím struny do tvrdého, nebo měkkého dřeva. Díky tomu jsou vibrace struny vždy ovlivněny materiálem, na kterém jsou upnuty, a to se ve výsledku promítne na zabarvení zvuku.

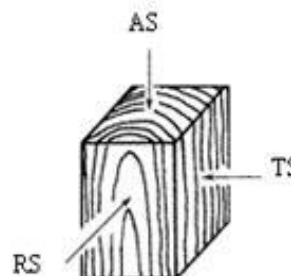
V současnosti se kytary řadí mezi světově nejpoblárnější hudební nástroje. V roce 2013 se na americkém hudebním trhu prodalo 1 363 000 akustických a 1 110 000 elektrických kytar. Ve stejném roce Čína exportovala do světa více než 10 000 000 kusů

tohoto hudebního nástroje a kytary představovaly 42 % všech hudebních nástrojů na kterých se hrálo ve Spojeném království (Challacombe & Block, 2014). Trh s hudebními nástroji je velmi velký a má tedy význam se tímto výzkumem zabývat, protože může přinést nové pochopení toho, jaké dřeviny jsou vhodné na dané využití, a to může vést k užívání nových dřevin k výrobě elektrických hudebních nástrojů.

1 Dřevo jako akustický materiál

Unikátní a požadované spektrum fyzikálních a mechanických vlastností dřeva, kterým se doposud jen velmi málo lidsky vyrobených materiálů může vyrovnat, činí dřevo žádaným materiálem pro mnoho využití, například od konstrukcí, sportovního vybavení až po hudební nástroje. Dřevo má výhodu v porovnání s jinými materiály ve své hojnosti využití a také je poměrně jednoduše tvarovatelné s použitím jednoduchých nástrojů. Typickou vlastností, která odlišuje dřevo od většiny ostatních lidsky vyrobených materiálů je, že je anizotropní materiál, což znamená, že má jedinečné a nezávislé mechanické vlastnosti ve třech směrech vzájemně kolmých os: axiální, radiální a tangenciální. Axiální osa je definována jako rovnoběžná s vláknem, tedy po délce kmene stromu; radiální osa je kolmá na letokruhy; a tangenciální osa je kolmá na vlákna, ale tečná k letokruhům. Anizotropie dřeva je způsobena buněčnou strukturou dřeva. Dřevo se skládá především z dutých, štíhlých, vřetenovitých buněk, které jsou podél sebe uspořádány rovnoběžně podél kmene stromu. Mikroskopické vlastnosti jednotlivých buněk, jako jejich složení a struktura, jejich fyzické a mechanické vlastnosti, jejich tvar a konektivita určují celkovou výkonnost dřeva (Wegst, 2006).

AS – axiální směr
RS – radiální směr
TS – tangenciální směr



Obr. 1 Základní směry v kmeni (NIS, 2013)

Dřevo je hierarchicky strukturovaný kompozit. Buněčné stěny jsou tvořeny celulóзовými mikrofibrily vložených v ligninu a hemicelulóзовými maticemi, ve kterých je obsaženo minoritní množství (5-10 %) vedlejších látek, jako jsou například oleje (Ross, 2010). Rozdílnosti v objemu a chemii těchto přísad v kombinaci s rozdílností množství a rozdělení pórovitosti určují strukturu a tím pádem i hustotu a mechanické vlastnosti dřeva. Mezitím co vlastnosti jednotlivých druhů dřevin jsou v určitých mezích konstantní, v porovnání více druhů dřevin mohou být mezi těmito vlastnostmi velké rozdílnosti.

Celosvětově se hustota dřeva pohybuje od cca 100 kg/m³ v případě balsy (*Ochroma pyramidale*, Malvaceae) až do 1400 kg/m³ pro guajak léčivý (*Guaicum officinale*, Zygophyllaceae) a tzv. „Snakewood“ (*Brosimum guianense*, Moraceae), což je hodnota blízká pro polymery vyztužené uhlíkovými vlákny (Wagenfuhr & Schreiber, 1989). Nicméně, pokud bereme v potaz jenom Evropu, která má celkem malou diverzitu druhů dřevin, způsobenou poměrně nedávnou dobou ledovou, tak se hustota dřevin pohybuje od cca 400 kg/m³ pro vrbu (*Salix alba*, Salicaceae) až do cca 800 kg/m³ pro habr (*Carpinus betulus*, Betulaceae) a 950 kg/m³ pro zimoztráz (*Buxus sempervirens*, Buxaceae) (Sell, 1989). Díky tomuto poznání objevili naši předci skrze generace a přes metodu pokus/omyl nejlepší druhy dřevin k požadovanému účelu. Z našeho pohledu dnes nebylo jejich rozhodování postaveno čistě na mechanických a technických vlastnostech dřeva, jako na odolnosti proti rozkladu, prostorové stabilitě, jednoduchosti opracování a spojování, ale spíše pro ně byly velmi důležité vedlejší parametry, jako vzhled dřeva – jeho textura, vzor vláken a barva (Wegst, 2006).

1.1 Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva

Velmi mnoho fyzikálních a mechanických vlastností dřeva koreluje s jeho hustotou. Youngův modul pružnosti a moduly pružnosti ve smyku paralelně a kolmo na vlákna dřeva, tohoto anizotropního materiálu, patří mezi vlastnosti, které se ukazují jako velmi důležité pro vibrace na hudebním nástroji. Kvůli nedostatku plnohodnotných výsledků těchto modulů pro dřevo použité k výrobě hudebních nástrojů se zaměříme pouze na Youngův modul pružnosti paralelně k vláknům dřeva, protože byl naměřen pro velkou škálu druhů dřev a také z důvodu, že tento modul společně s hustotou a stavbou dřeva určuje většinu akustických vlastností materiálů na bázi dřeva (Wegst, 2006). Dodatečně, pevnost kolmo na vlákna je důležité vždy, když dřevo nese kontakt nebo rázové zatížení, jako je tomu například u xylofonu. Pro rovnoleté měkké a tvrdé dřeviny mohou být Youngův modul paralelně na vlákna a pevnost kolmo na vlákna odvozeny od hustoty dřeva v kg/m³ podle korelací v *Tabulce 1* (Ross, 2010).

Tab. 1 Korelace Youngova modulu pružnosti, pevnosti kolmo na vlákna a hustoty měkkých a tvrdých dřevin (Ross, 2010)

Korelace vlastností	Měkké dřeviny	Tvrdé dřeviny
Youngův modul pružnosti [GPa]	56,3. $\rho^{0,84}$	121,1. $\rho^{0,7}$
Pevnost kolmo na vlákna [N]	0,229. $\rho^{1,5}$	6,48.10 ⁻³ . $\rho^{2,09}$

Další důležitou vlastností charakteristickou pro dřevo a důležitou při výrobě hudebních nástrojů je schopnost reakce a adaptace na environmentální podmínky, kterým je vystaveno, zejména, že si vyměňuje vlhkost se vzduchem. Materiálové vlastnosti, které jsou kritické pro akustické kvality dřeva jako hustota, Youngův modul, tlumení a srážlivost jsou velmi závislé na obsahu vlhkosti ve dřevě. Tím pádem, mezi důležitá kritéria při výběru vhodného dřeva patří, jak hodně a jak rychle si dřevo vyměňuje vlhkost s prostředím, kterému je vystaveno a jak vlhkost ovlivňuje rozměrovou stabilitu a mechanické vlastnosti dřeva. Všeobecně můžeme říct, že rychlost vlhkostní sorpce je tím menší, čím větší je hustota a obsah extraktivních látek (Sell, 1989). Míra a velikost příjmu vody spolu s rozměrovou stabilitou dřeva je možné ovlivňovat a kontrolovat pomocí ošetření dřeva oleji nebo vosky (Wegst, 2006).

1.1.1 Hustota dřeva

Je mnoho faktorů, které určují vhodnost dřevin pro výrobu kytar. Nejběžnější model určování vhodnosti dřevin je založen na dvou mechanických vlastnostech, na hustotě a modulu pružnosti (Bennett, 2016).

Hustota je jednou z hlavních technických vlastností dřeva. Je poměrně jednoduché ji měřit a velmi dobře koreluje s jinými fyzickými vlastnostmi dřeva, například s pevností, tvrdostí, a určuje celkovou vhodnost užívání dřeva. Hustota dřeva také ovlivňuje tendence tohoto materiálu se smršťovat a bobtnat, i když vztah mezi hustotou a těmito vlastnostmi není tolik jednoznačný, jako je tomu v případě pevnostních vlastností. Například pevnost v ohybu smrku ztepilého (*Picea abies*, Pinaceae) roste lineárně s narůstající hustotou a korelace mezi těmito vlastnostmi jsou silné (Seeling, 1999). Hustota je zároveň vlastností, kterou se určuje hodnota kvality dřeva, to znamená, že souvisí s vhodností dřeva na různé koncové využití. Konkrétně konstrukční dřevo potřebuje vysokou hustotu a pevnost. Dřevo s nižší hustotou je vhodnější na výrobu buničiny a produkci papíru než na stavební využití. Také platí, že pouhým určením hustoty vzorku dřeva o něm můžeme zjistit mnoho hodnotných informací, například o jeho mechanických vlastnostech (Saranpää, 2003).

Samotná hustota dřeva udává hmotnost jeho objemové jednotky, přičemž se hodnota hustoty nejčastěji uvádí v kg/m^3 . Hustota dřeva se zkoumala v mnohých výzkumech různých prací, protože jde o charakteristiku, která významně ovlivňuje fyzikální a mechanické vlastnosti materiálu. Můžeme říct, že těžké dřevo je pevnější, tvrdší a odolnější proti opotřebení než dřevo lehké. Významnost hustoty dřeva vzrůstá při jeho

mechanickém a chemickém zpracování, kde se klade důraz na hmotnostní množství dřevní hmoty, a kde je nutné vědět, kolik dřevní hmoty obsahuje konkrétní objemová jednotka. Hustota je také ukazatelem pro vhodnost užití konkrétního druhu dřeva na účely, kde se vyžaduje například nízká hmotnost při vysoké pevnosti nebo pružnosti (stavební účely), ale také při použití dřeva na výrobu hudebních nástrojů (Požgaj a kol., 1993).

Hustota dřeva udává hmotnost jednotkového objemu dřeva při určité vlhkosti. Vypočítává se z podílu hmotnosti m_w a objemu dřeva V_w , přičemž hmotnost a objem dřeva musí být při stejné vlhkosti.

Hustota se vypočítá vztahem $\rho_w = m_w / V_w$ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$].

Pro možnost porovnávání výsledků a při různých teoretických výpočtech se pracuje s hustotou dřeva v absolutně suchém stavu, tedy při nulové vlhkosti (Požgaj a kol., 1993).

Podle některých zdrojů hustota dřeva přímo ovlivňuje tónový zvuk elektrických strunných nástrojů. U těžších dřevin je méně prostoru mezi vlákny a celkově méně prostoru pro pohyb zvuku skrze dřevo. Díky tomu má daná kytara jasný a čistý zvuk a větší údernost zvuku. Méně husté dřevo má naopak více prostoru mezi vlákny a díky tomu má kytara hlubší rezonanci a značně zvýšenou výdrž a délku zahraného tónu (Nusselder, 2021).

V následující *Tabulce 2* jsou uvedeny průměrné hustoty dřevin, které jsou nejvíce oblíbené mezi výrobci elektrických kytar.

Tab. 2 Průměrné hodnoty hustoty vybraných dřevin často užívaných k výrobě elektrických kytar (Meier, 2017)

Dřevina	Průměrná hustota [kg/m^3]
Olše	400-500
Jasan	560-720
Lípa	410-550
Akácie Koa	760-820
Korina	600-650
Mahagon	700-740
Javor	610-660
Palisandr	800-880
Ořech	670-700

Podle hustoty můžeme také kvalitně určit, jaké dřevo je používáno na danou část elektrických ale i elektroakustických kytar. Dřevo, které je vhodné na výrobu vrchní desky má zpravidla nižší hustoty, přibližně 478 kg/m^3 . Oproti tomu dřevo na kytarové krky má hodnoty okolo 553 kg/m^3 , což je nárůst o 16 %. Na výrobu kobylek a hmatníku se používá dřevo s největší hustotou okolo 931 kg/m^3 (Bennett, 2016).

1.1.2 Pružnost dřeva

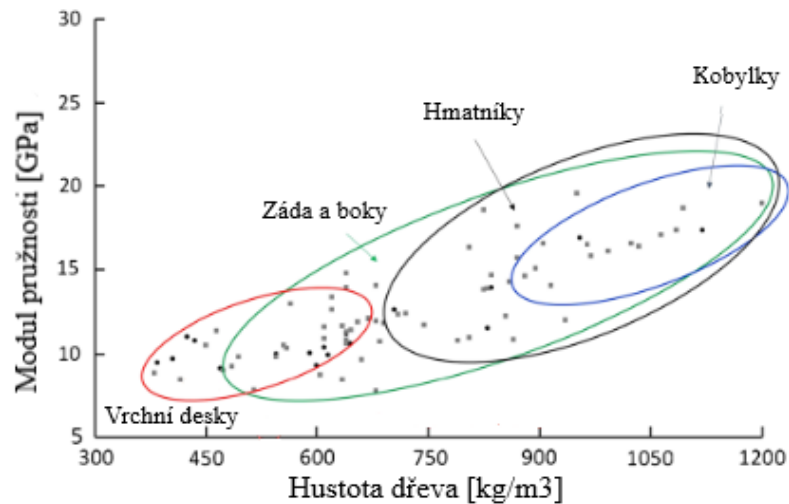
Dřevo jako materiál má díky svým vlastnostem velmi širokou škálu využití. Používá se jako stavební materiál, na výrobu nábytku, hraček a sportovního vybavení, a také se zpracovává chemicky. V neposlední řadě se dřevo již velmi dlouhou dobu používá na výrobu hudebních nástrojů. Vlastností, kterou se v kontextu s hudebními nástroji musíme zabývat, je pružnost dřeva. Pružnost dřeva se definuje jako schopnost dosáhnout původního tvaru po uvolnění vnějších sil. Jednou z možností, jak popsat pružnost dřeva jsou moduly pružnosti. Moduly pružnosti určují vnitřní odpor dřeva vůči pružné deformaci. Platí, že čím je daný modul pružnosti větší, tím je dřevo odolnější vůči deformaci (Požgaj a kol., 1993).

V literatuře se uvádí, že modul pružnosti v tahu a tlaku má při 12% vlhkosti pro dřevo průměrnou hodnotu ve směru vláken mezi 10 000 až 15 000 MPa. Napříč vlákny se tato hodnota mnohonásobně snižuje a je asi 25krát nižší. Za to v radiálním směru jsou jejich hodnoty asi dvakrát větší, než ve směru tangenciálním (Lauš, 2013).

Dynamický modul pružnosti dřeva je pro zvuk a akustiku důležitý zejména svým vlivem na rychlost šíření zvukových vln v materiálu. Rychlost šíření zvukových vln je tím větší, čím je modul pružnosti větší a hustota menší (Wegst, 2006).

Pro výrobu hudebních nástrojů se používají dřeva s různou velikostí dynamického modulu pružnosti. Také u kytar a zejména jednotlivých částí kytar můžeme rozdělit druhy dřeva podle velikost modulu pružnosti do skupin na dané využití. Dřeviny na vrchní desky mají v průměru hodnoty 10 100 MPa, na zadní desky a boky 13 100 MPa a na kobylky a hmatníky nejvíce, a to 14 800 MPa (Bennett, 2016).

Následující *Obrázek 2* graficky znázorňuje porovnání modulu pružnosti a hustoty u tradičních i moderních dřev pro výrobu kytar.

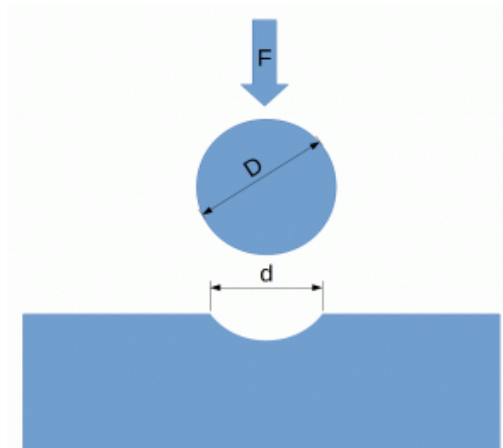


Obr. 2 Využití dřeva na jednotlivé části kytar podle modulu pružnosti a hustoty (Bennett, 2016)

1.1.3 Tvrdost dřeva

Tvrdost dřeva je charakterizována jako schopnost materiálu klást odpor proti vnikání jiného tělesa do jeho struktury. Při určování dřeva se může tvrdost orientačně odhadnout vrypem, ale pro přesné měření tvrdosti dřeva existuje několik metod. Mezi dvě nejznámější metody měření tvrdosti patří Brinellova a Jankova metoda (Hirata a kol., 2001).

Při užití Brinellovy metody je ocelová kulička o průměru 10 mm silou vtlačena do měřeného vzorku dřeva. Škála síly, která je vyvinuta se pohybuje od 100 N do 1000 N. Následně je změřen průměr vzniklé jamky a spočte se výsledek podle výpočtového vzorce (Hill a kol., 1989).



Obr. 3 Zkouška tvrdosti podle Brinella (www.hanyko-praha.cz)

Kdežto Jankova metoda pracuje s ocelovou kuličkou o průměru 0,444 palce (11,28 mm), která je vtlačována do dřeva do poloviny své výšky, čímž vznikne jamka o ploše 100 mm². Výsledkem je síla, v zahraničí obvykle v librách lb_F , která byla zapotřebí k dosažení této jamky (Riggio & Piazza, 2010).

Tvrдость dřeva je ovlivněna několika faktory. Mezi tyto faktory patří nepochybně hustota, která má na tvrdost velmi vysoký vliv. Ze zkoumání několika dřevin vyplývá, že tvrdost dřeva je přibližně proporcionální k hustotě. Při měření tvrdosti může ale docházet ke značným odchylkám od tohoto pravidla, obzvláště když se pokusy provádí na různých dřevinách a vzorcích, které mají široce různou anatomickou strukturu. V takovýchto případech má skladba dřeva značný vliv, který se překrývá s vlivem měnící se hustoty. Literatura dále uvádí, že u dřeva s konstantní teplotou a obsahem vlhkosti, stojí variace hustoty a anatomické struktury společně za skoro všemi zjiřitelnými změnami v tvrdosti (Doyle, 1980).

1.2 Akustické vlastnosti dřeva

Dřevo je materiál, který má velmi dobré akustické vlastnosti a díky těmto vlastnostem se používá na výrobu mnoha hudebních nástrojů jako jsou kytary, housle, klavíry a mnoho dalších. Dřevo a některé dřevěné kompozity, například dřevovláknité desky nebo překližky, se používají k dosažení lepších akustických vlastností u kinosálů, divadel, koncertních sálů a dalších místech. Zvukem nazýváme mechanické vlnění prostředí, které vnímáme sluchovým orgánem jako zvukový vjem. Jeho příčinou je uspořádaný kmitavý pohyb molekul přenášený působením sil, kterými molekuly na sebe vzájemně působí. Zvuk se proto může šířit pouze v hmotném prostředí, nikdy ne ve vakuu. Subjektivně se dají zachytit zvukové vlny s frekvencí od 16 až po 20 000 Hz. Zvuk jako jev vlnění může být charakterizovaný vlnovou délkou, amplitudou vlnění, frekvencí a rychlostí šíření. Zvukové vlny se šíří rychlostí, která závisí na frekvenci a vlnové délce podle následující rovnice:

$$c = \lambda \cdot f$$

kde c je rychlost šíření zvuku, λ je vlnová délka a f je frekvence (Požgaj a kol., 1993).

Dřevo vibruje, jestliže na něj působí budící síly. Amplituda vibrace závisí na frekvenci působící síly. Při určitých frekvencích dřevo reaguje s maximální amplitudou vibrace. Tyto frekvence jsou rezonančními nebo vlastními frekvencemi dřeva. Ve dřevě mohou vzniknout tři druhy rezonančních vibrací:

- podélné vyvolané axiálním stlačením, na základě kterých můžeme určit elastické konstanty dřeva, rychlost šíření zvuku a logaritmický dekrement tlumení,
- příčné, které se nejčastěji vyskytují při dynamickém stlačení v takových konstrukčních částech, jako jsou nosníky, trámy apod.,
- torzní, které je možné použít na měření modulů pružnosti dřeva (Požgaj a kol., 1993).

Jakmile síly vyvolávající vibraci dřeva přestanou působit, amplitudy se snižují a snižují, dokud se dřevo nevrátí do stavu klidu. Přírozená energie je rozptýlena částečně radiací zvuku, částečně vnitřním třením měnícím se na teplo, které se nazývá kapacitou tlumení. Při volných vibracích se pokles amplitud dvou po sobě jdoucích vibračních cyklů vyjadřuje logaritmickým zákonem. Poměr jejich amplitud se nazývá logaritmický dekrement tlumení a může se vypočítat podle vztahu:

$$\lambda = \ln \frac{A_1}{A_2}$$

kde A_1 , A_2 jsou amplitudy dvou po sobě jdoucích cyklů. Kapacita tlumení dřeva je vyšší než u ostatních konstrukčních materiálů (Newland, 1989).

1.2.1 Rychlost šíření zvuku skrze dřevo

V daném prostředí se zvukové vlny šíří rychlostí, která závisí na okamžitých podmínkách prostředí. Mezi tyto podmínky patří tlak, teplota a vlhkost prostředí. Jejich intenzita klesá šířením se na větší vlnoplochy, a to částečným pohlcováním v prostředí (absorpcí) a odrazem na tělesech. Rychlost šíření zvykových vln ve dřevě se může vyjádřit pomocí tohoto vztahu:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

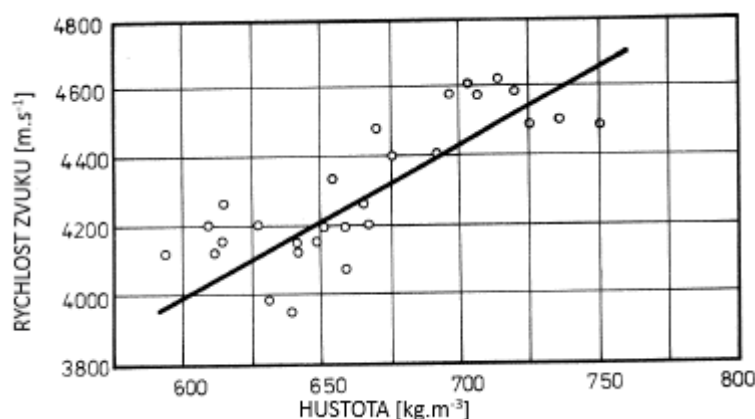
kde E je Youngův modul pružnosti a ρ je hustota dřeva.

Z tohoto vztahu vyplývá, že rychlost šíření zvukových vln (částice se vlní ve směru šíření vlny) je tím větší, čím je modul pružnosti větší a hustota dřeva je menší. Druh dřeva ovlivňuje rychlost šíření zvuku a má anizotropní charakter. V následující *Tabulce 3* jsou uvedeny průměrné rychlosti šíření zvuku ve dřevě u vybraných dřevin rovnoběžně a kolmo na vlákna (Wegst, 2006).

Tab. 3 Průměrné rychlosti šíření zvuku ve dřevě (Kollmann & Cote, 1968)

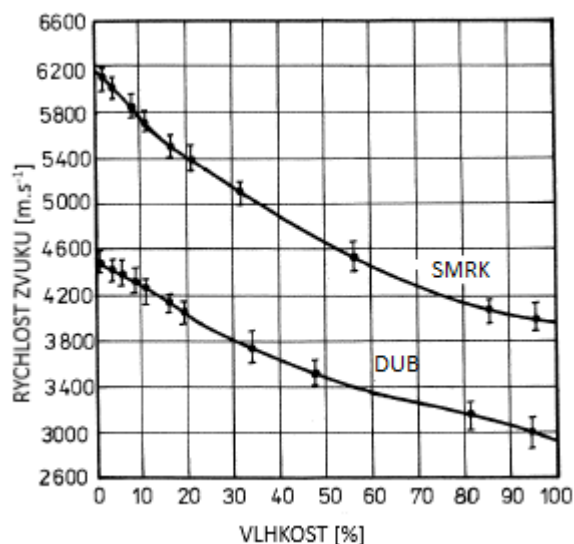
Druh dřeviny	Průměrná hustota [kg/m^3]	Průměrné hodnoty modulu pružnosti [MPa]		Průměrná rychlost šíření zvuku [m/s]	
Smrk	470	11 000	550	4 790	1 072
Borovice	520	12 000	460	4 760	932
Jedle	460	11 000	490	4 890	1 033
Javor	630	9 400	915	3 826	1 194
Buk	730	16 000	1 500	4 638	1 420
Dub	690	13 000	1 000	4 304	1 193

Rychlost šíření zvuku v dřevě podél vláken je přibližně stejný jako rychlost šíření zvuku v kovech. Nejvyšší rychlosti šíření zvuku v dřevě dochází ve směru vláken, kdežto v radiálním a tangenciálním směru je nižší přibližně v poměru 15 : 5 : 3. Velikost uvedených poměrů závisí od druhu dřeviny a poměru modulů pružnosti podél vláken a kolmo na vlákna. Kollman a Krech uvádějí, že závislost mezi rychlostí šíření zvuku a hustotou dřeva je nízká (Kollmann & Krech, 1960).



Obr. 4 Závislost rychlosti šíření zvuku na hustotě dubového dřeva (Kollmann & Krech, 1960)

Čím větší je vlhkost dřeva, tím menší je rychlost šíření zvuku, protože se v dřevě vyplňují kapiláry, ve kterých byl předtím vzduch. V důsledku toho se zvyšuje odpor prostředí proti šíření zvukové vlny (Požgaj a kol., 1993).



Obr. 5 Závislost rychlosti šíření zvuku rovnoběžně s vlákny v smrkovém a dubovém dřevě na jejich vlhkosti (Kollmann & Krech, 1960)

1.2.2 Akustický vlnový odpor a tlumení zvuku

Rychlost šíření zvuku v dřevě podél vláken je přibližně stejně velká jako v kovech, přestože hustota dřeva je asi 1/20 až 1/10 hustoty technicky používaných kovů. Odpor prostředí proti zvukové vlně, která je hlavním faktorem pro šíření zvuku a zejména pro odraz zvuku na rozhraní mezi dvěma prostředími, je rozdílný pro dřevo a kovy, právě kvůli hustotě. Ze součinu hustoty dřeva a rychlosti šíření zvukových vln můžeme vypočítat odpor proti zvukové vlně, který se nazývá akustickým vlnovým odporem. Tento odpor můžeme vypočítat podle vztahu:

$$Z = \rho \cdot c = \rho \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

kde Z je akustický vlnový odpor, ρ je hustota dřeva a c rychlost šíření zvuku (Wegst, 2006).

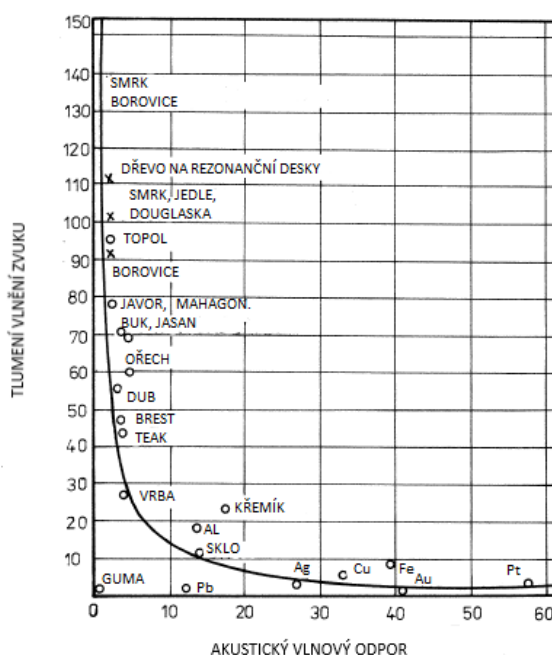
Akustický vlnový odpor Z v různých druzích materiálů se uvádí v následující *Tabulce 4*.

Tab. 4 Akustický vlnový odpor vybraných médií (Kollmann & Cote, 1968)

Médium	Akustický vlnový odpor [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$]. 10^5
Ocel	395
Bronz	168
Mosaz	234
Olovo	82,5
Teak	37
Jedle	20
Buk	22
Voda	14
Guma	10
Vzduch	0,004

Známe dva způsoby tlumení zvuku v prostředí. Jednak se tlumí vnitřním třením a také vlněním – radiací zvuku. Tlumení působené vlněním závisí nejvíce na poměru rychlosti šíření zvuku a hustotě materiálu. U hudebních nástrojů, pro příklad u rezonančních desek pian se vyžaduje nízké tlumení způsobené vnitřním třením a na druhou stranu vysoké tlumení způsobené vlněním zvuku (Požgaj a kol., 1993).

Při porovnání závislosti tlumení vlnění zvuku od akustického vlnového odporu vidíme nejlepší akustické hodnoty u dřeva v porovnání s jinými materiály (Požgaj a kol., 1993).



Obr. 6 Závislost tlumení vlnění zvuku od akustického vlnového odporu pro dřeviny a další materiály (Kollmann & Cote, 1968)

1.2.3 Rezonanční vlastnosti dřeva

Dřevo s dobrými rezonančními vlastnostmi se využívá při zhotovení hudebních nástrojů a jejich rezonančních desek. Rezonanční schopnost dřeva znamená, že je jeho schopností zesilovat zvuk bez zkreslení tónu. Pro příklad dřeva, které má typicky dobré rezonanční vlastnosti, můžeme zvolit smrk. Ten roste na náhorních plošinách nebo na mírných, severně orientovaných svazích. Vyskytuje se často na chudších půdách bez velkých pěstebních zásahů, aby se optimální šířka letokruhů pohybovala v rozmezí 1 až 4 mm a podíl letního dřeva byl mezi 5 až 20 %. Podmínky pro produkci kvalitního rezonančního dřeva jsou v růstových podmínkách prostředí, dobou kácení a proveniencí. Při posuzování rezonančního dřeva musíme brát v úvahu několik rozhodujících kritérií, jako jeho zdravotní stav a kvalita přízemní části kmene, která musí být bez přítomnosti suků. Ve věku přibližně 90 let stromu se začíná tvořit vrstva rezonančního dřeva. Při požadované hranici maximálně čtyř letokruhů na 1 cm šířky a nejmenší přípustné vrstvě rezonančního dřeva 8 cm se může vytvořit za 32 let při celkovém věku stromu 122 let. Jestliže přirůstá deset letokruhů na 1 cm, minimální šířka rezonančního dřeva 8 cm se vytvoří za 80 let, kdy strom dosahuje věku 170 let. Produkční doba rezonančního dřeva střední jakosti je 150 až 160 let, což odpovídá šesti letokruhům na 1 cm a 10 až 12 cm široké vrstvy rezonančního dřeva. Velmi důležité potom je hodnocení a výběr stojících stromů. Při výběru rezonančního výřezu se na dřevě nesmí vyskytovat žádné vady a důraz se klade i na rozměry výřezů, jejichž minimální délka by měla být tři metry a průměr 38 cm. Kmeny, které mají kruhový průřez mají zpravidla větší obsah rezonančního dřeva. Oproti tomu kmeny s excentrickým nebo oválným průřezem jsou méně vhodné, jelikož je zde velký předpoklad pro výskyt reakčního tlakového dřeva. K odhadování výskytu rezonančního dřeva v porostu se používají pokusné vývrty. Mezi nejdůležitější charakteristiky, které se posuzují u akustických vlastností rezonančního dřeva patří modul pružnosti, akustická konstanta, amplituda chvění při rezonanci, logaritmický dekrement tlumení, rezonanční frekvence a další. Snahou je vždy najít vztahy mezi hodnotami subjektivního měření a uvedenými charakteristikami měřenými objektivnějšími metodami (Požgaj a kol., 1993).

Energie odevzdávaná ozvučnici nástroje strunou se ztrácí na okrajích jejího upnutí, vnitřním třením ozvučnice a ve formě zvukové energie se zčásti vyzařuje do okolí. Aby se odevzdalo co nejvíce energie vzduchu, musí být ztráty na vnitřním tření co nejmenší

a koeficient vlnění co nejvyšší. Ukazatelem rezonanční schopnosti dřeva je akustická konstanta, kterou lze vypočítat tímto vztahem:

$$K_A = \sqrt{\frac{E}{\rho^3}}$$

kde K_A je konstanta vyzařování neboli akustická konstanta, E je dynamický modul pružnosti a ρ je hustota dřeva (Podobský, 1999).

V následující *Tabulce 5* najdeme akustické konstanty některých dřevin.

Tab. 5 Akustické konstanty některých dřevin (Požgaj a kol., 1993)

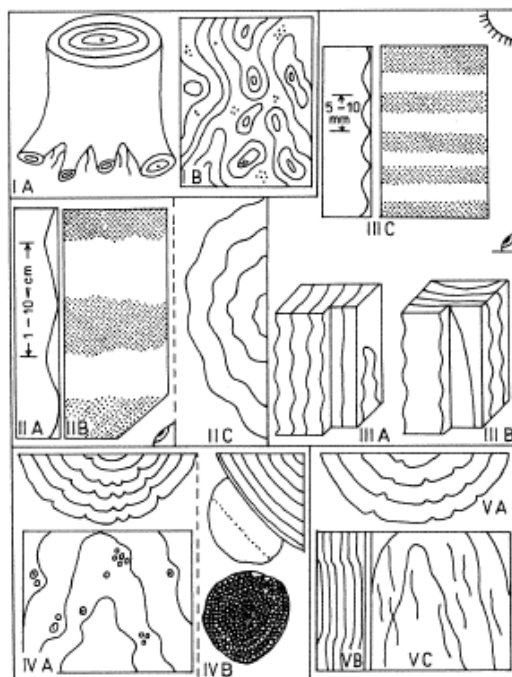
Dřevina	Vlhkost dřeva [%]	Hustota [kg/m ³]	Modul pružnosti [MPa]	Akustická konstanta [m ⁴ .kg ⁻¹ .s ⁻¹]
Rezonanční smrk	10	420	11 000	12
Borovice	10	500	15 000	11
Jasan	10	700	15 000	6,5
Buk	10	750	14 000	6
Bříza	10	630	14 000	7,5
Javor	12	700	11 000	5,8

Z *Tabulky 5* nám vychází, že za nejvhodnější dřevinu můžeme považovat rezonanční smrk. Jestli si porovnáme bělovou část a zralé dřevo smrku, tak z hlediska akustických vlastností nenajdeme významné rozdíly. Na druhou stranu, reakční dřevo negativně ovlivňuje akustickou konstantu z důvodu zvýšené hustoty a modulu pružnosti. Akustickou konstantu dále snižuje nepravidelné uspořádání vláken a jejich točivý průběh. Například při 7 % točivosti vláken se v důsledku snížení modulu pružnosti akustická konstanta snižuje přibližně o 6 %. Na těla hudebních nástrojů, především houslí a kytar, se mimo smrk používá i javorové a jedlové dřevo. Pro zajištění nejlepší estetiky se používá dřevo s bohatou, fládrouvou kresbou. Dále se používá při výrobě elektrických kytar například i mahagonové, olšové a jasanové dřevo. Na výrobu rezonanční desky u klavíru se používá bukové, jasanové, borovicové, lipové a hruškové dřevo. Vždy se vyhledávají radiálně řezané desky. Desky dřeva se musí přirozeně sušit na vzduchu 3 až 5 let, čímž se dosáhne kvalita akustických vlastností, zejména dosažení vysoké intenzity vlnění zvuku. Dlouhodobým přirozeným sušením se zajistí postupně schnutí, které podstatně snižuje možnost vzniku vnitřních trhlin v deskách. Tyto trhliny by značně zhoršovali rezonanční vlastnosti dřeva k výrobě hudebního nástroje (Požgaj a kol., 1993).

1.3 Struktura a kresba dřeva

Kombinací určitých makroskopických znaků v dřevě se určuje textura dřeva. Textura neboli kresba, je charakteristická pro každý řez dřevem a danou dřevinou. Z určitých makroskopických znaků se na textuře dřeva nejvíce podílejí letokruhy, suky, dřevové paprsky, odklon letokruhů a barevnost běli a jádra, stejně jako pruhovitá barevnost v jádrech (třešeň, ořech). Mimo uvážené znaky se u některých dřevin vyskytují ojedinělé případy, ale i samotné druhy dřevin, které mají zvláštní kresbu dřeva, jak je vidět na následujícím obrázku. Předpokládá se, že důvodem pro tuto zvláštní kresbu jsou vrozené růstové odchylky (Požgaj a kol., 1993).

Mezi růstové odchylky se řadí i vlnitý lesk, při které buněčné elementy nemají přímý rovnoběžný průběh s osou kmene, ale probíhají v kratších vlnách nebo ve formě malých zrn. Na podélných řezech nebo na dýchách můžeme najít matné nebo lesklé plochy, které se změnou úhlu pohledu a světla mění tak, že lesklé plochy se stávají matnými a naopak. Takovýto vlnitý lesk může být široký nebo úzký (Požgaj a kol., 1993).

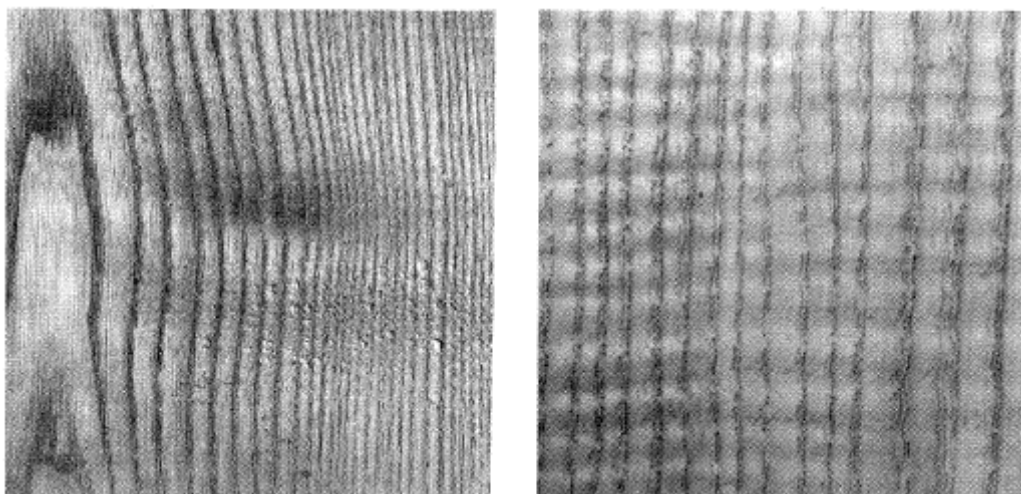


Obr. 7 Zvláštní kresby dřeva (Chovanec, 1991)

Široký vlnitý lesk vytváří na podélných řezech velké matné a lesklé plochy ve formě okrouhlých skvrn nebo pásů širokých pár centimetrů. Při pohledu na příčný řez uvidíme vychýlení letokruhů v šířce cca 2–3 cm s celkovou hloubkou 2 až 4 mm. U radiálního řezu zase v délce od 5 cm až po několik desítek centimetrů tak, že po odstranění kůry

vidíme na kmeni plytké prohlubně v těchto rozměrech. Tento jev můžeme často pozorovat na bříze, ale najdeme ho i na jiných dřevinách, jako je jasan, javor a další. Úzký vlnitý lesk způsobuje vychýlení buněčných elementů ve tvaru vlnovky, jejíž vrcholy jsou od sebe vzdálené přibližně 4-10 milimetrů a její hloubka je 1-4 milimetry. Směr zvlnění může nastat radiální nebo tangenciální. Vlnitý lesk se formuje v úzkých pásech. V tangenciální rovině můžeme růstové zvlnění vidět po odkornění na povrchu kmene jako zvlněný průběh buněčných elementů. Vrcholy vlnovek jsou v porovnání s širokým vlnitým leskem od sebe nerovnoměrně vzdálené, což ještě více umocňuje kontrast kresby dřeva. Na javorovém dřevě je docela časté zvlnění v radiální rovině, které se místně přenáší i na povrch tenké kůry javoru horského a je po odkornění velmi výrazné. Tento typ kresby u úzkého vlnitého lesku javoru je žádoucí a vyhledávaný, používá se kupříkladu při výrobě houslí a kytar na jejich spodní desky (Požgaj a kol., 1993).

Další formou zajímavé kresby dřeva je tzv. kořenice, která není růstovou odchylkou způsobenou genetickým původem. Kořenice se může získat z jakéhokoliv stromu, který má dostatečnou tloušťku k výrobě dýh a nemá žádné hniloby v přízemní části kmene. Kořenicí charakterizuje přechod dřeva kořenů do stavby dřeva kmene. Má zajímavou pestrou kresbu, která vzniká v oblasti pně, kde se vytváří členitá textura. Letokruhy kořenů stromu zarůstají do kmene, kde se přizpůsobují jeho letokruhům. Někdy se stává, že tyto kořeny zarůstají i s kůrou, což ještě více umocňuje zvláštní kresbu kořenice. Kresba kořenice má mimo tyto uvedené charakteristiky také často vlnitý lesk. Mezi velmi oblíbené dřeviny k získávání kořenice patří například ořech, dub, jasan, javor a další. Můžeme ale říct, že získaná kořenice je zajímavá na každé dřevině (Požgaj a kol., 1993).



Obr. 8 Široký a úzký vlnitý lesk na dřevě jasanu (Požgaj a kol., 1993)

Mezi zvláštní kresby dřeva můžeme zařadit i lískovcové dřevo, které se nejčastěji vyskytuje na jehličnatých dřevinách, především na smrkovém dřevě z vyšších nadmořských výšek. Kresba je způsobena vychýlením letokruhů v radiálním směru a lesklými rýhami na tangenciálním řezu. Výskyt lískovcového dřeva zlepšuje kresbu smrkového dřeva a takové dřevo má i vyšší přirozený lazurový lesk. Předpokládá se, že jde o geneticky ovlivněnou růstovou odchylku. Při porovnání mechanických vlastností lískovcového dřeva s normálním smrkem dojdeme k tomu, že jsou u lískovcového dřeva nižší. Toto dřevo má své využití při výrobě dých a jako rezonanční dřevo. Ojediněle daný jev najdeme i na listnatých dřevinách, například u jasanu a buku.

Poslední velmi vyhledávanou kresbou dřeva jsou očka, které se cení nejvíce v nábytkářství, ale i při výrobě hudebních nástrojů s požadovaným specifickým estetickým vzhledem. Očka vznikají jako důsledek tvorby zárodku rezervních větví, které se z nich vyvíjí jen příležitostně nebo dodatečně, například jako důsledek osvětlení kmene. Jejich znaky v dřevě začínají od letokruhu a na tangenciálních řezech se projevují jako kulaté útvary různého zbarvení. Očka neboli zarostlé pupeny vznikají ve vrstvě, která se nachází těsně nad lýkem. Na povrchu kůry se vytváří vypuklina s polokruhovitým tvarem, kterou můžeme pozorovat i pouhým lidským okem. Očka se nejčastěji vyskytují na listnatých dřevinách, jako je javor, topol, ořech, dub a další. Na jehličnatých dřevinách je jejich výskyt méně pravděpodobný. Velmi vysoko ceněnou a žádanou kresbou je shluk malých oček, který můžeme najít na dřevě ořechu, vrby, topolu, ale i na ostatních dřevinách, kterým se často ořezávají větve (Požgaj a kol., 1993).



Obr. 9 Očkový javor (www.avbasses.com)

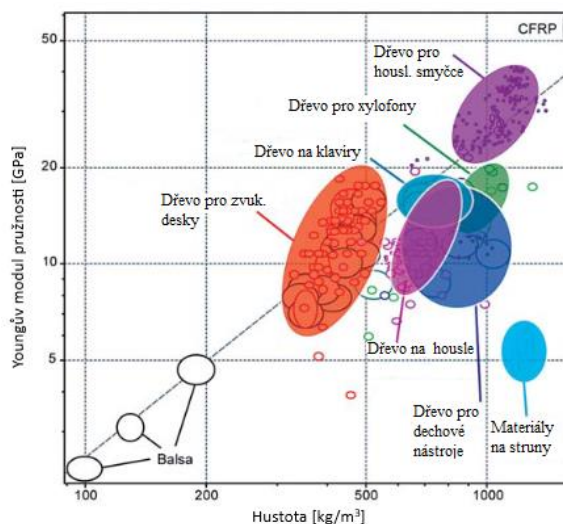
2 Elektrické hudební nástroje a dřevo na jejich výrobu

Mnoho dřevin, které se typicky využívají na materiál pro výrobu elektrických hudebních nástrojů jsou buď skoro ohrožené nebo v přímém ohrožení, jako například mahagon (*Swietenia macrophylla*, Meliaceae, skoro ohrožený; *Swietenia mahagoni*, Meliaceae, v přímém ohrožení), africký mahagon (*Khaya ivorensis*, Meliaceae, skoro ohrožený), palisandr (*Dalbergia latifolia*, Leguminosae, skoro ohrožený) a eben (*Diospyros crassiflora*, Ebenaceae, v přímém ohrožení) (IUCN, 2017). Použití těchto typických tropických tvrdých dřevin při výrobě hudebních nástrojů má i další etické výzvy, jako je například nelegální těžba (Martinez-Reyes, 2015). Mimo to, několik druhů tropických tvrdých dřevin, užívaných při výrobě hudebních nástrojů, je obsaženo v Úmluvě o mezinárodním obchodu s ohroženými druhy volně žijících živočichů a planě rostoucích rostlin (CITES), a tím pádem je limitován jejich mezinárodní obchod, a proto je zde pro odvětví výroby elektrických kytar jasná potřeba se posunout k více ekologicky udržitelným dřevinám. Jednou metodou, jak najít vhodné alternativní dřeviny, je najít dřeviny s podobnými mechanickými a anatomickými vlastnostmi ke dřevinám, které se používají při výrobě v současnosti a vyzkoušet je ve skutečných nástrojích (Ahvenainen, 2018). Přestože zvuk elektrické kytary vzniká digitálně skrze snímače a zvuk je dále zpracováván elektronicky zesilovačem, tak zdrojem zvuku je struna, která mechanicky vibruje. Struny jsou upnuty k tělu, krku a hmatníku kytary pomocí kobylky, nultého pražce a hmatníku, a je jasné, že dřevěné části ovlivňují kvalitu tónu elektrické kytary (Lospennato, 2015). Výběr materiálu pro tělo elektrické kytary může ovlivnit harmonii, jasnost, trvání, přesnost a výraznost zvuku, kdežto materiál krku může ovlivnit údernost a stejně jako tělo výraznost a jasnost zvuku (Hunter, 2006). Výběr materiálu pro hmatník elektrické kytary je spojován s přesností, úderností a harmonií daného nástroje (Paté a kol., 2015). Je nutné ale dodat, že zatím je zde velmi málo vědeckého zkoumání vlivu vlastností dřeviny na kvalitu zvuku elektrických kytar.

2.1 Výběr vhodného materiálu pro hudební nástroje

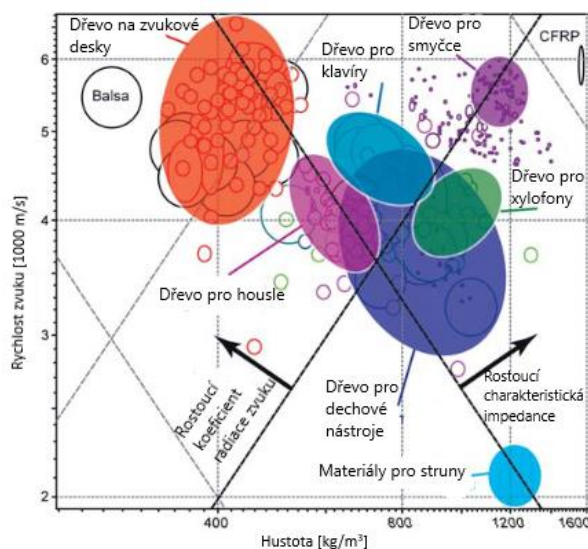
Když si dané fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva a jeho akustické konstanty, které jsou popsány v předešlé kapitole, srovnáme s dřevy, které se běžně používají pro různé hudební nástroje, můžeme si stanovit určité požadavky pro nástroje a můžeme analyzovat, proč jsou určité dřeviny zvláště vhodné pro konkrétní zvukové aplikace, a proto jsou tradičně vybírané výrobci hudebních nástrojů (Wegst, 2006).

V následujících grafech máme porovnání konkrétních materiálů pro použití na výrobu různých hudebních nástrojů. Materiály jsou znázorněny bublinami a jsou rozděleny barvami, které naznačují tradiční využití pro tento materiál. Data pro tyto informace o materiálech a jejich vlastnostech jsou popsány u různých autorů (Haines, 1979, Richter, 1988, Sadie & Tyrell, 2001, Oberhoff, 2003 a Bucur, 2006).



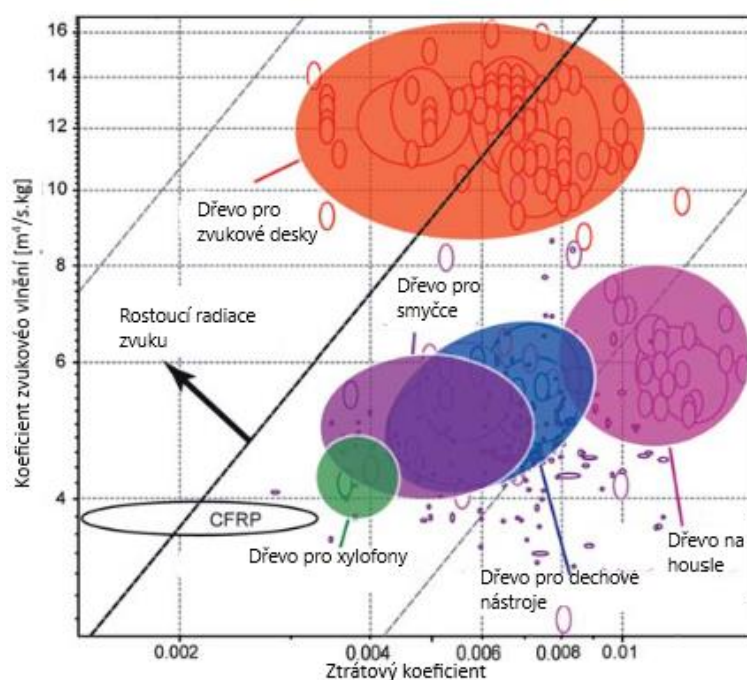
Obr. 10 Znázornění materiálových vlastností dřeva - Youngův modul pružnosti v porovnání s hustotou dřevin (Wegst, 2006)

Obrázek 10 ukazuje Youngův modul pružnosti v porovnání s hustotou pro dřeviny souběžně s vlákny. Z grafu vyplývá, že zvukové desky se vyrábí z dřevin s nízkou hustotou, které mají relativně vysoký Youngův modul pružnosti, a že pro smyčce se používá dřevo s velmi vysokými hodnotami jak pro hustotu, tak i pro modul pružnosti (Wegst, 2006).



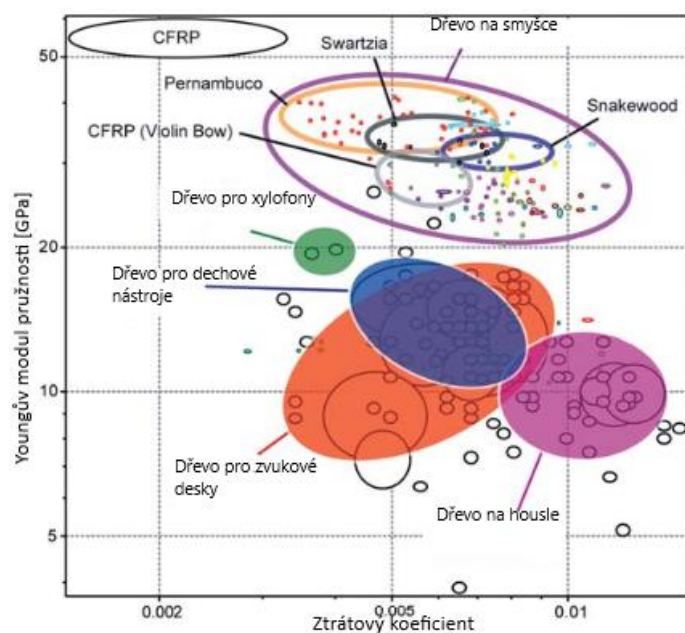
Obr. 11 Rychlost zvuku v porovnání s hustotou dřevin (Wegst, 2006)

Obrázek 11 ukazuje rychlost zvuku v porovnání s hustotou dřeva, z čehož můžeme vyčíst další dvě akustické vlastnosti. Linka se sklonem +1 představuje poměr rychlosti zvuku a hustoty, tedy koeficient vlnění zvuku, R . Linka se sklonem -1 představuje součin těchto dvou, rychlosti zvuku a hustoty, tedy charakteristickou impedanci, z . Všechny materiály na linkách mají vzájemně stejné hodnoty pro tyto vlastnosti, tedy vyzařují stejné množství zvuku, nebo mají stejnou impedanci. Materiály nad linkou mají vyšší hodnotu pro vzájemné vlastnosti než ty, které leží pod. Dřeviny pro zvukové desky ale vyčnívají, mají velmi vysoké hodnoty pro rychlost zvuku, tak i velmi vysoký koeficient vlnění (Wegst, 2006).



Obr. 12 Koeficient zvukového vlnění v porovnání se ztrátovým koeficientem (Wegst, 2006)

Obrázek 12 ukazuje koeficient zvukového vlnění v porovnání se ztrátovým koeficientem (tlumením). Linka se sklonem 1 reprezentuje poměr těchto dvou hodnot, vrcholnou odezvu znějícího těla. Všechny materiály na samostatné lince mají pro tuto vlastnost stejnou hodnotu. Materiály nad linkou produkující vyšší vrcholovou odezvu než ty, které jsou pod. Výše uvedený graf nám odhaluje, že dřeviny používané na zvukové desky mají vysoké obě hodnoty, tedy vysoký průměr a vysokou vrcholovou odezvu. Zároveň s tím mají zvukové desky výjimečně nízký koeficient tlumení (Wegst, 2006).



Obr. 13 Youngův modul pružnosti v porovnání se ztrátovým koeficientem (Wegst, 2006)

Obrázek 13 znázorňuje Youngův modul pružnosti v porovnání se ztrátovým koeficientem a vyplývá z něj, že tyto faktory spolu vůbec nekorelují. Z grafu nadále vyplývá, že dřeviny používané k výrobě smyčců jsou unikátní v kombinaci výjimečně vysokého Youngova modulu pružnosti s velmi nízkým ztrátovým koeficientem (Wegst, 2006).

Zvuk, který vytváří jednotlivá upnutá struna u akustických nástrojů, je velmi málo slyšitelný, protože jedna struna uvádí do pohybu velmi mále množství vzduchu. K vytvoření zvuku s dostatečnou hlasitostí pro naše uši musí být struna spojená s rezonátorem, který má lepší spojení se vzduchem, aby přenášel vibrující energii struny a vyzařoval zvuk. U nástrojů jako jsou housle a kytary je struna upnuta skrze kobylku k vrchní desce nástroje, tedy k zvukové desce. Zvuková deska je běžně vyrobena z kusu nějakého měkkého dřeva a její vlákna mají rovnoběžný průběh se strunami. Kobylka přenáší vibrace strun do zvukové desky nástroje, která je napojena na zadní desku skrze takzvaná žebra. Zadní deska je součástí vibrační struktury a také přispívá k vyzařování, tedy vlnění zvuku. Musíme zdůraznit, že tvar a materiál těla zvukového nástroje velmi silně ovlivňuje kvalitu zvuku a zároveň i způsob, ve kterém je zvuk vyzařován ven směrem do místnosti. Například díry ve tvaru „f“ u vrchní desky houslí a kytar nemají pouze přímý vliv na vibrace zvukové desky, ale také poskytují takový průchod, skrze který vzduch uzavřený v těle hudebního nástroje osciluje ven. Skutečnost znázorňují

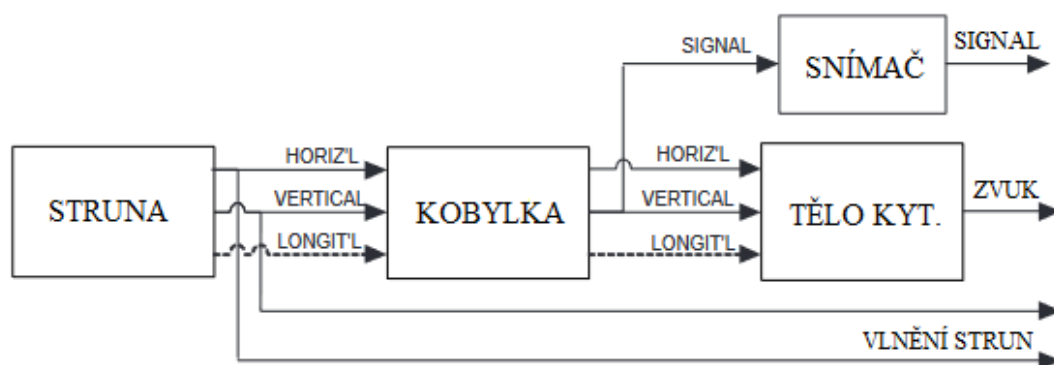
Obrázek 10 a Obrázek 11. Dřeviny, ze kterých se vyrábějí kvalitní zvukové desky nejsou pouze nejlepšími radiátory zvuku ze všech, ale mají také nízkou charakteristickou impedanci, která je prospěšná pro přenos zvuku do okolního vzduchu. Impedance smrkového dřeva je velmi podobná impedanci javoru (*Acer*, Sapindaceae), který je tradičním materiálem pro výrobu kobytek, zadních desek a žebířů u hudebních nástrojů. Javor zároveň velmi dobře vyzařuje zvuk; jeho charakteristická impedance je dostatečně vysoká na to, aby působila jako reflektor pro oscilaci vzduchu v rámci korpusu hudebního nástroje, a aby jim pomohl vyzařovat ven skrze díry ve tvaru „f“ ve vrchní desce (viz *Obrázek 13*). Při bližším pohledu na díry ve vrchní desce strunného nástroje a také na celkový tvar zjistíme, že skoro všechny dřevěné hudební nástroje mají společný rys: samotný nástroj, a i díry v něm vyřezané mají buď kulatý tvar nebo jsou složeny z oblouků. Takovýto design nástroje není pouze z estetického důvodu, ale je také používán z důvodu anizotropické podstaty dřeva. Měkké dřeviny často využívané pro výrobu zvukových desek, jako například smrk, jsou při rovnoběžném průběhu vláken velmi náchylné k rozštěpení, obzvláště když mají tvar plátu a průměrnou tloušťku 2-3 mm, což je typická tloušťka pro zvukové desky kytar a houslí (Wegst, 2006).

Běžně se říká, že pravidelné hraní a stárnutí dřeva zlepšuje akustické vlastnosti daného hudebního nástroje, nebo že nástroje které jsou vystavované v muzeích ztrácejí svoji kvalitu a nové nástroje se musí nejprve „rozehrát“. Věří se, že vlhkost a tah strun v tomto hrají důležitou roli. Hunt a Balsan experimentálně ukázali, že pravidelné hraní při středních až vysokých vlhkostech vede k navýšení tvrdosti dřeva a snižuje ztrátový koeficient zvuku (Hunt & Balsan, 1996). Beavitt představil experimentální důkaz k podpoře svojí hypotézy, že tah strun umocněn vlhkostními cykly, kterým je nástroj vystavován způsobuje změny tónového spektra hudebního nástroje, takže nástroj zní více zvučně a rezonantně (Beavitt, 1996). Segerman zase uvádí, že tah strun, které jsou nově natažené na nástroj, ovlivňuje zvuk tím, že absorbuje zvukové vibrace a vibrace urychlují samotný tah strun, a tím pádem to dopomáhá nově ostruněnému nástroji se usadit (Segerman, 1996, Segerman, 2001). Další výzkum ukazuje, že postupný rozklad a ztráta hemicelulózy v čase snižuje hustotu dřeva bez negativního efektu na svůj Youngův modul pružnosti (Bucur, 2006). Tento fenomén je dále zkoumáný v současných výzkumech k „stárnutí“ dřeva zvukových desek pomocí infikace důsledně vybraných hub za efektem snížení hustoty dřeva se stále konstantním modulem pružnosti, čímž se zlepšil koeficient záření zvuku a celkově kvalita zvukových desek (Zierl, 2005). K objasnění „rozehraní“ a stárnutí hudebního nástroje je potřeba další výzkum, který by přesvědčivě objasnil tyto

různé fenomény z hlediska chemických, strukturálních a mechanických vlastností dřeva a prostředí, kterému je vystaveno (Wegst, 2006).

2.2 Vliv dřeva na zvuk elektrických strunných nástrojů

Akustické vlastnosti dřeva byly již důkladně studovány v mnoha výzkumech. Rezonanční dřevo by mělo splňovat specifické požadavky při výrobě hudebních nástrojů. Mezi tyto požadavky patří například: vysoká kvalita dřeva, bezvadnost dřeva s úzkými letokruhy, nízká hustota a co možná nejvyšší modul pružnosti (Bucur, 1995). Nicméně velká většina těchto znalostí se vztahuje na akustické hudební nástroje a jejich dřevěné tělo. Funkce a efekt dřeva na elektrické strunné nástroje jsou jen velmi málo prozkoumány. Největší spory jsou ohledně zvukového zabarvení nástroje. Někteří hudebníci a producenti věří, že použití různých druhů dřevin při výrobě této skupiny hudebních nástrojů ovlivňuje zvukové zabarvení, kdežto ostatní jsou opačného názoru. Na druhou stranu, jen některé druhy dřevin se častěji používají při výrobě hudebních nástrojů. Tato skupina nástrojů je charakterizována velkou škálou dřevin používaných při jejich výrobě. Volba dřeviny při výrobě hudebního nástroje samozřejmě závisí na mnoha faktorech, jako například trvanlivost dřeva, prostorová stabilita, hmotnost, estetické vlastnosti a další (Puszynski a kol., 2015).



Obr. 14 Schéma signálu v kytáře se snímačem na kobylce (Karjalainen a kol., 1999)

Důležité je zmínit, že kvalita zvuku elektrických strunných nástrojů je ovlivněna strunami, zesilovači, reproduktory, speciálními zvukovými efekty, parametry místnosti nebo nahrávacího studia a další. K vyhodnocení subjektivního zvukového vnímání psycho-akustických parametrů by měly být použity pojmy jako ostrost, drsnost a hlasitost

(Zwicker & Fastl, 2007). Zdrojem zvukového signálu u těchto nástrojů je elektromagnetický snímač. Generovaný signál tedy závisí pouze na vibracích kovové struny (Fanuel Ban, 2010).

Tón, hlasitost a výstup zvuku kytary je ovlivněn různými faktory. Mezi tyto faktory patří například velikost a tvar kytary, upnutí strun, druh strun, délka kytarového krku, menzura a v neposlední řadě také druh použitého lepidla v konstrukci kytary. Nejdůležitějším faktorem, který přispívá tónové charakteristice a barvě u kvalitních hudebních nástrojů, je výběr dřeva. Druhy dřevin, stáří a zacházení s dřevem ovlivňuje tón nástroje a opravdu zde může být velká rozdílnost i mezi samotnými dřevinami. Z důvodu vysokého růstu cen vhodného dřeva a jeho nedostatku se za posledních několik dekád zkoušeli používat nové dřeviny a jiné náhražky (jako např., uhlíková vlákna, lamináty, vysokotlaké lamináty, Nomex). Struny, ladící mechanika, pickguardy (plastové krytky), nulté pražce a kobyolkové kolíky jsou také vyráběné z různých materiálů, jako je kov, plast, kost a další, ale s jistotou můžeme říct, že kytara je především dřevěný nástroj (Bennett, 2016).

Ze dřeva se vyrábí kytarové tělo, krk, hmatník a také hlava kytary. U akustických kytar to jsou ještě navíc záda, boky, zvuková deska, sedlo, žebra a další části, které jsou viditelné pouze uvnitř nástroje. Všechny části kytary ovlivňují tón nástroje, ale největší vliv na tón má zvuková deska a poté záda a boky (Gerken, 2005).

Tuhost kytarového krku umožňuje transformovat vibrace strun do zvukové desky skrze kobytku. Zároveň hmatník a pražce nepřímo ovlivňují kvalitu zvuku, jelikož spolu s výztuhou krku (truss-rod) ztužují krk. Takže můžeme s jistotou říct, že každý použitý materiál a každá součástka ovlivňují kvalitu kytarového zvuku, ale nevíme přesně co konkrétně ovlivňuje a jaký to má efekt na kvalitu zvuku. U elektrických kytar můžou mít tyto faktory ještě nižší vliv, a to z důvodu vzniku zvuku skrze snímání vibrací strun snímači (Gerken a kol., 2018).

Na dřevě u elektrických kytar záleží opravdu mnoho, jelikož dřevo přímo ovlivňuje tónovitost nástroje. V anglickém jazyce se tomu říká „tonewood“, neboli tónové dřevo a vztahuje se ke specifickým druhům dřeva, které nabízejí různé tónové vlastnosti, které ovlivňují zvuk dané elektrické kytary. Je to způsobeno několika důvody jako jsou nedokonalosti a chyby na dřevě, stavba a složení dřeva, věk dřeva a jednotlivé mechanické vlastnosti dřeva. Vlastností, která ovlivňuje zvuk kytar vůbec nejvíce, je hustota dřeva. Můžeme říct, že u dřeva s vyšší hustotou je méně místa mezi vlákny

a celkově prostoru pro pohyb zvuku skrze dřevo. Díky tomu má kytara čistší a jasnější zvuk s větší úderností. Dřevo s nižší hustotou má naopak více prostoru mezi vlákny pro pohyb zvuku, a proto má taková kytara temnější zvuk s delší dobou znění. Největší výzvou pro profesionální kytaraře je najít nevhodnější druhy dřeva pro různé kytarové části, protože ne každé dřevo se hodí zároveň na kytarový krk a kytarové tělo (Nusselder, 2021). Z následujícího obrázku můžeme zjistit přibližné tónové vlastnosti elektrických kytar vyrobených z různých druhů dřev, které se na výrobu kytar používají velmi často.

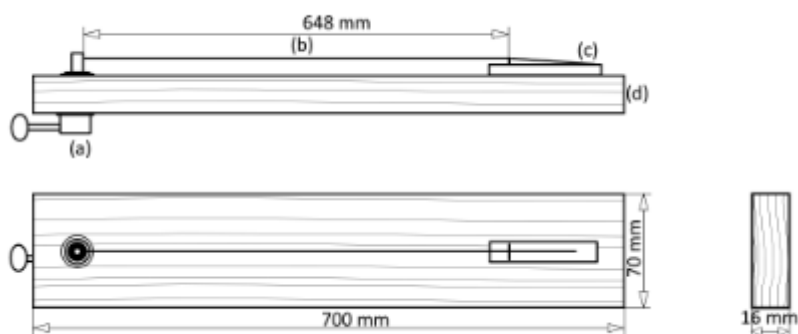


Obr. 15 Vliv různých druhů dřeva na výsledný zvuk elektrické kytary (Nusselder, 2021)

Argumentem tábora lidí, kteří se staví proti jakémukoliv přímému vlivu druhu dřeva na zvuk elektrických strunných nástrojů je, že struna je přímo nad snímačem, kde po rozeznění vibruje. Tyto vibrace jsou skrze snímače přeměněny na signál a skrze zesilovač vzniká zvuk. Takže jediné, co ovlivňuje zvuk, je struna a použitá elektronika (snímače, kabely, zesilovače, reproduktory atd.). Musíme si ale uvědomit, že vibrace strun je také ovlivněna tím, jak jsou upnuty a do jakého materiálu jsou upnuty. Kobylka i ladící mechaniky jsou přímo spojené s kytarovým krkem a tělem. Přestože z hlediska fyziky je magnetické pole vytvořené vibrací strun čistě elektrické a matematické, kvalita a chování těchto vibrací je určitě ovlivněna dalšími materiály, které vibrují a resonují spolu se strunami. Z literatury můžeme tedy říct, že lepší otázkou než jestli dřevo ovlivňuje zvuk elektrických strunných nástrojů je, jak moc je tento vliv v důsledku velký (Binyamini, 2019).

3 Metodika a výsledky praktické části

Metodická část vychází z publikovaného článku, který se zabýval podobnou problematikou (Puszynski a kol., 2015). Pro zjednodušení komplexnosti kytary se pro tento výzkum používá speciálně upravené dřívko, které má přidělané důležité komponenty reálné elektrické kytary. Každý vzorek se skládá z prkna daného druhu dřeva s konstantními rozměry, ladící mechaniky, kobylky a přidělané struny. Délka natažené struny je stejná jako u strun na standartních elektrických kytarách. Pro praktický pokus byly použity tři druhy dřeva: jasan, olše a merbau. Jasan a olše jsou velmi oblíbené druhy dřevin pro výrobu elektrických kytar. Merbau je dřevo exotické a používá se jen velmi výjimečně. Bylo vybráno pro svoji vysokou hustotu a dynamický modul pružnosti. Pro každý druh byly použity tři prkna.



Obr. 16 Rozměry a parametry vzorku (Puszynski a kol., 2015)

Před finálním rozřezáním bylo dřevo specificky připraveno. Část byla zajištěna ze školní truhlárny v objektu ČZU v Praze Suchdole a část z firmy Truhlárství Šedivý se sídlem v Dobřejovicích u Prahy. Přirozeně vzduchem sušené hraněné řezivo, které bylo několik měsíců odstáté v truhlárně před použitím v laboratoři se následně ještě klimatizovalo v klimatizační komoře tak, aby všechny vzorky dosáhly stejné 12% vlhkosti. Prkna všech dřevin byla po celou dobu vystavena stejným vlhkostním a teplotním podmínkám. Poté byla prkna formátována na požadované rozměry. Vlákná všech prken byla orientována stejným, podélným směrem. V průřezu je tangenciální směr rovnoběžný s delší osou. Při realizaci měření se rovnal obsah vlhkosti ve všech prknech rovnovážné vlhkosti okolních podmínek a byl stejný pro všechny druhy dřev, cca 10 %. Všem vzorkům byla stanovena jejich hustota pomocí změření jejich váhy a objemu, který byl vypočítán z rozměrů vzorků. Dynamický modul pružnosti byl měřen přístrojem FAKOPP Ultrasonic Timer od firmy DEÁKI Electronics, který stanovil rychlost šíření

zvuku v podélném směru, ze které se za pomoci hustoty vypočítal dynamický modul pružnosti pro každý vzorek.



Obr. 17 FAKOPP Ultrasonic Timer (autor)

Po zjištění dynamického modulu pružnosti následovala zkouška tvrdosti zkušebních vzorků podle Brinella. Brinellova tvrdost byla měřena ve školní laboratoři na přístroji Struers Duramin. Na každém vzorku proběhlo šest měření. Místa měření byla předem určena tak, aby se rovnoměrně zastoupily všechny strany dřeva a vykompenzovala se možná rozdílnost v struktuře dřeva. Pro stanovení tvrdosti podle Brinella byla ocelová kulička zatlačována do materiálu silou 250 N.

Po dokončení laboratorních zkoušek následovaly zkoušky ve zvukově izolovaném profesionálním nahrávacím studiu pro zabezpečení relevantnosti zkoušek akustického charakteru. Pro zajištění stejných podmínek na rozvibrování struny (síla úderu, směr úderu, poloha trsátka atd.) na všech vzorcích, byl vytvořen speciální testovací stojan. Všechny vzorky byly postaveny na izolační materiál (koberec) ve stejném směru a pro zajištění vibrace struny v konstantní energii bylo použito kyvadlo s připevněným

kytarovým trsátkem. Pozice trsátka ve vztahu k struně byla průběžně monitorována, aby byla stále stejná a nezkrusovala naměřené výsledky.

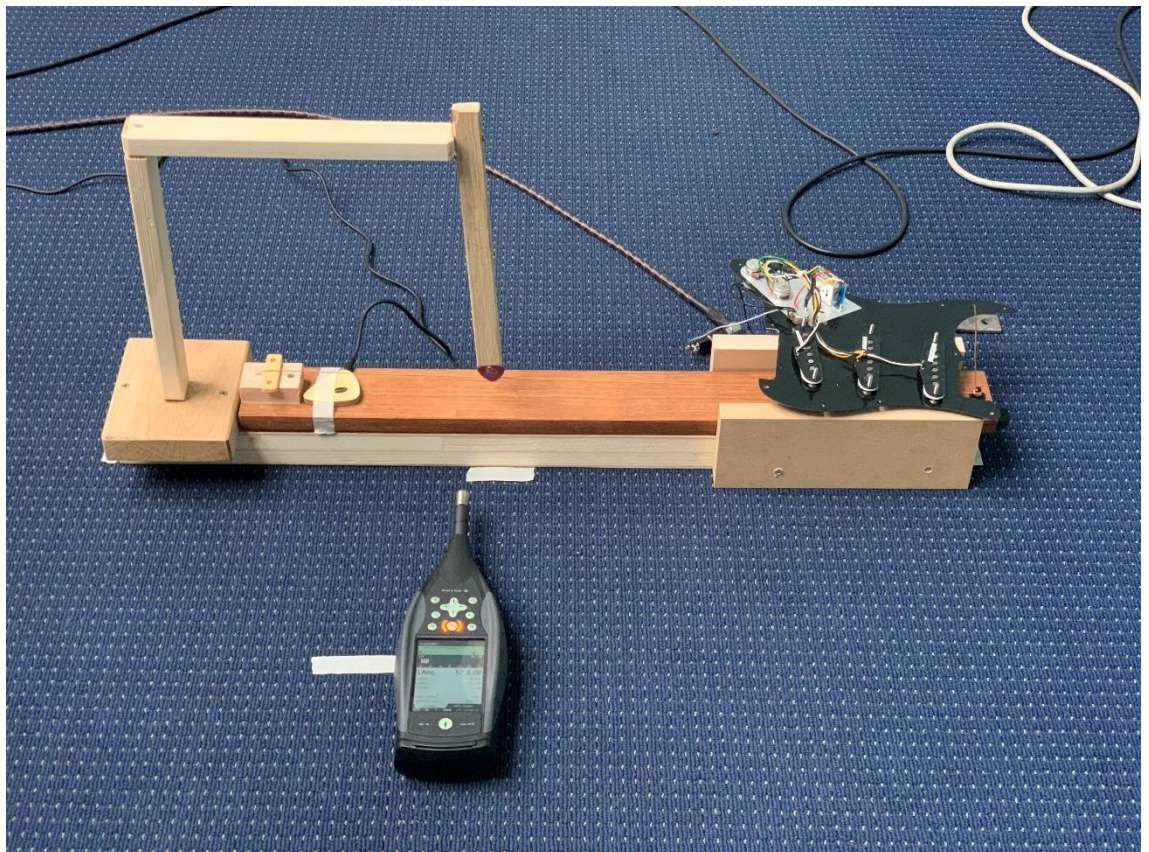


Obr. 18 Vyrobené kyvadlo pro zajištění stejných podmínek rozvibrování (autor)

Zvuk byl snímán kytarovým elektromagnetickým (Fender Pre-wired Stratocaster Pickguard) a piezoelektrickým (Fire&Stone 942020) snímačem zároveň, pro dosažení kvalitnějších výsledků. Elektromagnetický snímač snímá vibraci strun, kdežto piezoelektrický snímač snímá vibrace dřeva, a z těchto vibrací poté vzniká zvuk. Zvuk byl nahráván skrze digitální mixážní pult Behringer X32 v kvalitě 48 kHz 24bit. Všechny nahrávky byly pořízeny v tiché místnosti nahrávacího studia. Na každém vzorku se postupně upnuly dvě struny, a to kytarová struna E6 a E1, které byly naladěny pomocí kytarové ladičky. Každý pokus byl opakován a nahráván na každém zkušebním vzorku šestkrát. Následná zvuková nahrávka byla analyzována ve zvukovém softwaru REAPER pomocí vizualizačního plug-inu Chroma od společnosti BlueLab. Mezi analyzované psycho-akustické parametry patří drsnost, ostrost, zabarvení a čistota zvuku. Tyto parametry byly rozlišovány podle frekvenčního složení nahrávky.

Hlasitost zvuku byla měřena pomocí přístroje Bruel & Kjaer 2270, který byl kalibrován na přesnost s odchylkou 0,01 dB. Hlasitost znění jednotlivých strun byla pro zajištění pravdivosti výsledků a eliminaci výkyvů měřena několikrát na každém vzorku. Byly sledovány tři různé parametry: LAeq, LCpeak a LAFmax. LAeq je široce používaný parametr hluku, který vypočítává konstantní hladinu hluku se stejným energetickým obsahem u měnícího se akustického signálu za nějaký čas. V pokusu se nahrávky měřily

8 vteřin. LCpeak je hodnota maximální vrcholové hladiny zvuku během měření. „C“ označuje měření při frekvenci C. Používá se pro posouzení možného poškození lidského sluchu způsobeného velmi vysokými krátkodobými hladinami hluku. LAFmax je maximální časově vážená hladina zvuku měřená pomocí A-frekvence a Rychlého časového vážení. Jedná se o nejvyšší úroveň okolního hluku vyskytujícího se během doby měření.



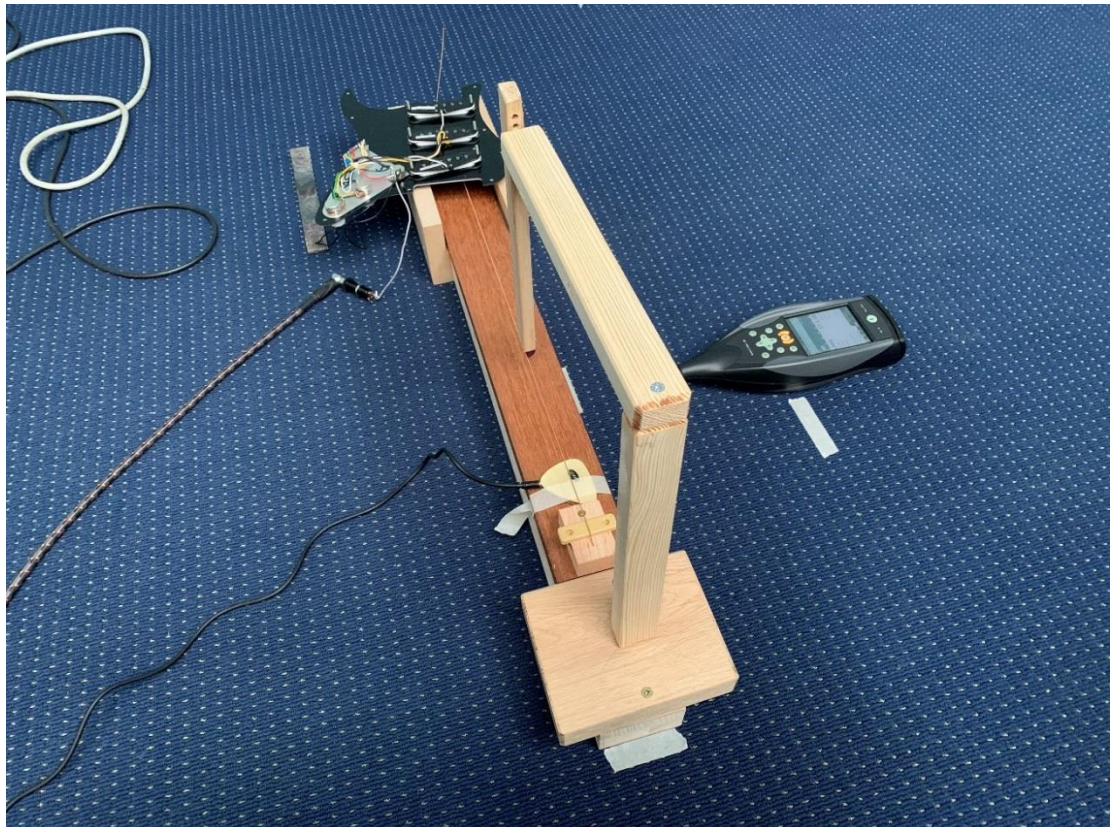
Obr. 19 Aktuální měření (autor)

3.1 Popis druhů dřeva použitých na vzorky

Jasan (*Fraxinus excelsior*, Oleaceae) je listnatá dřevina s kruhovitě pórovitou strukturou. Cévy v letním dřevě nejsou moc dobře patrné a rozlišitelné. Je to jádrová dřevina, ale jádro se vytváří až v pozdějším věku, a tak se v praxi chápe spíše jako bezjaderná a v průmyslu se oceňuje a využívá především dřevo bez jádra. Jasan má tmavě hnědé jádro a bílou až světle hnědou běl. Je to dřevo tvrdé a středně těžké a má průměrnou hustotu 560-720 kg/m³. Dřevo má charakteristickou rovnoláknitou texturu (Zeidler & Borůvka, 2016).

Olše (*Alnus glutinosa*, Betulaceae) je listnatá dřevina s roztroušeně pórovitou strukturou. Cévy nejsou pouhým okem patrné. Je to dřevina bez rozlišitelného jádra s narůžovělou až světle oranžovou barvou. Olše má dřevné paprsky, které jsou poměrně mohutné a jsou sdružené. Na dřevu olše je častý výskyt tmavě hnědých dřevných skvrn a může se také vyskytovat nepravé jádro. Je to dřevo měkké a lehké a má průměrnou hustotu 400-500 kg/m³ (Zeidler & Borůvka, 2016).

Merbau (*Intsia bakerie*, Fabaceae) je dřevinou, která pochází z tropických oblastí jihovýchodní Asie, jako například z Indonésie, Vietnamu, Madagaskaru, Papui-Nové Guinei a další. Má hustotu 830 kg/m³ při 12 % vlhkosti. Jádro dřeviny má velmi proměnlivé barvy od hnědošedé až po bronzovou, tmavnoucí na temně hnědou. Běl má mdlé žlutavě bílou, často se zelenavými odlesky. Dřevo merbau má hrubou strukturu a je tvrdé a těžké. Při kontaktu s vlhkostí se objevují na dřevu barevné skvrny. Používá se například na krájené dýhy, kádě na chemické látky, okna, parkety, lodní konstrukce, mosty a mnoho dalšího (Roček, 2005).



Obr. 20 Zapojení snímačů (autor)

3.2 Výsledky měření

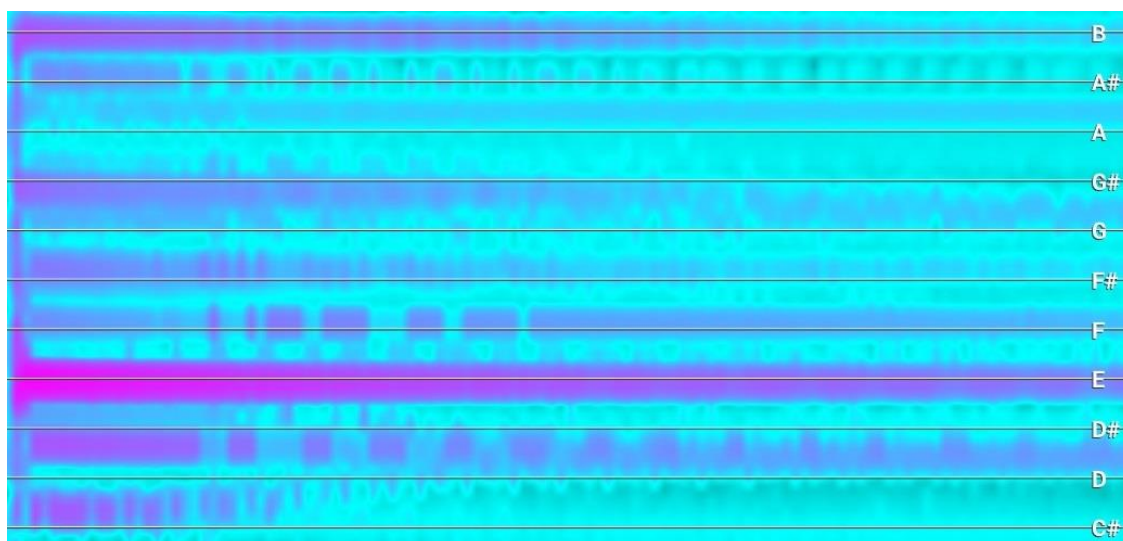
Pro zjednodušení výsledků zde budou uvedeny výsledky vizuální analýzy pro jeden reprezentativní vzorek z každého druhu dřeva. Rozdíly mezi vzorky z jednoho druhu dřeva nebyly velké, kdežto rozdíly mezi samotnými dřevy byly znatelné. Ostatní výsledky budou pro srovnání uvedeny v přílohách. K porovnávání zastoupení různých harmonických frekvencí ve zvukové stopě byla využita vizuální analýza zvuku, jelikož jiná analýza, například matematická nebyla možná bez drahých přístrojů a softwaru. Pomocí vizuální analýzy můžeme vidět zastoupení a velikost různých harmonických frekvencí.

Tón lze při analýze jeho spektra rozdělit na dílčí harmonické frekvence. Nejnižší frekvence tónu (základní) udává výšku tónu a bývá označována jako fundament. Ostatní frekvence, celočíselné násobky (2f, 3f, 4f atd.) základní frekvence se označují za vyšší harmonické a ovlivňují finální sluchový vjem, tedy barvu tónu (Reichl & Všeticka, 2010). Vyšší harmonické frekvence se občas také nazývají shorky nebo alikvotní tóny.

Barva tónu je vlastnost tónu, která umožňuje rozlišit dva tóny stejné výšky, které vydávají různé zdroje zvuku. Je určena počtem vyšších harmonických tónů ve složeném tónu, velikostí amplitud, šumy a šelesty. Čím vyšší je energie vyšších harmonických frekvencí, tím ostřeji tón zní, s jejich klesající energií jsou tóny naopak "kulatější". Také liché násobky základní frekvence zvuky zostřují (např. u žesťových dechových nástrojů), sudé násobky základního kmitočtu zvuk zjemňují (Kutman, 1991).

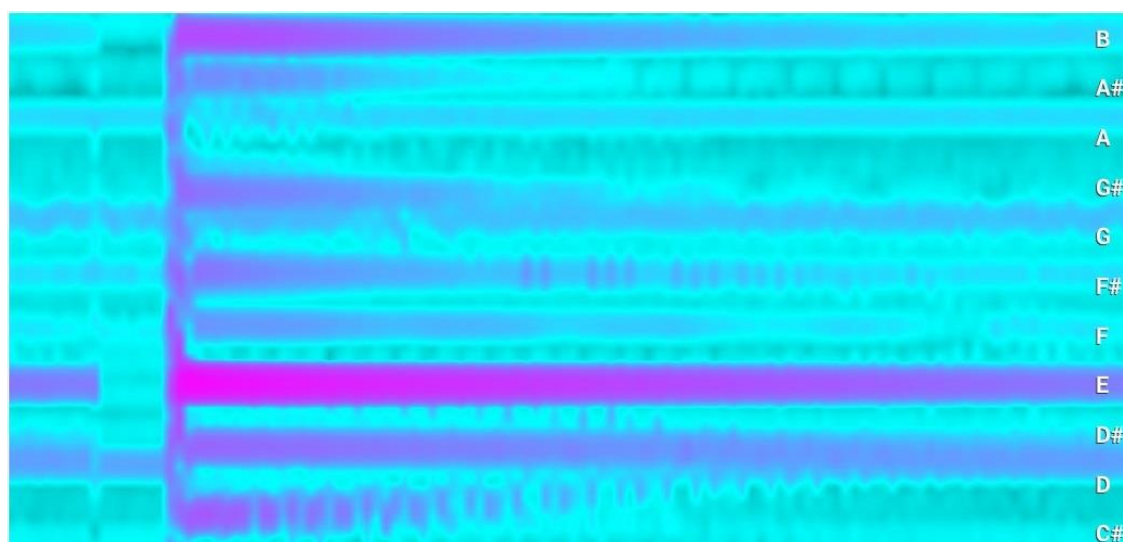
Výsledky jsou porovnávány zvlášť pro elektromagnetický a piezoelektrický snímač, protože oba pracují na jiném principu. Očekává se, že výsledky z elektromagnetického snímače nebudou tak rozdílné, protože snímají vibrace struny. Na druhou stranu výsledky z piezoelektrického snímače budou značně rozdílné, protože snímají vibraci dřeva a každé dřevo má jiné vlastnosti, tedy i tyto vibrace a následný zvuk bude jiný.

3.2.1 Výsledky z elektromagnetického snímače (struna E1)



Obr. 21 Jasan-1-E1 elektromagnetický snímač (autor)

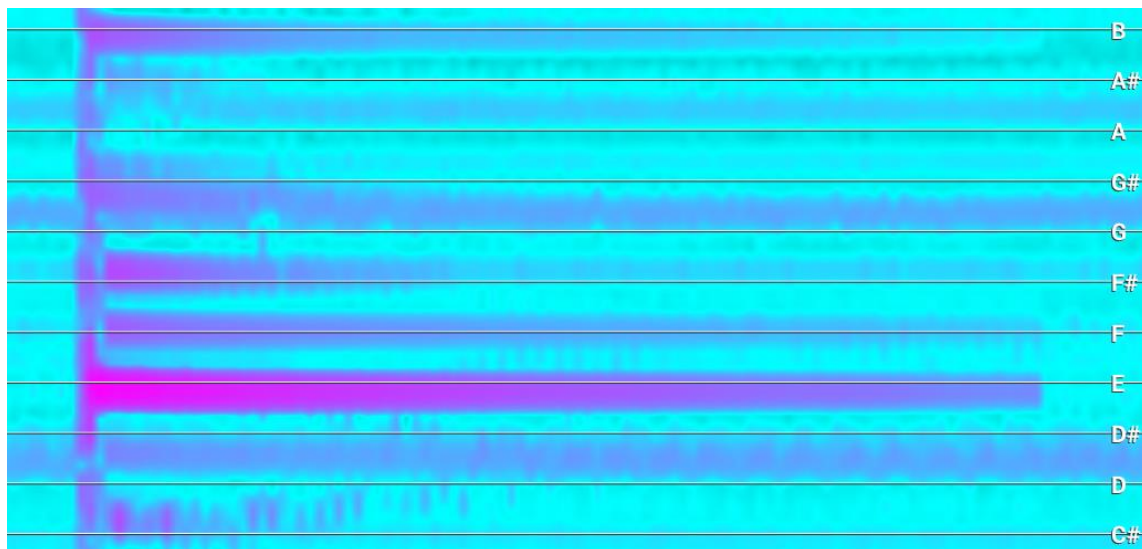
Zvuk z elektromagnetického snímače na vzorku Jasan-1-E1 (*Obr. 21*) je velmi vybalancovaný. Má celkem silné zastoupení vyšších harmonických frekvencí různých hlasitostí. Vidíme zde silný fundament (tón E), který ale v čase celkem silně ztrácí na hlasitosti. Můžeme určit čtyři viditelnější násobky (F, Fis, Gis a B), které ale nejsou tak hlasité. Tyto násobky mají také docela velký odstup od spodní šumové hladiny. Silnější jsou liché tóny, zvuk je proto tedy ostřejší. Zajímavostí je, že sedmý alikvotní tón je oproti ostatním násobkům silnější.



Obr. 22 Merbau-1-E1 elektromagnetický snímač (autor)

Zvuk z elektromagnetického snímače na vzorku Merbau-1-E1 (*Obr. 22*) je velmi čistý. Nemá tak velké zastoupení vyšších harmonických frekvencí jako vzorek Jasan-1-E1. Oproti němu má ale silnější a více stabilnější a trvající fundament E. Významnější

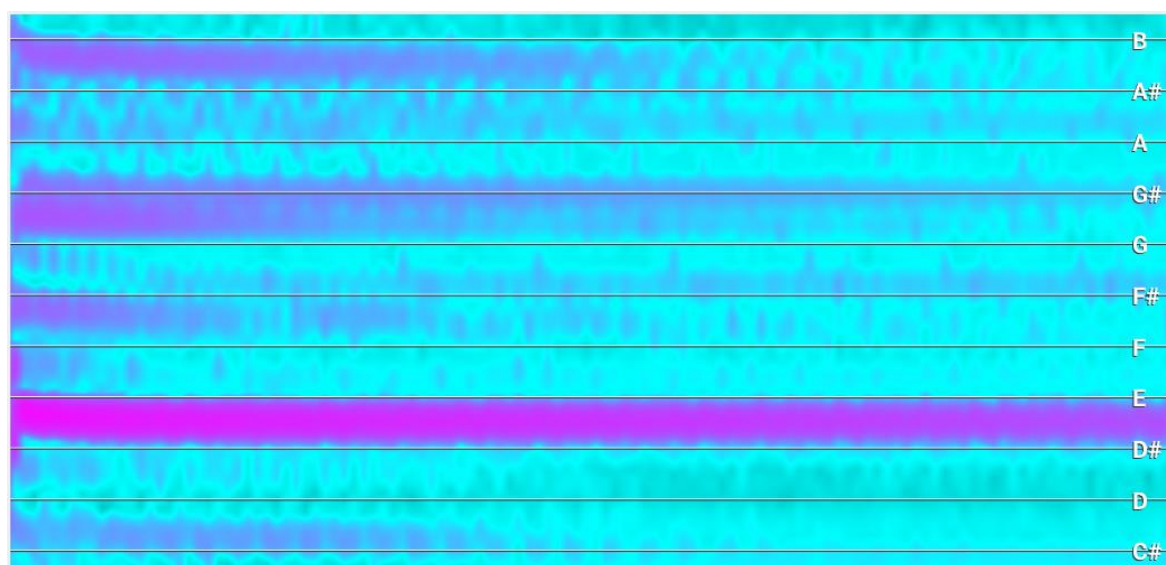
zastoupení zde mají sudé harmonické frekvence a tón je tedy o něco teplejší. Mezi viditelnější shorky zde patří také sedmý shorek, který má také docela dobré trvání. Navzdory silnému fundamentu nemají zdejší alikvotní frekvence takový odstup od spodní šumové hladiny.



Obr. 23 Olše-1-E1 elektromagnetický snímač (autor)

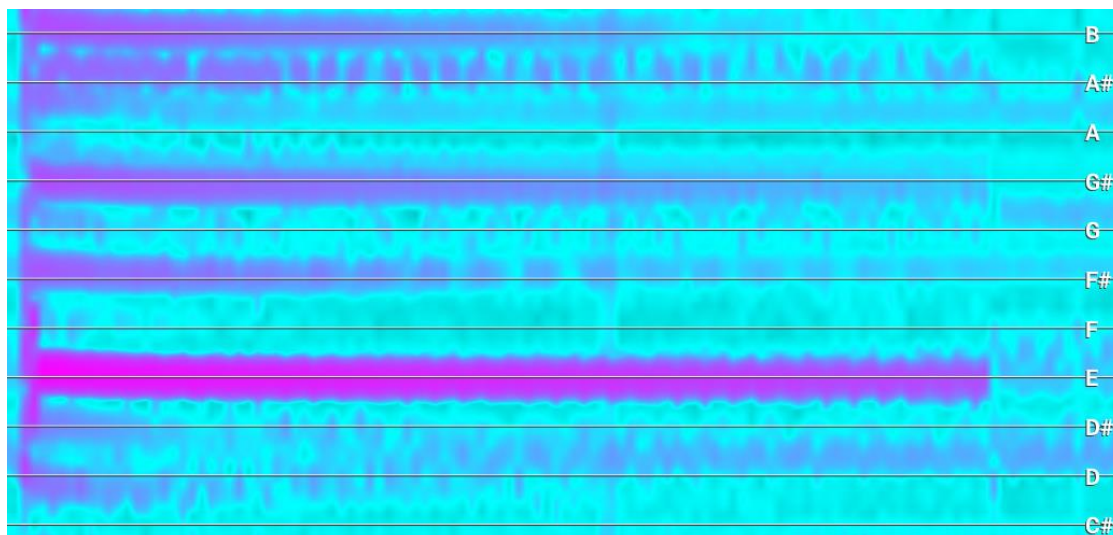
Zvuk z elektromagnetického snímače ze vzorku Olše-1-E1 (*Obr. 23*) je také vcelku vybalancovaný. Má o něco větší zastoupení vyšších harmonických frekvencí než vzorek z Merbau. Fundament E je silný, ale časem znění slábne a vytrácí se. Má silnější liché shorky, ale jsou zastoupeny i viditelné sudé shorky. Tento zvuk je plnější. Většina sudých shorků ale nemá moc velký odstup od spodní šumové hladiny.

3.2.2 Výsledky z elektromagnetického snímače (struna E6)



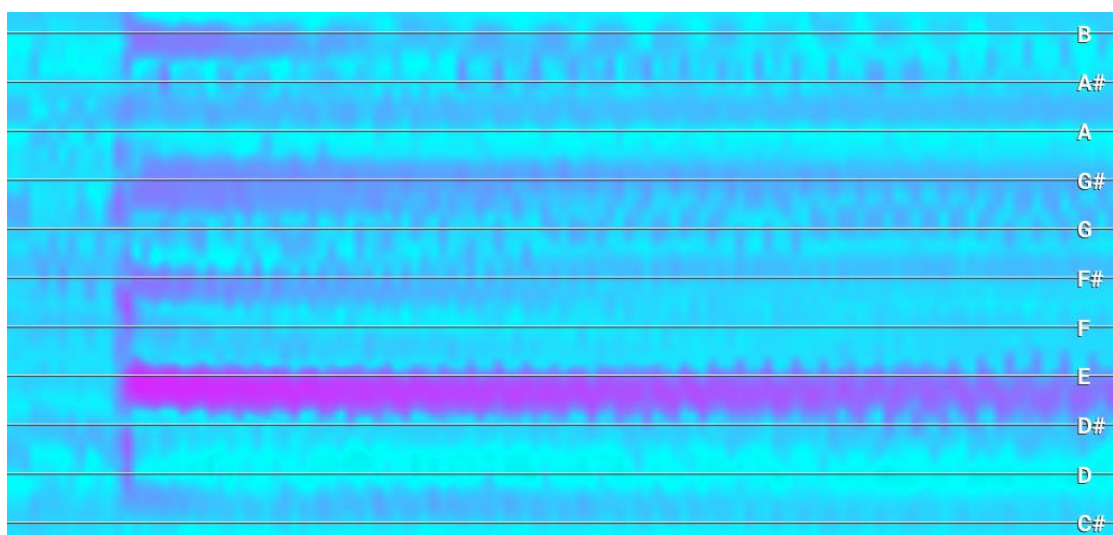
Obr. 24 Jasan-1-E6 elektromagnetický snímač (autor)

Zvukový výstup ze vzorku Jasan-1-E6 (*Obr. 24*) má velmi silný, stabilní a trvajícím fundament. Vidíme zde dvě silnější vyšší harmonické frekvence a to: G a B. Tyto frekvence se ale vytrácí. Shorky tohoto vzorku se viditelně liší od ostatních tím, že moc nevystupují od šumové hladiny. Z těch silnější harmonických frekvencí jsou to ty liché, takže zvuk je ostřejší.



Obr. 25 Merbau-1-E6 elektromagnetický snímač (autor)

Zvuk z elektromagnetického snímače ze vzorku Merbau-1-E6 (*Obr. 25*) má oproti ostatním vzorkům jako jediný viditelně silnější sudé harmonické frekvence. Alikvotní tóny Ais, Gis a Fis mají celkem znatelnou intenzitu. Sudé shorky dodávají zvuku teplotu, jemnost a měkkost. Nejsilnější alikvotní tón je zde Gis, který ale nemá dobrou hlasitost.



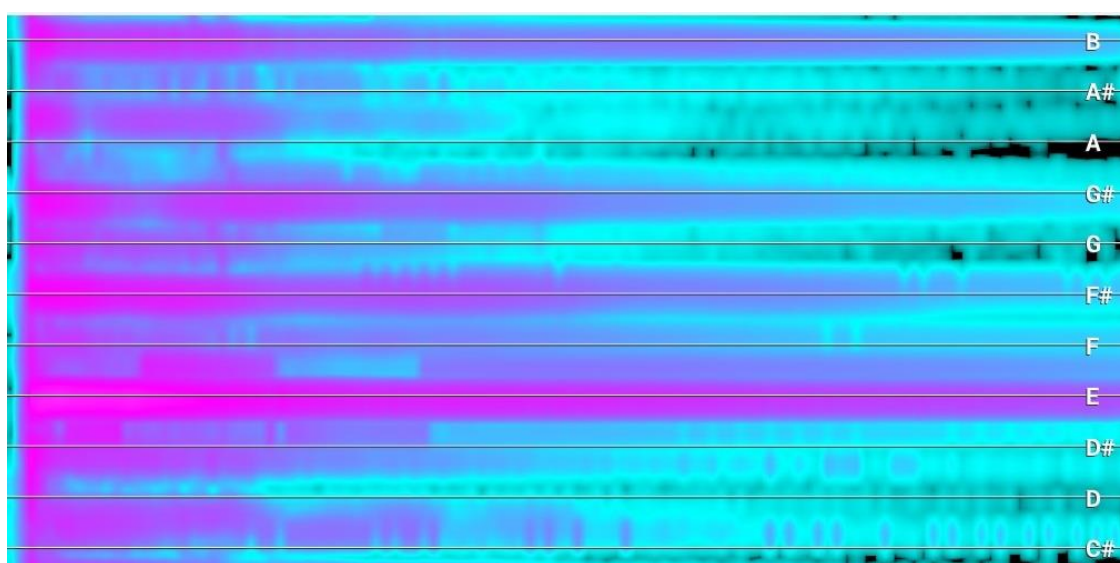
Obr. 26 Olše-1-E6 elektromagnetický snímač (autor)

Výstup z elektromagnetického snímače u vzorku Olše-1-E6 (*Obr. 26*) je v porovnání s ostatními jedinečný tím, že není úplně čitelný, je takový rozostřený. Může

to být způsobené upnutím a dotekem struny u kobyly. Fundament E je čitelný a intenzivní, ale celkem se ztrácí a je takový nejednoznačný. Ostatní vyšší harmonické frekvence nejsou moc silné, ale z těch viditelnějších jsou ty liché.

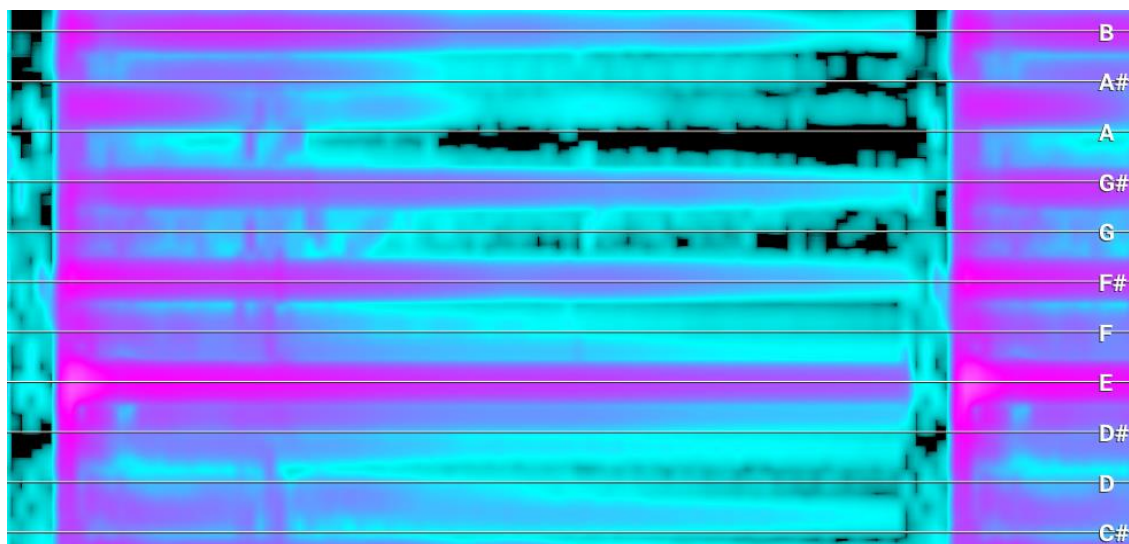
3.2.3 Výsledky z piezoelektrického snímače (struna E1)

Výsledky z piezoelektrického snímače jsou na první pohled mnohem intenzivnější. Zde už je vliv opravdu znát a slyšet, kdežto u elektromagnetického snímače v praxi takový vliv není.



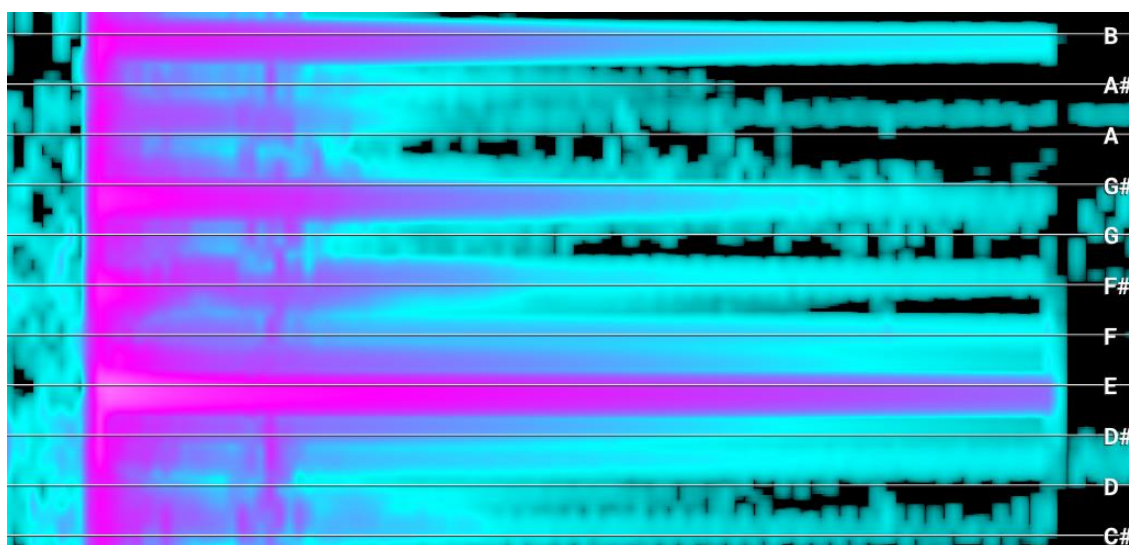
Obr. 27 Jasan-1-E1 piezoelektrický snímač (autor)

Výsledky z piezoelektrického snímače u vzorku Jasan-1-E1 (Obr. 27) jsou krásně čitelné. Vidíme zde silný, dlouho trvající a hlasitý fundament a hojně zastoupení harmonických frekvencí. Silnější vyšší harmonické frekvence jsou u tónů Fis, Gis a B. Silnější jsou ty sudé, takže je jemný. Zároveň je tu ale i zastoupení hlasitých lichých shorků, což vytváří vyrovnaný, balancovaný zvuk. Zajímavostí je výrazný alikvotní tón B, který je silnější než ty předcházející. Zdejší frekvence mají také dobrý vysoký odstup od spodní šumové hladiny. Fundament E zároveň dobře drží svojí naladěnou frekvenci.



Obr. 28 Merbau-1-E1 piezoelektrický snímač (autor)

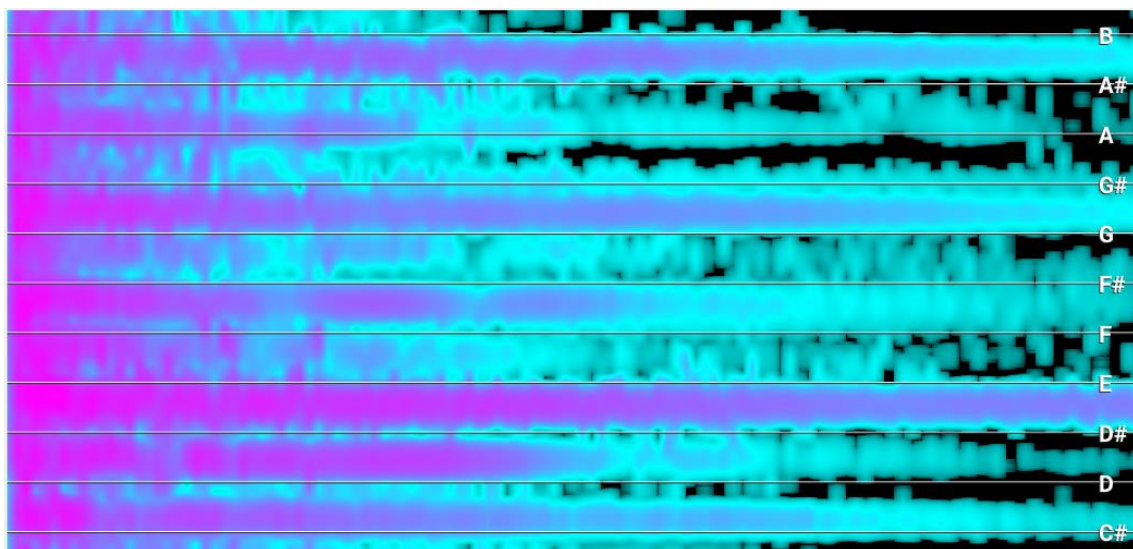
Zvuk z piezoelektrického snímače na vzorku Merbau-1-E1 (*Obr. 28*) je také dobře čitelný a jasný. Fundament je výrazný, hlasitý, ale relativně ztrácí na síle. Je tu více sudých vyšších harmonických frekvencí, mezi hlasité patří Fis, Gis a B. Tyto frekvence dělají zvuk teplejší a jemnější. Shorky zde viditelně vystupují od spodní šumové hladiny.



Obr. 29 Olše-1-E1 piezoelektrický snímač (autor)

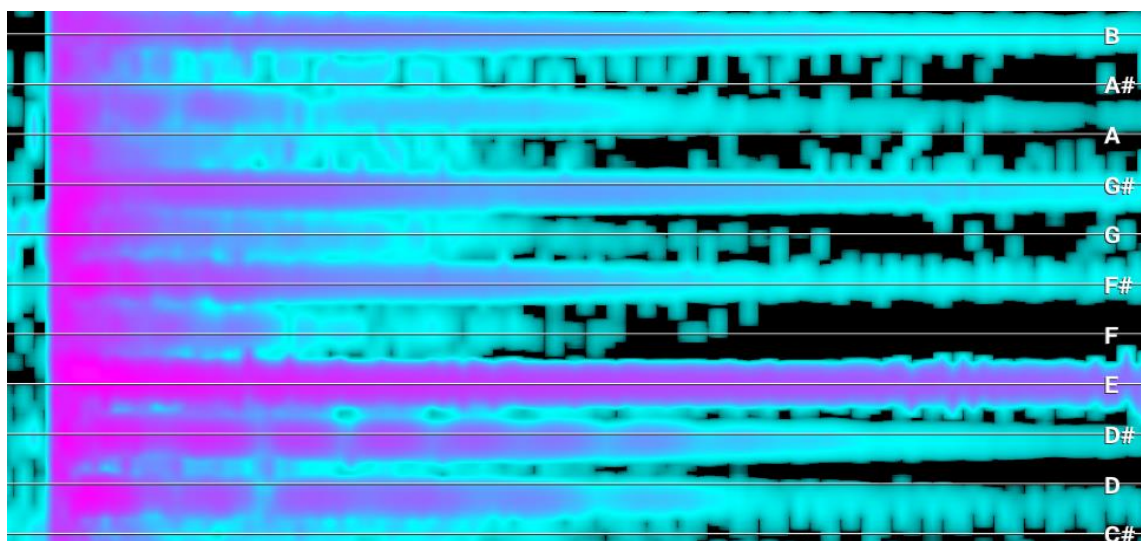
Výstup z piezoelektrického snímače u vzorku Olše-1-E1 (*Obr. 29*) má celkem silnou spodní šumovou hladinu, ale fundament E z ní vystupuje dobře. Fundament E je velmi silný a hlasitý, trošku méně stabilní a na konci ztrácí. Silnější jsou zde sudé vyšší harmonické frekvence, zvuk je ostřejší. Zajímavá je zde frekvence tónu B, která vyčnívá oproti ostatním lichým shorkům.

3.2.4 Výsledky z piezoelektrického snímače (struna E6)



Obr. 30 Jasan-1-E6 piezoelektrický snímač (autor)

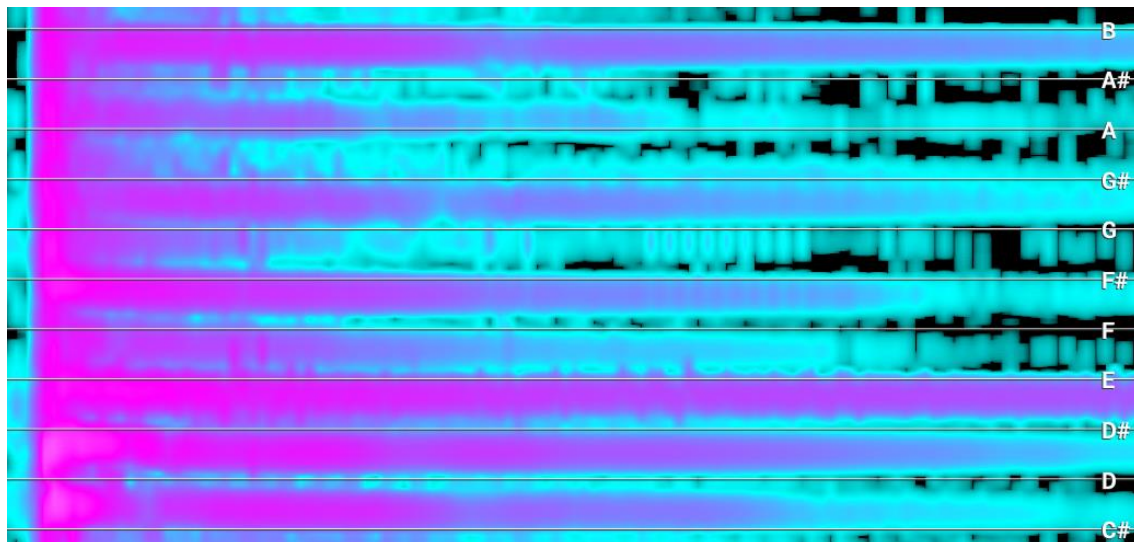
Zvukový výstup z piezoelektrického snímače u vzorku Jasan-1-E6 (*Obr. 30*) má čitelný fundament, který ale není moc silný ani stabilní, zároveň tolik neladí. Celkem ztrácí na hlasitosti. Zvuk je zde takový dutější. Silnější jsou liché vyšší harmonické frekvence. Mezi hlasitější alikvotní tóny patří tóny F, G a B. Poslední tón B má docela vysokou hlasitost.



Obr. 31 Merbau-1-E6 piezoelektrický snímač (autor)

Zvuk z piezoelektrického snímače na vzorku Merbau-1-E6 (*Obr. 31*) je vybalancovaný. Má zastoupení sudých i lichých shorků. Silnější jsou ale sudé harmonické frekvence a díky tomu je tento zvuk jemnější a teplejší. Vyšší harmonické

frekvence zde nemají takovou intenzitu a kvůli tomu je zvuk kulatější. Fundament E je hlasitý a čitelný, dobře ladí a má výdrž. Všechny vyšší harmonické frekvence mají velký odstup od spodní šumové hladiny.



Obr. 32 Olše-1-E6 piezoelektrický snímač (autor)

Zvukový výsledek z piezoelektrického snímače u vzorku Olše-1-E6 (*Obr. 32*) je velmi dobře čitelný. Je tu široké zastoupení vyšších harmonických frekvencí ať už silnějších, nebo slabších. Hlasitější jsou sudé harmonické frekvence, například Fis, Gis, Ais, ale dobrou hlasitost má i tón B. Kvůli tomu je zvuk teplejší. Tento zvuk je plný, a má silné spodní frekvence. Fundament E je intenzivní, jednoznačně vystupuje a je i stabilní, drží si celkem dobře hlasitost. Všechny vyšší harmonické frekvence mají dobrý odstup od spodní šumové hladiny.

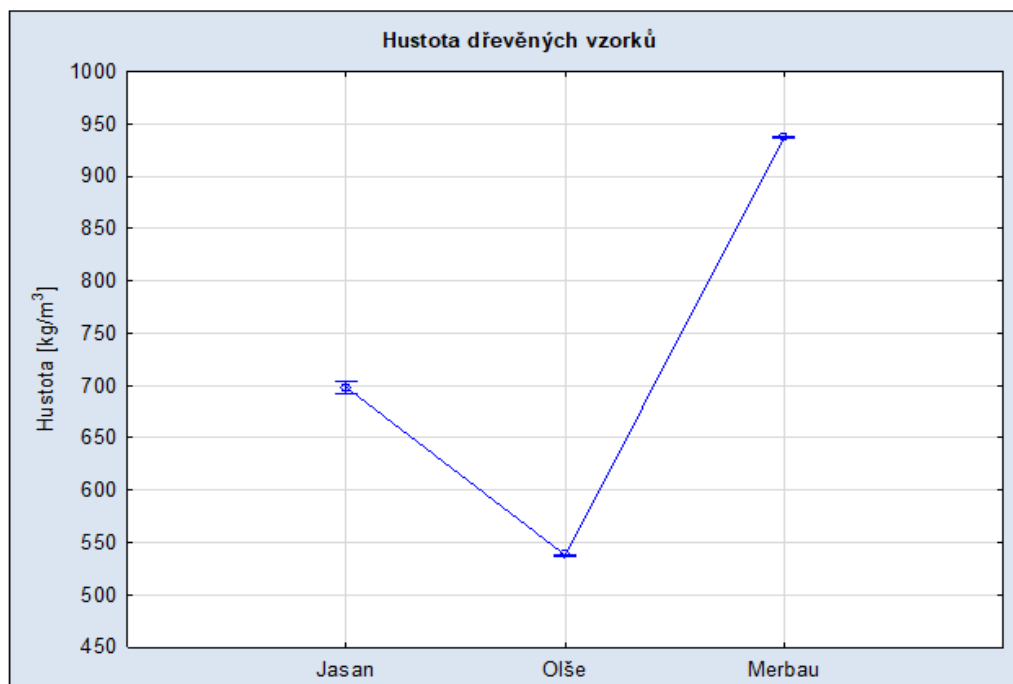
3.2.5 Vztahy mezi vlastnostmi dřeva a hlasitostmi

Příloha 1-3 obsahuje tabulky, kde jsou uvedeny všechny naměřené vlastnosti a výsledky vzorků. Měřena byla hustota, dynamický modul pružnosti, tvrdost a hlasitosti uvedené v metodice práce. U všech výsledků byly naměřeny velmi podobné hodnoty. Větší variace byla naměřena jen u hustoty jednoho vzorku jasanu, kde byla hustota značně vyšší oproti zbylým vzorkům. Dále u tvrdosti byla znát také určitá odlišnost výsledků, ale to je způsobeno rozdílnou stavbou a strukturou dřeva v předem stanovených místech měření.

Před statistickým zhodnocením pomocí ANOVY (analýzy rozptylu) byla provedena kontrola normálního rozložení dat. Po ověření dat byla provedena ANOVA s jedním faktorem (dřevina). Jako proměnné byly použity naměřené vlastnosti dřeva (hustota, tvrdost a dynamický modul pružnosti). Poté byl použit Duncanův test, který vzájemně porovnává hladiny významnosti jednotlivých proměnných mezi sebou. Byla zvolena hladina významnosti $P = 0,05$. Stanovenou hladinou významnosti P lze testovaný faktor ohodnotit následovně:

- $P = 0$ faktor působí,
- $P = 0,05$ vliv faktoru je na hranici statistické významnosti,
- $P < 0,05$ vliv faktoru je statisticky významný,
- $P > 0,05$ vliv faktoru není statisticky významný,
- $P < 0,001$ vliv faktoru je statisticky velmi významný,
- $0,01 < P < 0,05$ vliv faktoru je statisticky málo významný,
- $0,001 < P < 0,01$ vliv faktoru je statisticky středně významný (Andrade, 2019)

V následujících tabulkách a obrázcích jsou naměřené hodnoty statisticky a graficky zpracované pro lepší pochopení vlivu jednotlivých vlastností na hlasitost.



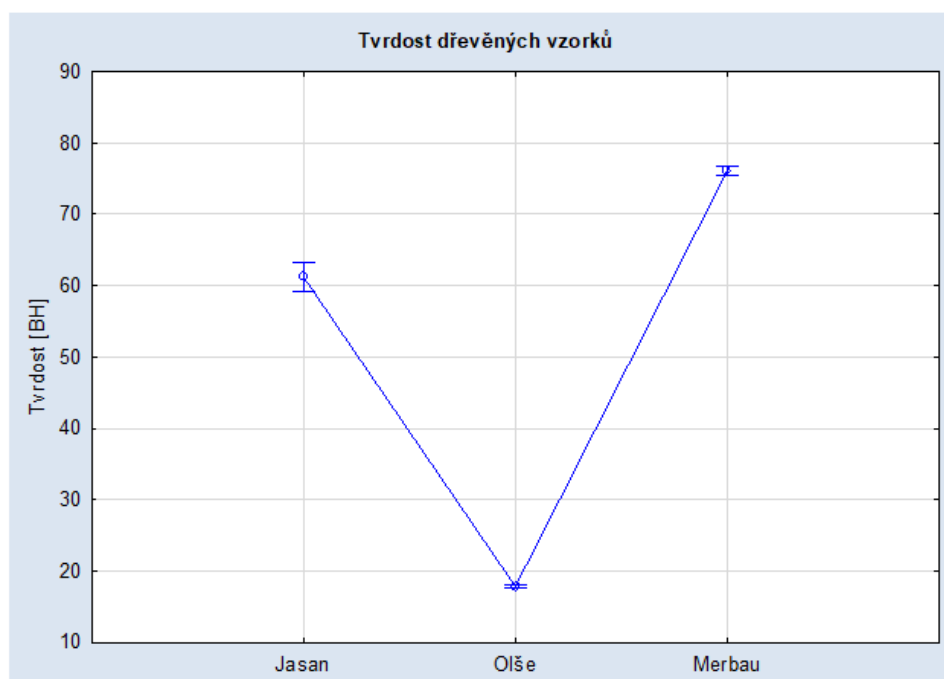
Obr. 33 Hustota zkušebních vzorků (autor)

Obrázek 33 ukazuje naměřené hodnoty hustoty u zkušebních vzorků. Vertikální škála ukazuje směrodatnou odchylku, horizontální škála druh dřeva. Na základě této směrodatné odchylky je možné vidět, že nedocházelo k zásadním rozdílům v hustotě v rámci jednoho druhu dřeva. Ze všech tří druhů dřeva byla největší směrodatná odchylka zaznamenána u jasanu.

Tab. 6 Duncanův test - hustota (autor)

Duncan test; variable Hustota (Spreadsheet6 in Workbook1) Approximate Probabilities for Post Hoc Tests Error: Between MS = 231,38, df = 51,000				
Cell No.	Dřevina	{1}	{2}	{3}
		698,29	538,05	937,08
1	Jasan		0,000115	0,000115
2	Olše	0,000115		0,000062
3	Merbau	0,000115	0,000062	

Na základě Tabulky 6, která uvádí Duncanův test ve vztahu k hustotě, lze říct, že mezi všemi druhy dřeva je statisticky velmi významná rozdílnost.



Obr. 34 Tvrđost zkušebních vzorků (autor)

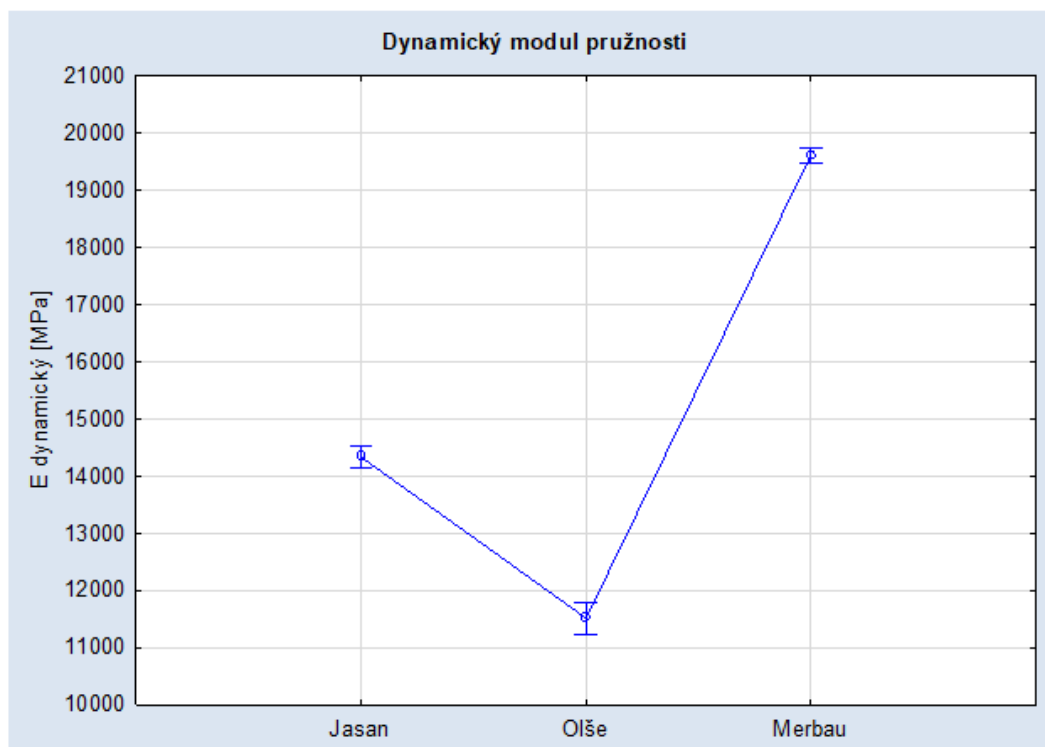
Obrázek 34 ukazuje naměřené hodnoty tvrdosti u zkušebních vzorků. Vertikální škála ukazuje směrodatnou odchylku, horizontální škála ukazuje druh dřeva. Na základě této směrodatné odchylky je možné vidět, že nedocházelo k zásadním rozdílům v tvrdosti

v rámci jednoho druhu dřeva. Ze všech tří druhů dřeva byla největší směrodatná odchylka zaznamenána u jasanu. Dle očekávání se projevil vliv hustoty na celkovou pevnost. S rostoucí hustotou se zvyšuje tvrdost a pevnost.

Tab. 7 Duncanův test - tvrdost (autor)

Duncan test; variable Tvrdost (Spreadsheet6 in Workbook1) Approximate Probabilities for Post Hoc Tests Error: Between MS = 27,635, df = 51,000				
Cell No.	Dřevina	{1}	{2}	{3}
		61,222	17,833	76,111
1	Jasan		0,000115	0,000115
2	Olše	0,000115		0,000062
3	Merbau	0,000115	0,000062	

Na základě *Tabulky 7*, která uvádí Duncanův test ve vztahu k tvrdosti, lze říct, že mezi všemi druhy dřeva je statisticky velmi významná rozdílnost.



Obr. 35 Dynamický modul pružnosti zkušebních vzorků (autor)

Obrázek 35 ukazuje naměřené hodnoty dynamického modulu pružnosti u zkušebních vzorků. Vertikální škála ukazuje směrodatnou odchylku, horizontální škála ukazuje druh dřeva. Na základě této směrodatné odchylky je možné vidět, že nedocházelo k zásadním rozdílům ve velikosti dynamického modulu pružnosti v rámci jednoho druhu dřeva. Ze všech tří druhů dřeva byla největší směrodatná odchylka zaznamenána u olše. Stejně jak u tvrdosti se zde projevil vliv hustoty na celkový dynamický modul pružnosti.

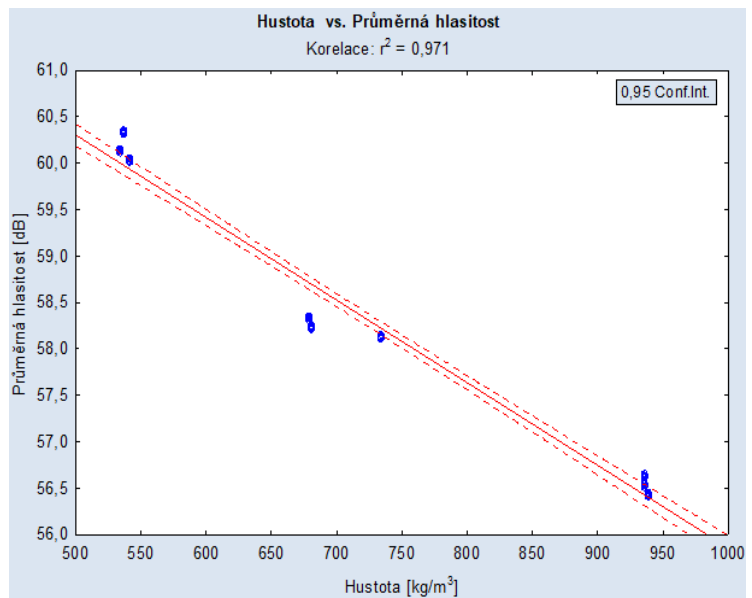
Tab. 8 Duncanův test - dynamický modul pružnosti (autor)

Duncan test; variable E dyn (Spreadsheet6 in Workbook1) Approximate Probabilities for Post Hoc Tests Error: Between MS = 7542E2, df = 51,000				
Cell No.	Dřevina	{1}	{2}	{3}
1	Jasan	14334,	0,000115	0,000115
2	Olše	0,000115		0,000062
3	Merbau	0,000115	0,000062	

Na základě *Tabulky 8*, která uvádí Duncanův test ve vztahu k dynamickému modulu pružnosti, lze říct, že mezi všemi druhy dřeva je statisticky velmi významná rozdílnost.

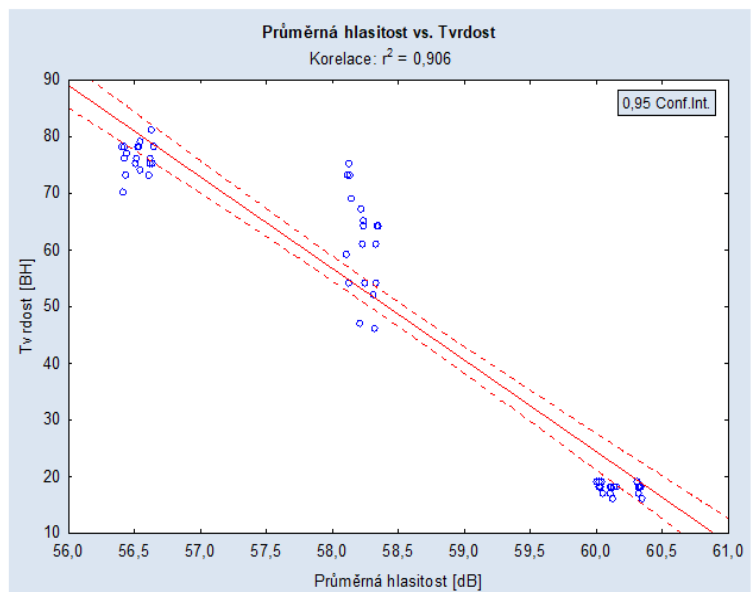
Obr. 36 Korelace hustoty a průměrné naměřené hlasitosti (autor)

Na *Obrázku 36* je znázorněna korelace mezi hustotou a průměrnou naměřenou hlasitostí. Tato korelace má vysokou hodnotu 0,971 a na základě toho lze říct, že mezi hustotou a průměrnou hlasitostí je skoro lineární závislost.



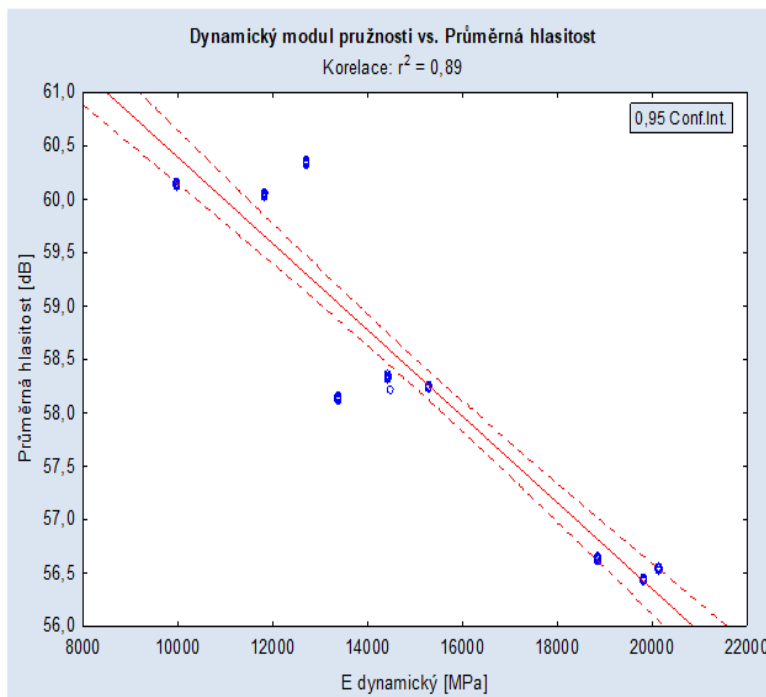
Obr. 37 Korelace tvrdosti a průměrné naměřené hlasitosti (autor)

Na *Obrázku 37* je znázorněna korelace mezi tvrdostí a průměrnou hlasitostí. Tato korelace má hodnotu 0,906 a na základě toho lze říct, že mezi tvrdostí a naměřenou hlasitostí je vysoká závislost.



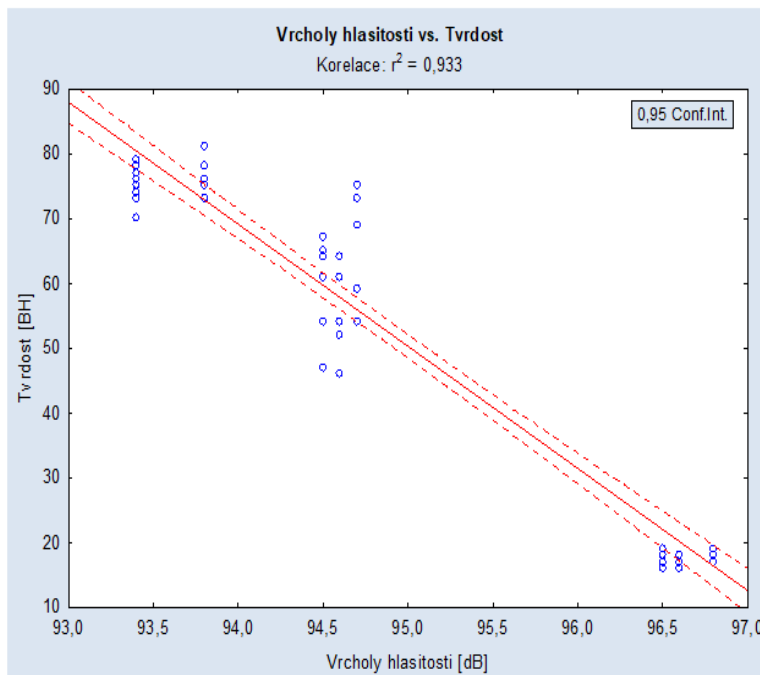
Obr. 38 Korelace dynamického modulu pružnosti a průměrné hlasitosti (autor)

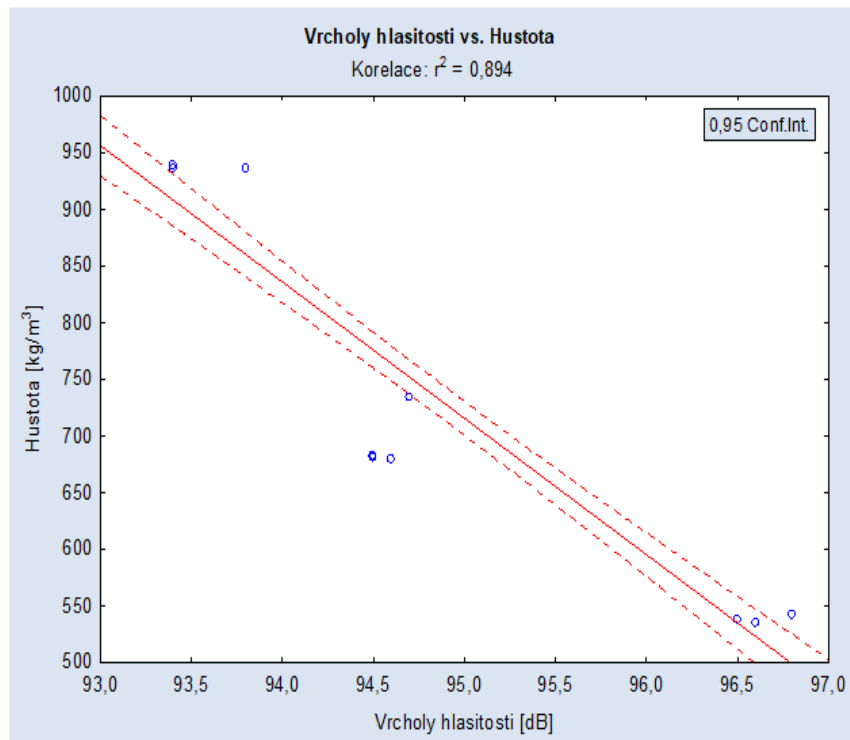
Na *Obrázku 38* je znázorněna korelace mezi dynamickým modulem pružnosti a průměrnou hlasitostí. Tato korelace má hodnotu 0,906 a na základě toho lze říct, že mezi dynamickým modulem pružnosti a průměrnou hlasitostí je vysoká závislost.



Obr. 39 Korelace tvrdosti a vrcholu hlasitosti (autor)

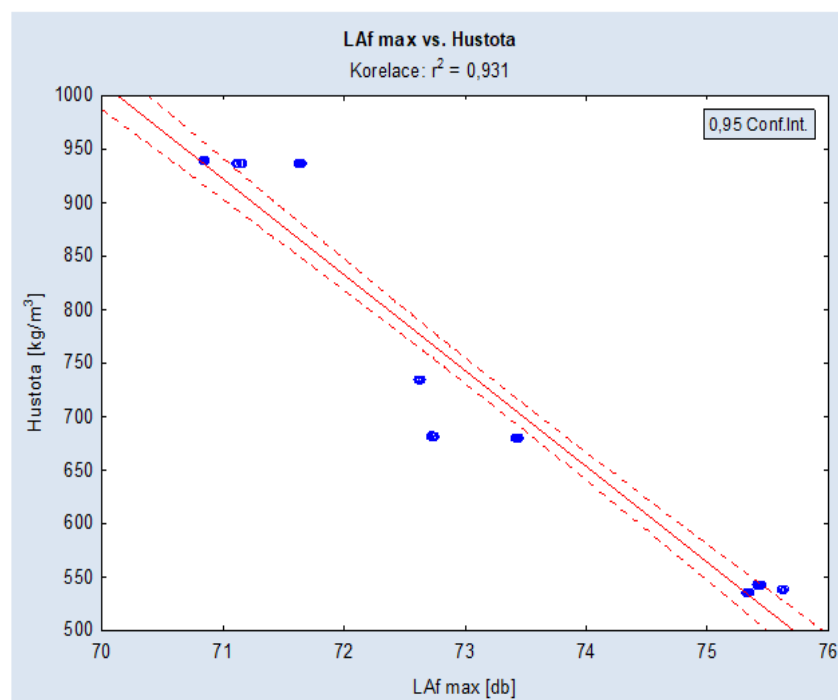
Na *Obrázku 39* je znázorněna korelace mezi tvrdostí a vrcholy hlasitosti. Tato korelace má hodnotu 0,933 a na základě toho lze říct, že mezi tvrdostí a naměřenými vrcholy hlasitosti je vysoká závislost.





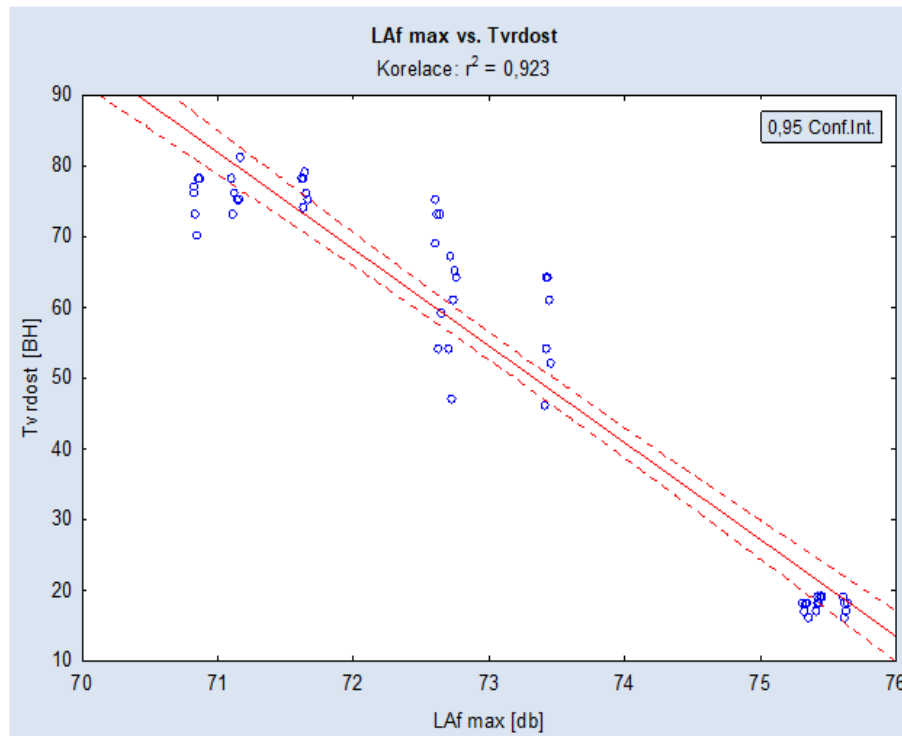
Obr. 40 Korelace hustoty a vrcholu hlasitosti (autor)

Na *Obrázku 40* je znázorněna korelace mezi hustotou a naměřenými vrcholy hlasitosti. Tato korelace má hodnotu 0,894 a na základě toho lze říct, že mezi tvrdostí a danými vrcholy hlasitosti je vysoká závislost.



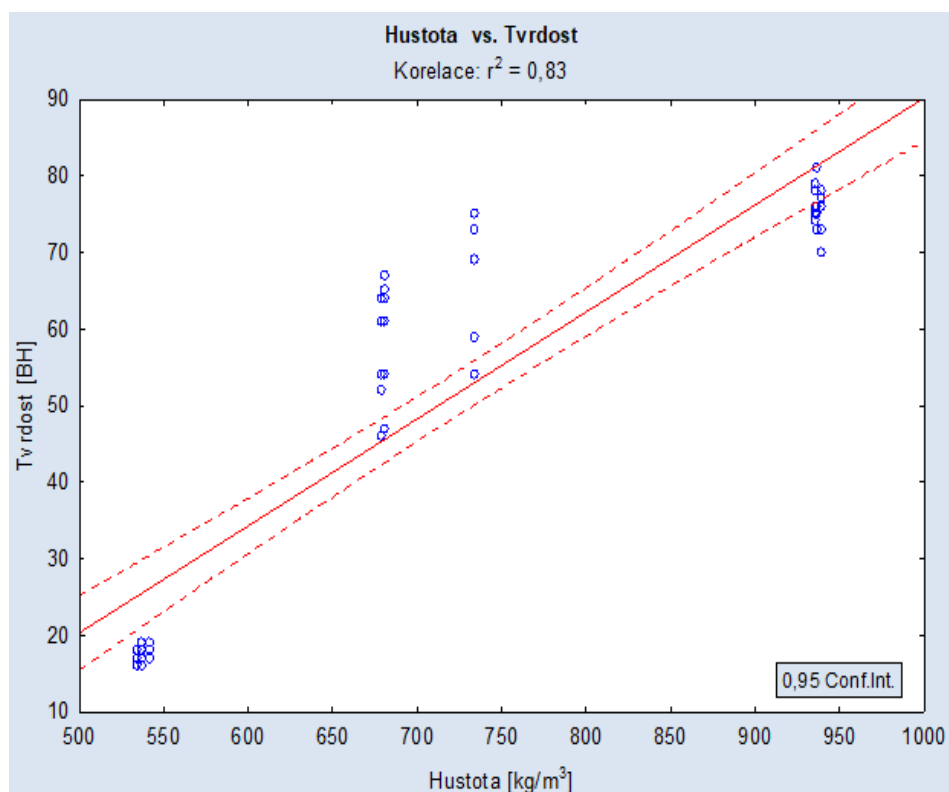
Obr. 41 Korelace hustoty a parametru LAFmax (autor)

Na *Obrázku 41* je znázorněna korelace mezi hustotou a parametrem hlasitosti LAF max. Tato korelace má hodnotu 0,931 a na základě toho lze říct, že mezi hustotou a parametrem LAF max je vysoká závislost.



Obr. 42 Korelace tvrdosti a parametru LAFmax (autor)

Na *Obrázku 42* je znázorněna korelace mezi tvrdostí a parametrem hlasitosti LAF max. Tato korelace má hodnotu 0,923 a na základě toho lze říct, že mezi tvrdostí a parametrem LAF max je vysoká závislost.



Obr. 43 Korelace hustoty a tvrdosti (autor)

Na *Obrázku 43* je znázorněna korelace mezi hustotou a tvrdostí. Tato korelace má hodnotu 0,83 a na základě toho lze říct, že mezi hustotou a tvrdostí je značná závislost.

4 Výsledky a diskuse

Dřeviny v tomto výzkumu byly charakterizovány různě velikými hodnotami pro hustotu, tvrdost i dynamický modul pružnosti. Tyto data poskytly široké spektrum vlastností dřeva nutných pro uskutečnění tohoto pokusu.

Roček (2005) pro merbau uvádí hustotu 830 kg/m^3 při vlhkosti 12 %. V tomto pokusu bylo pro merbau naměřeno cca o $100\text{-}110 \text{ kg/m}^3$ více, při stejné vlhkosti. To může být způsobeno rozdílným místem a jinými podmínkami růstu stromu. Pro olši Meier (2017) uvádí hustotu $400\text{-}500 \text{ kg/m}^3$ a zde bylo naměřeno o 10 % více. Požgaj a kol. (1993) uvádějí dynamický modul pružnosti jasanu při 12% vlhkosti 12000 MPa , kdežto zde byly hodnoty pro jasan při stejné vlhkosti o $1300\text{-}2300 \text{ MPa}$ více. To může být zapříčiněno jinými růstovými podmínkami, ale také metodou měření dynamického modulu pružnosti. Stejně jak uvádí Hirata a kol. (2001) se potvrdil vliv hustoty na celkovou pevnost, tvrdost a velikost dynamického modulu pružnosti.

Z naměřených výsledků vyplývá, že hlasitost vyprodukovaného zvuku (ne hlasitost signálu) má velmi vysokou, až skoro lineární závislost na hustotě dřeva. Čím nižší je hustota dřeva, tím větší je následná hlasitost. To odpovídá závěrům, které uvádí Nusselder (2021), že čím je u dřeva nižší hustota, tím lépe dřevo vibruje.

Velmi vysoká korelace byla také mezi tvrdostí dřeva a hlasitostí. Oproti hustotě a tvrdosti byla nižší závislost na hlasitosti u dynamického modulu pružnosti, ale stejně můžeme říct, že je tam vliv celkem vysoký. Hustota i tvrdost mají také velmi vysoký vliv na jednotlivé měřené parametry zvuku (LCpeak a LAF max). Díky tomu můžeme konstatovat, že druh dřeva má značný vliv na hlasitost zvuku a tyto výsledky odpovídají závěrům, ke kterým došli ve výzkumu Puszynski a kol. (2015).

Vizuální analýza zvuku ze snímačů ukázala, že druh dřeva má vliv na kvalitu zvuku strunných elektrických nástrojů. Stejně jak uvádí Puszynski a kol. (2015), výstupy z elektromagnetického snímače se sice lišily, v praxi ale tato odlišnost nebyla až tak signifikantní. Pro detailnější výsledky vlivu druhu dřeva na zvuk snímáný elektromagnetickými snímači by bylo potřeba další zkoumání s reálnými kytarami. Na druhou stranu, výstupy z piezoelektrického snímače ukazují veliký vliv vlastností dřeva na zvuk strunných nástrojů. U každého druhu dřeva byly pozorovány změny v počtech a hlasitostech vyšších harmonických frekvencí, které určují barvu zvuku, a tím od sebe odlišují stejně vysoké tóny, které díky nim mohou znít unikátně. U jasanu byly častěji zastoupeny hlasitější liché vyšší harmonické frekvence, které zvuku dodávají ostrost,

celkově byl ale zvuk z tohoto druhu dřeva vybalancovaný. U zkušebních vzorků ze dřeva merbau byly vždy silnější sudé vyšší harmonické frekvence, které tón činí teplejší a kulatější. Zvuk ze snímačů u zkušebních vzorků z olše se měnil v závislosti na konkrétním snímači. U elektromagnetického snímače byly hlasitěji zastoupeny liché vyšší harmonické frekvence, kdežto u piezoelektrického snímače to byly sudé. Celkově byl u olše zvuk plný, měl silné spodky a silnou výdrž. Nusselder (2021) uvádí zkušenosti výrobců elektrických kytar s vlivem konkrétního druhu dřeva na kvalitu zvuku a výsledky této práce s uvedenou praxí souhlasí. Vliv dřeva na zvuk nástroje se lišil i u použité struny, kde u vyšší struny E1 byl vliv méně rozmanitý, ale intenzivnější a u struny E6 byl vliv rozmanitější, ale ne tak intenzivní.

5 Závěr

Na základě naměřených výsledků můžeme konstatovat že:

- 1) Hlasitost zvuku strunných nástrojů je silně ovlivněna druhem dřeva a jeho vlastnostmi. Největší vliv na hlasitost nástroje má hustota, kde je závislost hlasitosti a hustoty skoro lineární. Vliv tvrdosti a dynamického modulu pružnosti na hlasitost je také velmi velký. Čím menší jsou tyto parametry, tím lépe dokáže dřevo vibrovat, a tím je hlasitost zvuku větší.
- 2) Dřevo má vliv na kvalitu zvuku elektrických strunných nástrojů s použitím obou druhů snímačů. U elektromagnetického snímače byly zaznamenány změny mezi druhy dřeva, ale nebyly tak signifikantní, kdežto u piezoelektrického snímače byly rozdíly mezi druhy velmi značné.
- 3) U zvuku vyprodukovaném z merbau, což je dřevo s vysokou hustotou, tvrdostí a dynamickým modulem pružnosti jsou více zastoupeny sudé vyšší harmonické frekvence a výsledný zvuk je tedy teplejší, jemnější a kulatější. Zvuk vyprodukovaný z jasanu, což je druh dřeva se střední hustotou, tvrdostí a dynamickým modulem pružnosti má silnější zastoupení lichých harmonických frekvencí. Zvuk je tedy ostřejší, údernější, ale také vybalancovaný. Zvuk vyprodukovaný z olše, která má z těchto druhů dřeva nejnižší hustotu, tvrdost a dynamický modul pružnosti, se lišil v závislosti na použitém snímači. U elektromagnetického snímače měla hlasitější zastoupení lichých vyšších harmonických frekvencí, u piezoelektrického byly naopak hlasitější sudé harmonické frekvence.
- 4) Rozdíly byly zaznamenány i v závislosti na použité struně. U vyšší struny E1 byl vliv méně rozmanitý, ale intenzivnější, kdežto u struny E6 byl vliv rozmanitější, ale méně intenzivní.

Přínosem této práce je popsání vlivu konkrétních mechanických a fyzikálních vlastností dřeva na kvalitu zvuku strunných elektrických nástrojů, který ještě nebyl tak konkrétně zkoumán a popsán. Tato práce může dopomoci k užívání nových druhů dřeva v průmyslu elektrických strunných nástrojů, které budou vhodné po zvukové, mechanické a estetické stránce, a zároveň mohou být levnější než typicky užívané druhy dřeva, kterých pomalu začíná být nedostatek.

6 Seznam použité literatury

- Ahvenainen, P. (2018). *Anatomy and mechanical properties of woods used in electric guitars*. Department of Physics, University of Helsinki.
- Andrade, C. (2019). The P Value and Statistical Significance: Misunderstandings, Explanations, Challenges, and Alternatives. *Indian Journal of Psychological Medicine*, 41(3), 210–215. https://doi.org/10.4103/IJPSYM.IJPSYM_193_19
- AV Basses. (2020). (online) [cit. 18.01.2022] www.avbasses.com. <https://www.avbasses.com/cz/vlastnosti/rezonancni-dreva/>
- Beavitt, A. (1996). *Humidity cycling*. Strad (November).
- Bennett, B. C. (2016). The Sound of Trees: Wood Selection in Guitars and Other Chordophones. *Economic Botany*, 70(1), 49–63. <https://doi.org/10.1007/s12231-016-9336-0>
- Binyamini, Y. (2019). Guitar Wood Types. *Lutherie Theory*. (online) [cit. 05.02.2022] <https://theelectricluthier.com/guitar-wood-types-explained/>
- Bucur, V. (2006). *Acoustics of wood* (2 vydání). Springer Series in Wood Science, Springer.
- Doyle, J. (1980). *The hardness of wood* [Dissertation, University of Canterbury]. <https://ir.canterbury.ac.nz/handle/10092/7511>
- Fanuel Ban, T. (2010). *Analysis of Electric Guitar Pickups*. LMS North America.
- Fletcher, N. H., & Rossing, T. D. (1998). Materials for Musical Instruments. In N. H. Fletcher & T. D. Rossing, *The Physics of Musical Instruments* (s. 711–734). Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-0-387-21603-4_22
- Gerken, T. (Ed.). (2005). *Acoustic guitar: An historical look at the composition, construction, and evolution of one of the world's most beloved instruments* (1st ed). Hal Leonard.
- Gerken, T., Hunter, D., Jasson, M., & Johnston, R. (2018). *Electric guitars: The illustrated encyclopedia*. Chartwell Books.
- Haines, D. (1979). *On musical instrument wood*. Catgut Acoustical Society Newsletter.
- Hill, R., Storakers, B., & Zdunek, A. B. (1989). A theoretical study of the Brinell hardness test. *1865*, 423. <https://doi.org/doi.org/10.1098/rspa.1989.0056>

-
- Hirata, S., Ohta, M., & Honma, Y. (2001). Hardness distribution on wood surface. *Journal of Wood Science*, 47(1), 1–7. <https://doi.org/10.1007/BF00776637>
- Hunt, D. G., & Balsan, E. (1996). *Why old fiddles sound sweeter*. Nature 379.
- Hunter, D. (2006). *The electric guitar sourcebook: How to find the sounds you like* (1. vyd.). Backbeat Books.
- Challacombe, C., & Block, E. (b.r.). *The 2014 NAMM global report* (Roč. 2014). The International Music Products Association.
- Chovanec, D. (1991). *Morfológia bunečných elementov listnatých drevin*. VŠLD.
- IUCN. (2017). *IUCN Red List of threatened species*. (online) [cit. 10.11.2021] www.iucnredlist.org
- Karjalainen, M., Penttinen, H., & Valimaki, V. (1999). *More acoustic sounding timbre from guitar pickups*. Helsinki University of Technology, Laboratory of Acoustics and Audio Signal Processing.
- Kollmann, F., & Cote, W. A. (1968). *Principles of Wood Science nad Technology* (Vol. 1.). Berlin - Heidelberg-New York, Springer-Verlag.
- Kollmann, F., & Krech, H. (1960). *Dynamische Messung der elastischen Holzeigenschaften und der Dämpfung*. Hüttemann Holz GmbH.
- Kutman, O. (1991). Akustika. In *Fyzika. České vysoké učení technické v Praze*.
- Lauš, L. (2013). *Dřevo jako konstrukční materiál* [Bakalářská práce]. Vysoké učení technické v Brně.
- Lospennato, L. (2015). *Electric guitar and bass making and marketing* (1. vyd.). Tango and Blum.
- Manning, J. E. (1997). *Statistical modeling of vibrating systems*. Encyclopaedia of acoustics.
- Martinez-Reyes, J. (2015). *Mahogany intertwined: Enviromateriality between Mexico, Fiji, and the Gibson Les Paul*. J. Mat. Cult. 20. DOI: 10.1177/ 1359183515594644
- Meier, E. (2017). *The wood database*. Wood Database. <https://www.wood-database.com/>
- Newland, D. E. (1989). *Mechanical vibration analysis and computation*. Longman.
- NIS. (2013). *Nábytkářský informační systém*. NIS - Materiál. (online) [cit. 14.11.2021] <http://www.n-i-s.cz/cz/material/page/477/>
-

-
- Nusselder, J. (2021). *Best wood for electric guitars*. Neaera. (online) [cit. 20.12.2021] <https://neaera.com/best-wood-for-electric-guitars/>
- Oberhoff, S. (2003). *Bogen für Streichinstrumente: Das elastische und anekastuche Verhalten von Fernambukholz und alternativen Materialien*. Institut für Metallkunde, Universität Stuttgart.
- Paté, A., Le Carrou, J.-L., Navarret, B., Dubois, D., & Fabre, B. (2015). Influence of the electric guitar's fingerboard wood on guitarists' perception. *United Ac. 101*. <https://doi.org/10.3813/AAA.918831>
- Podobský, J. (1999). *Procházky akustikou I*. MAFY a GAUDEAMUS.
- Post, J. C. (2013). *Musical Instruments* (s. 9780199757824–0135) [Data set]. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/obo/9780199757824-0135>
- Požgaj a kol., A. (1993). *Struktúra a vlastnosti dreva*. Technická univerzita vo Zvolene.
- Puszynski, J., Molinski, W., & Preis, A. (2015). The Effect of Wood on the Sound Quality of Electric String Instruments. *ACTA PHYSICA POLONICA A*. <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.127.114>
- Reichl, J., & Všetická, M. (2010). *Barva tónu*. Fyzika. (online) [cit. 23.01.2022] <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/195-barva-tonu>
- Riggio, M., & Piazza, M. (2010). Hardness Test. In B. Kasal & T. Tannert (Ed.), *In Situ Assessment of Structural Timber* (Roč. 7, s. 87–97). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-007-0560-9_10
- Richter, H. G. (1988). *Holz als Rohstoff für den Musikinstrumentenbau*. Moeck Verlag.
- Roček, I. (2005). *Dřevo tropických oblastí*. Fakulta lesnická a environmentální ČZU v Praze.
- Ross, R. (2010). *Wood Handbook—Wood as an Engineering Material*. Forest Products Laboratory.
- Sadie, S., & Tyrell, J. (2001). *The new Grove dictionary of music and musicians* (2nd ed.). Oxford University Press.
- Saranpää, P. (2003). *Wood Quality and its Biological Basis: Wood density and growth*. Blackwell Publishing Ltd.
- Seeling, U. (1999). Influence of compression wood on strength and elasticity of spruce timber. 2, 57, 81–91.
-

-
- Segerman, E. (1996). *Wood structure and what happened in the Hunt and Balsan experiment*. Fellowship of Makers and Researchers of Historical Instruments Quarterly 84.
- Segerman, E. (2001). *Some aspects of wood structure and function*. Journal of the Catgut Acoustical Society.
- Sell, J. (1989). *Eigenschaften und Kenngrößen von Holzarten*. LIGNUM, Schweizerische Arbeitsgemeinschaft für das Holz.
- Wagenfuhr, R., & Schreiber, C. (1989). *Holzatlas*.
- Wegst, U. G. K. (2006). Wood for sound. *American Journal of Botany*, 10. <https://doi.org/10.3732/ajb.93.10.1439>
- Zeidler, A., & Borůvka, V. (2016). *Stavba a vlastnosti dřeva hospodářsky významných dřevin—Podklady pro cvičení (první)*. Česká zemědělská univerzita v Praze.
- Zierl, B. (2005). *Obtaining the perfect violin sound: With fungi*. <http://www.empa.ch/plugin/template/empa/981/40307/—/1¼2>
- Zkouška tvrdosti podle Brinella*. (2016). HANYKO Praha s.r.o. (online) [cit. 11.01.2022] <https://www.hanyko-praha.cz/produkty/tvrdomery/co-je-tvrдост-a-jak-se-meri/zkouska-tvrдостi-podle-brinella/>
- Zwicker, E., & Fastl, H. (2007). *Psychoacoustics—Facts and Models*. Springer.

7 Přílohy

Příloha 1 Naměřené výsledky u vzorků jasanu (autor)

Vzorek	tvrdost (BH)	hustota (kg/m ³)	hlasitost (dB) LAeq	Lcpeak (dB)	LAFmax (dB)	Edyn (MPa)
Jasan 1	69	734,17	58,15	94,7	72,61	13399,87369
Jasan 1	73	734,16	58,14	94,7	72,62	13399,69117
Jasan 1	75	734,15	58,13	94,7	72,61	13399,50865
Jasan 1	54	734,14	58,13	94,7	72,63	13399,32613
Jasan 1	73	734,13	58,12	94,7	72,64	13399,14362
Jasan 1	59	734,12	58,11	94,7	72,65	13398,9611
Jasan 2	52	679,43	58,31	94,6	73,46	14438,54981
Jasan 2	46	679,42	58,32	94,6	73,41	14438,3373
Jasan 2	61	679,41	58,33	94,6	73,45	14438,12479
Jasan 2	64	679,4	58,34	94,6	73,44	14437,91228
Jasan 2	54	679,39	58,33	94,6	73,43	14437,69977
Jasan 2	64	679,38	58,35	94,6	73,42	14437,48726
Jasan 3	47	681,35	58,21	94,5	72,73	14479,35168
Jasan 3	67	681,34	58,22	94,5	72,72	15303,11365
Jasan 3	61	681,33	58,23	94,5	72,74	15302,88905
Jasan 3	64	681,32	58,24	94,5	72,76	15302,66445
Jasan 3	65	681,31	58,24	94,5	72,75	15302,43984
Jasan 3	54	681,3	58,25	94,5	72,71	15302,21524

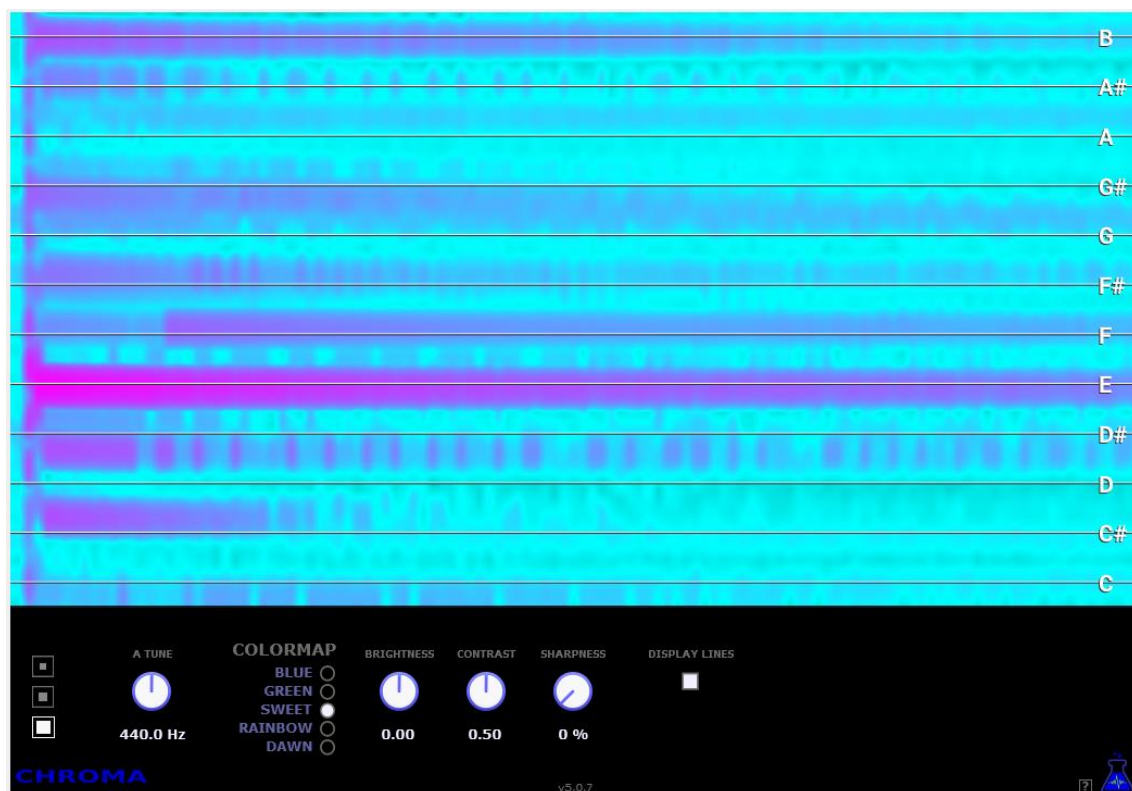
Příloha 2 Naměřené výsledky u vzorků merbau (autor)

Vzorek	tvrdost (BH)	hustota (kg/m ³)	hlasitost (dB) LAeq	LCpeak (dB)	LAFmax (dB)	Edyn (MPa)
Merbau 1	78	939,1	56,41	93,4	70,87	19835,29561
Merbau 1	70	939,13	56,42	93,4	70,85	19835,92926
Merbau 1	76	939,12	56,43	93,4	70,83	19835,71804
Merbau 1	78	939,11	56,43	93,4	70,86	19835,50682
Merbau 1	73	939,08	56,44	93,4	70,84	19834,87318
Merbau 1	77	939,09	56,45	93,4	70,83	19835,08439
Merbau 2	73	936,11	56,61	93,8	71,12	18868,33678
Merbau 2	76	936,14	56,62	93,8	71,13	18868,94146
Merbau 2	75	936,13	56,62	93,8	71,15	18868,7399
Merbau 2	81	936,12	56,63	93,8	71,17	18868,53834
Merbau 2	75	936,09	56,64	93,8	71,16	18867,93366
Merbau 2	78	936,1	56,65	93,8	71,11	18868,13522
Merbau 3	75	936,02	56,51	93,4	71,67	20136,64341
Merbau 3	74	936,05	56,55	93,4	71,63	20137,2888
Merbau 3	79	936,04	56,55	93,4	71,65	20137,07367
Merbau 3	78	936,03	56,54	93,4	71,62	20136,85854
Merbau 3	78	936,01	56,53	93,4	71,64	20136,42827
Merbau 3	76	936	56,52	93,4	71,66	20136,21314

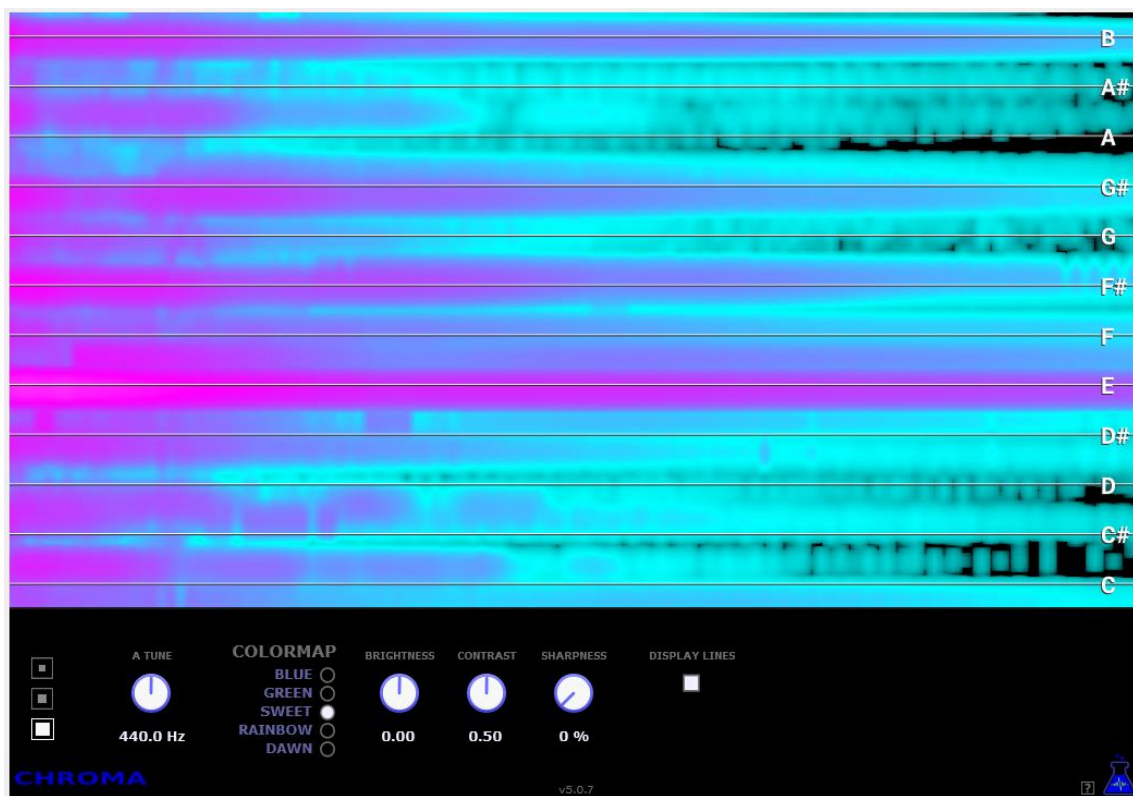
Příloha 3 Naměřené výsledky u vzorků olše (autor)

Vzorek	tvrdost (BH)	hustota (kg/m3)	hlasitost (dB) LAeq	LCpeak (dB)	LAFmax (dB)	Edyn (MPa)
Olše 1	19	537,5	60,31	96,5	75,61	12707,46961
Olše 1	18	537,53	60,32	96,5	75,62	12708,17886
Olše 1	18	537,52	60,33	96,5	75,63	12707,94244
Olše 1	17	537,51	60,32	96,5	75,64	12707,70603
Olše 1	18	537,49	60,34	96,5	75,65	12707,23319
Olše 1	16	537,48	60,35	96,5	75,63	12706,99677
Olše 2	19	542,2	60,01	96,8	75,46	11844,24864
Olše 2	19	542,23	60,02	96,8	75,45	11844,90398
Olše 2	18	542,22	60,02	96,8	75,44	11844,68554
Olše 2	18	542,21	60,03	96,8	75,43	11844,46709
Olše 2	19	542,19	60,04	96,8	75,42	11844,03019
Olše 2	17	542,18	60,05	96,8	75,41	11843,81174
Olše 3	18	534,44	60,11	96,6	75,35	9987,6886
Olše 3	18	534,47	60,12	96,6	75,34	9988,249244
Olše 3	17	534,46	60,11	96,6	75,33	9988,062363
Olše 3	16	534,45	60,13	96,6	75,36	9987,875482
Olše 3	18	534,43	60,14	96,6	75,32	9987,501719
Olše 3	18	534,42	60,15	96,6	75,31	9987,314838

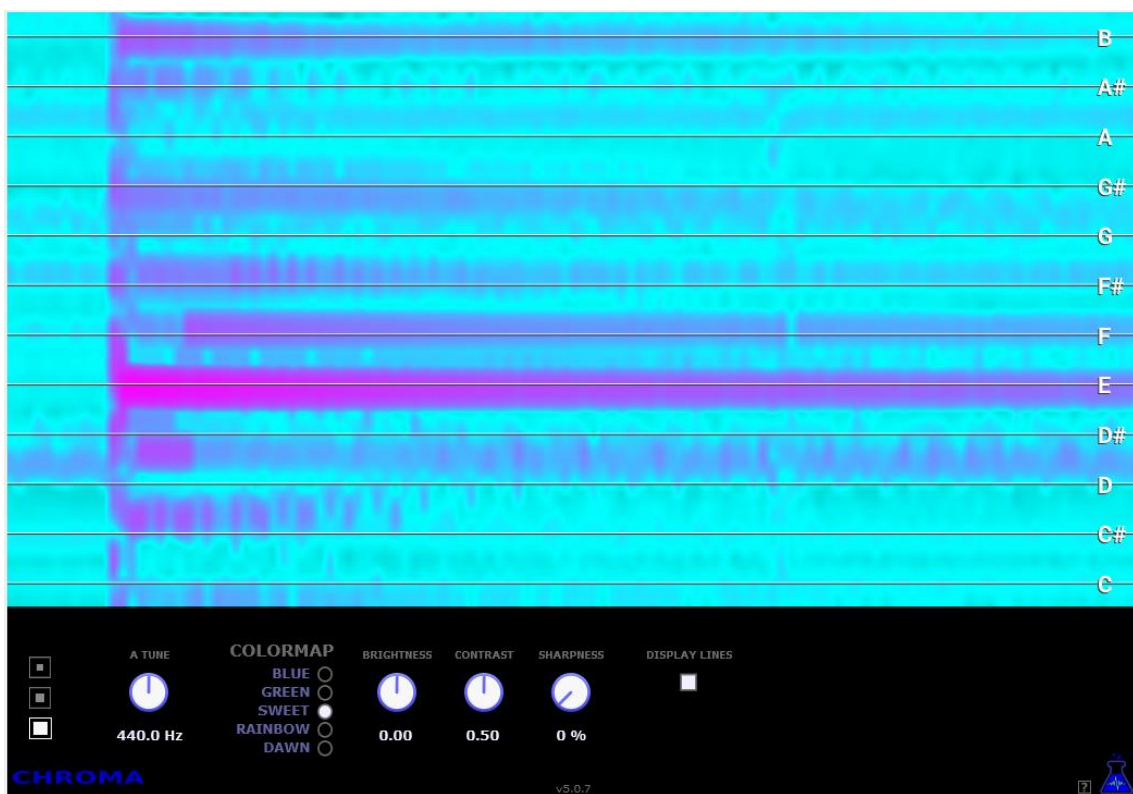
Příloha 4 Jasan-2-E1 elektromagnetický snímač (autor)



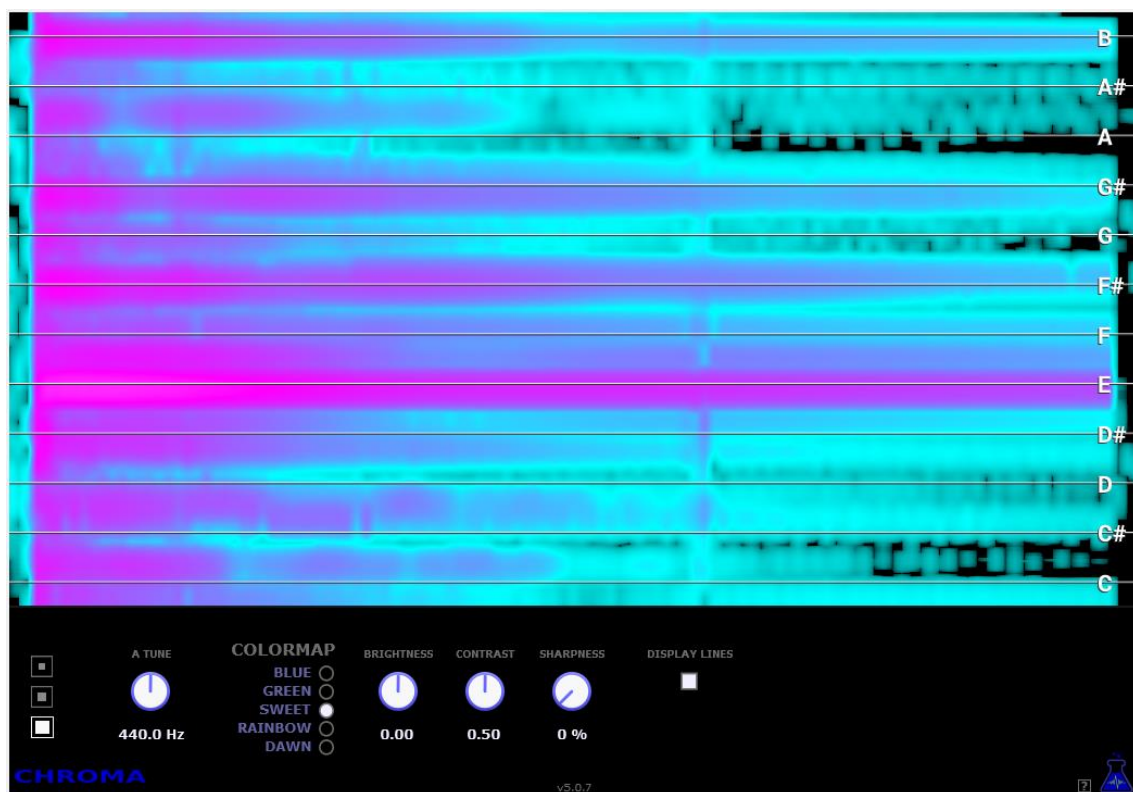
Příloha 5 Jasan-2-E1 piezoelektrický snímač (autor)



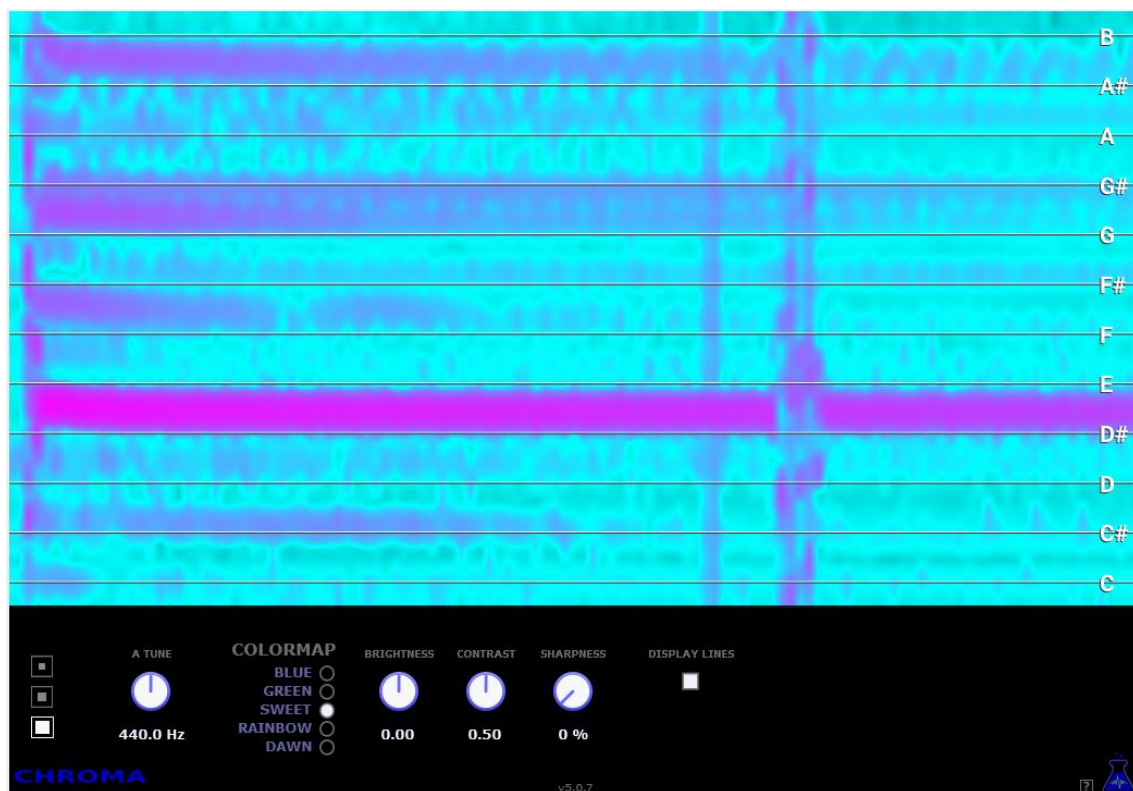
Příloha 6 Jasan-3-E1 elektromagnetický snímač (autor)



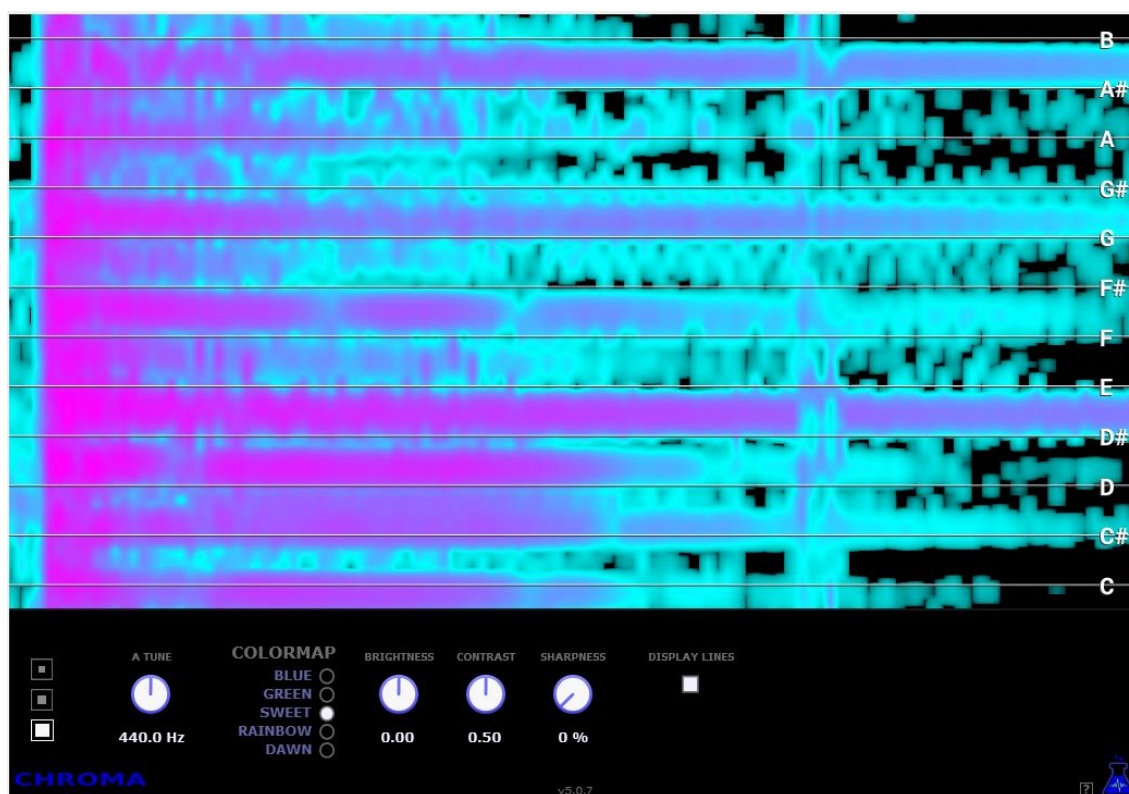
Příloha 7 Jasan-3-E1 piezoelektrický snímač (autor)



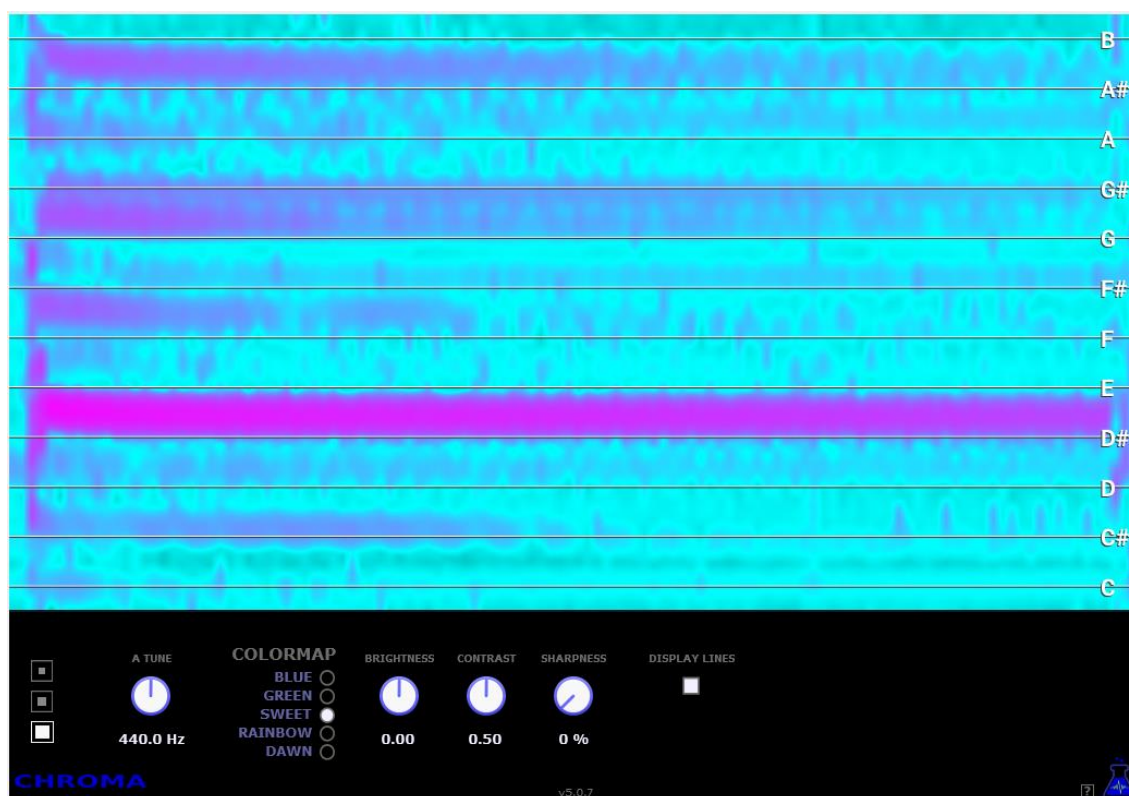
Příloha 8 Jasan-2-E6 elektromagnetický snímač (autor)



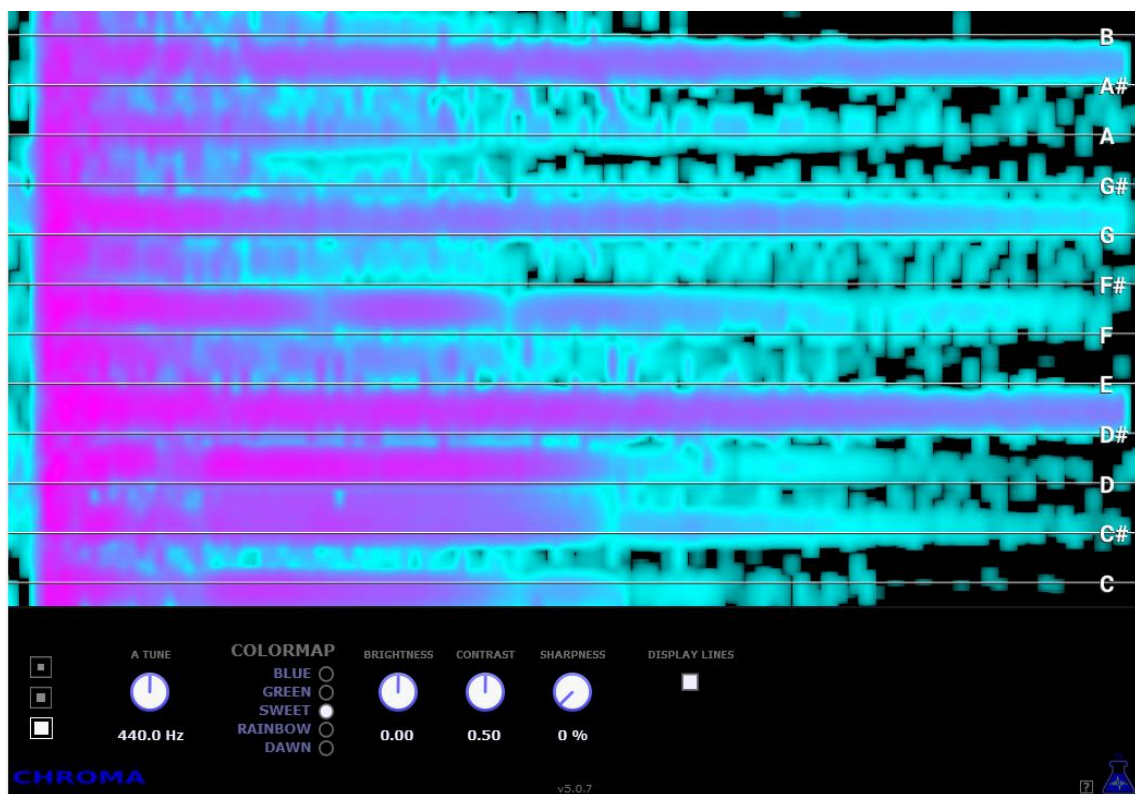
Příloha 9 Jasan-2-E6 piezoelektrický snímač (autor)



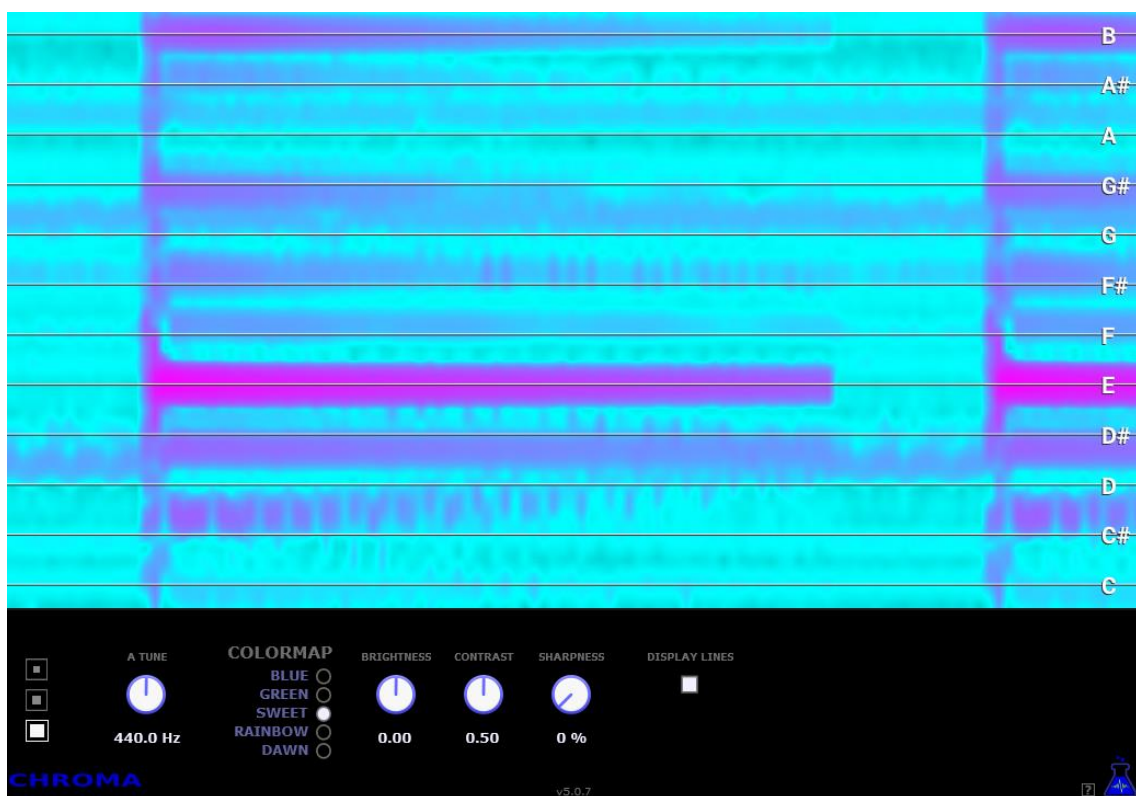
Příloha 10 Jasan-3-E6 elektromagnetický snímač (autor)



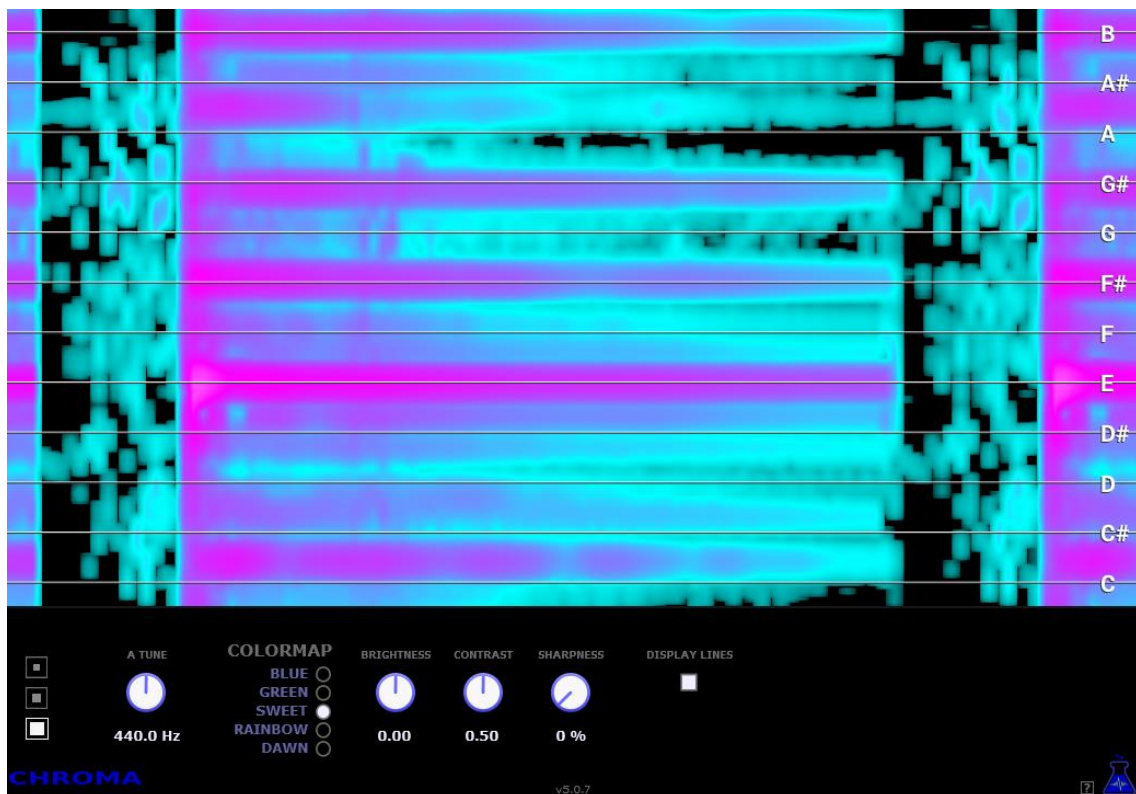
Příloha 11 Jasan-3-E6 piezoelektrický snímač (autor)



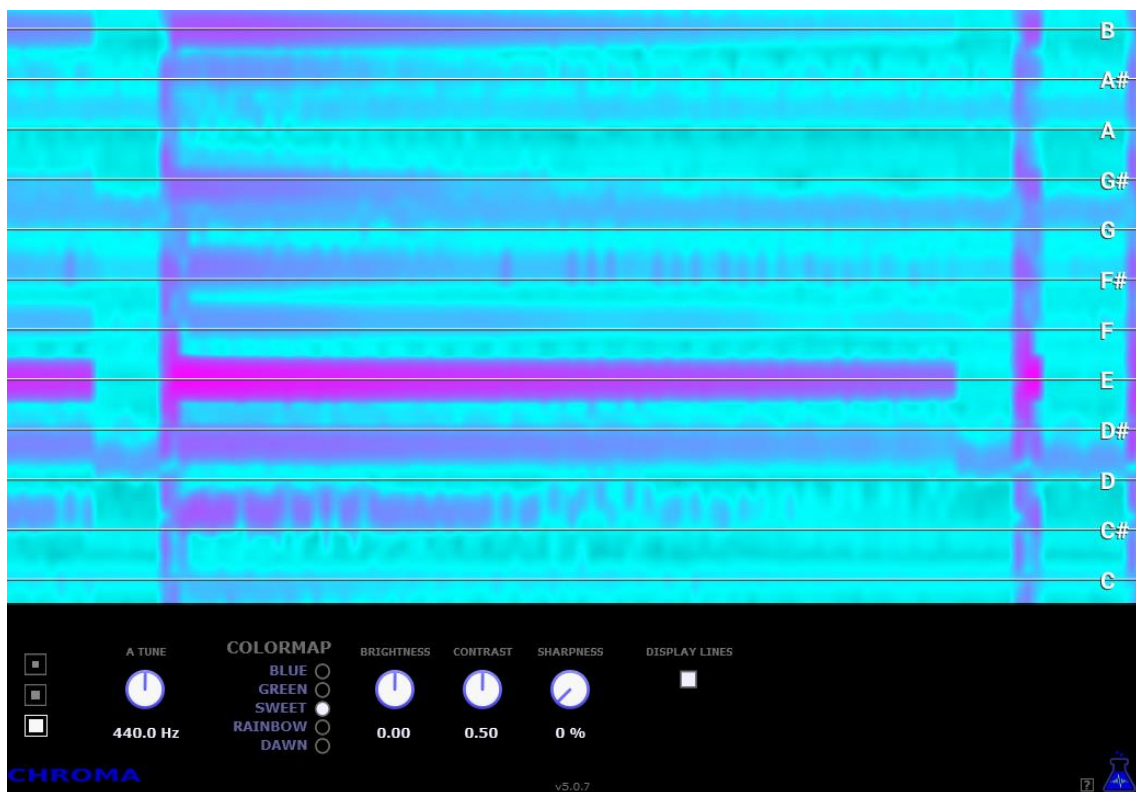
Příloha 12 Merbau-2-E1 elektromagnetický snímač (autor)



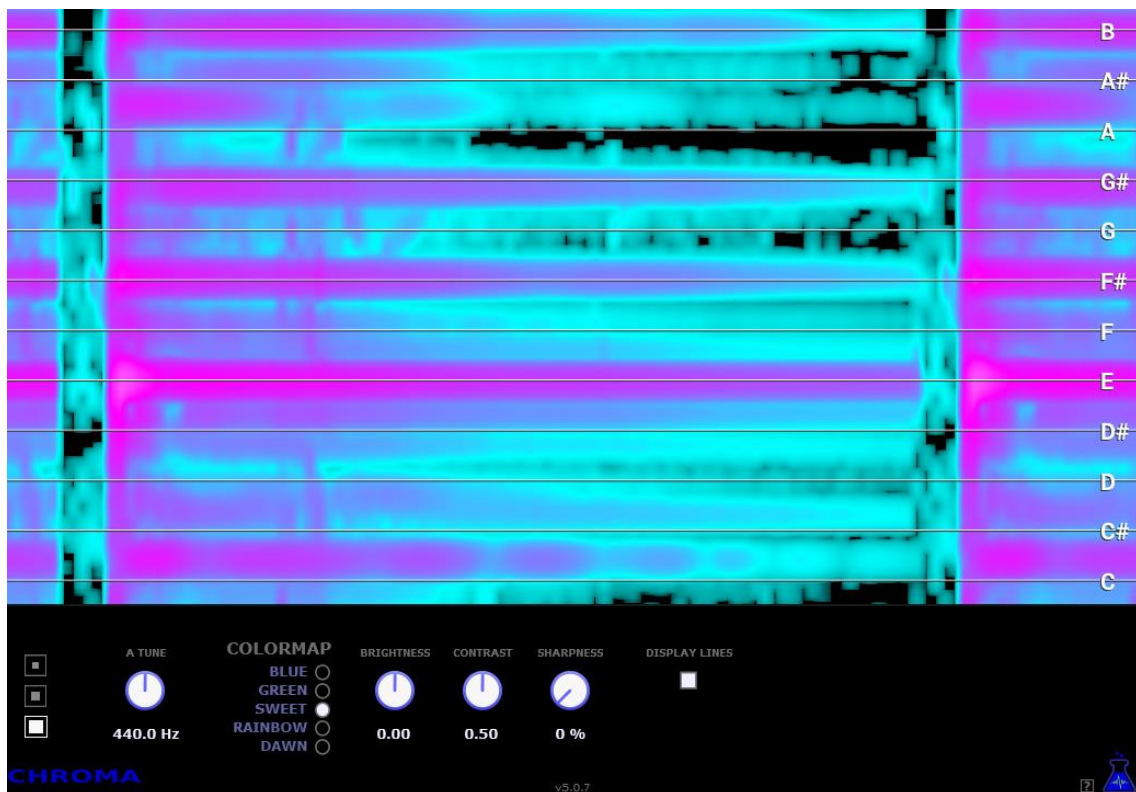
Příloha 13 Merbau-2-E1 piezoelektrický snímač (autor)



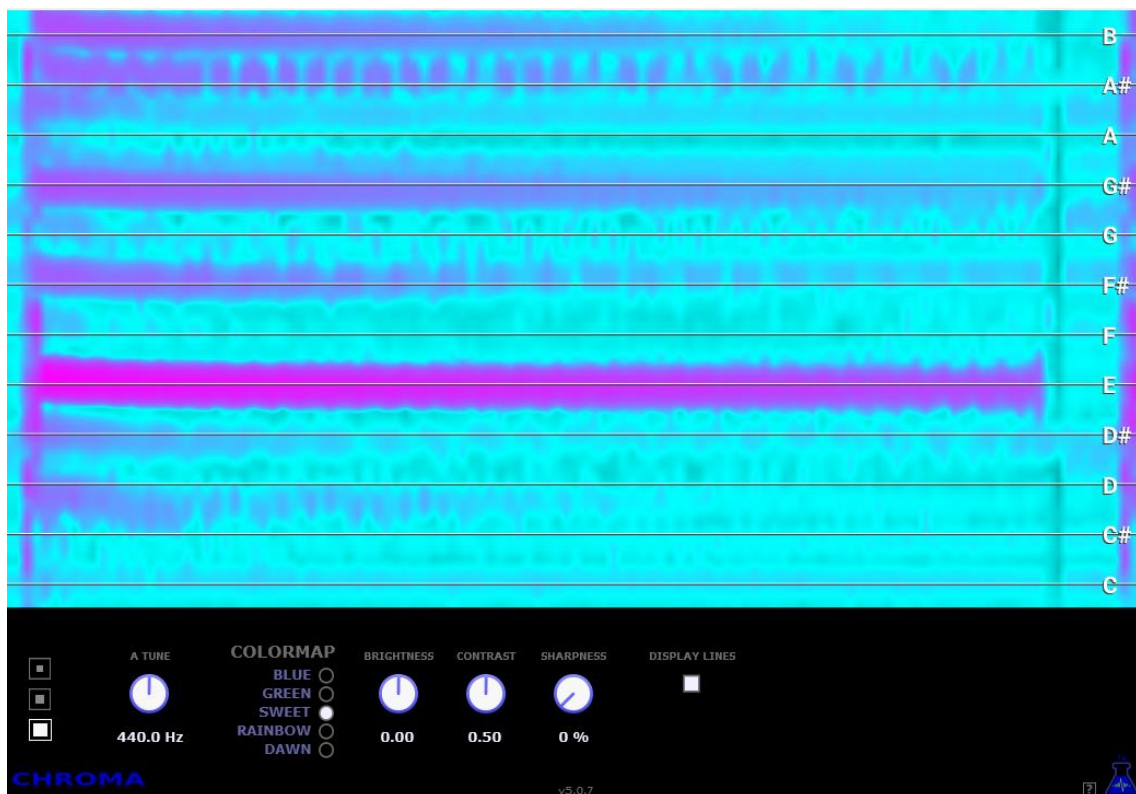
Příloha 14 Merbau-3-E1 elektromagnetický snímač (autor)



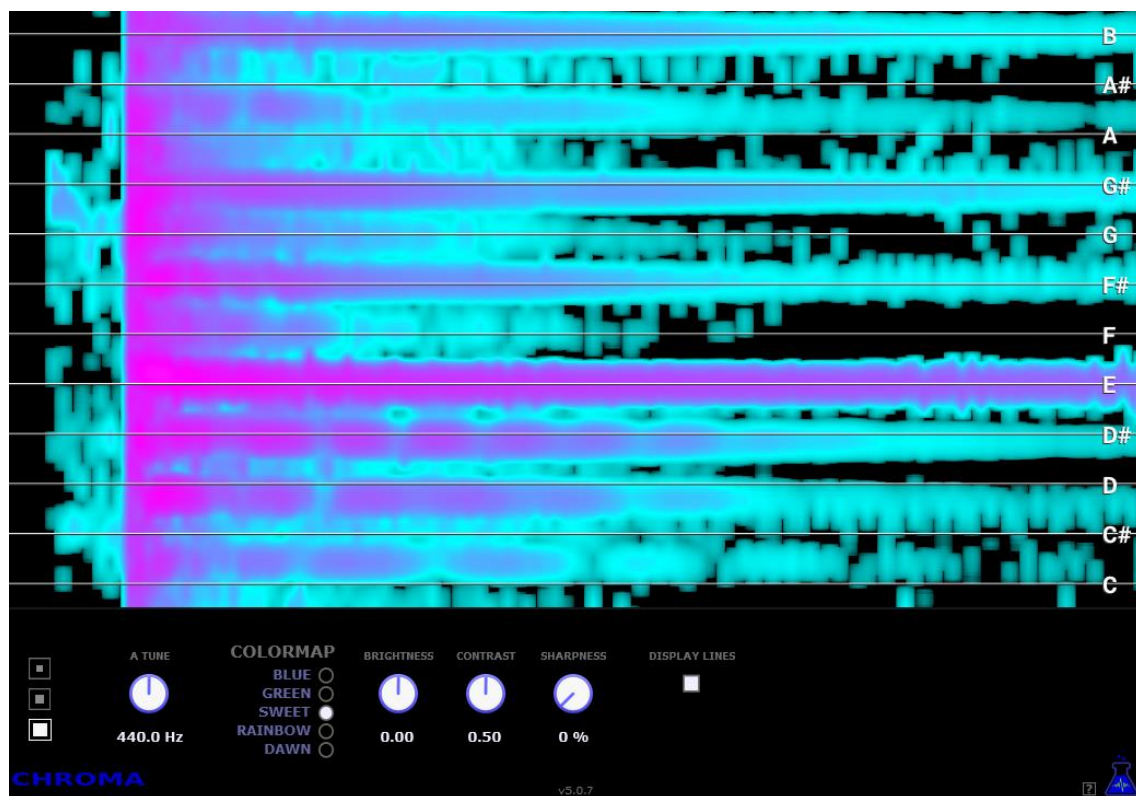
Příloha 15 Merbau-3-E1 piezoelektrický snímač (autor)



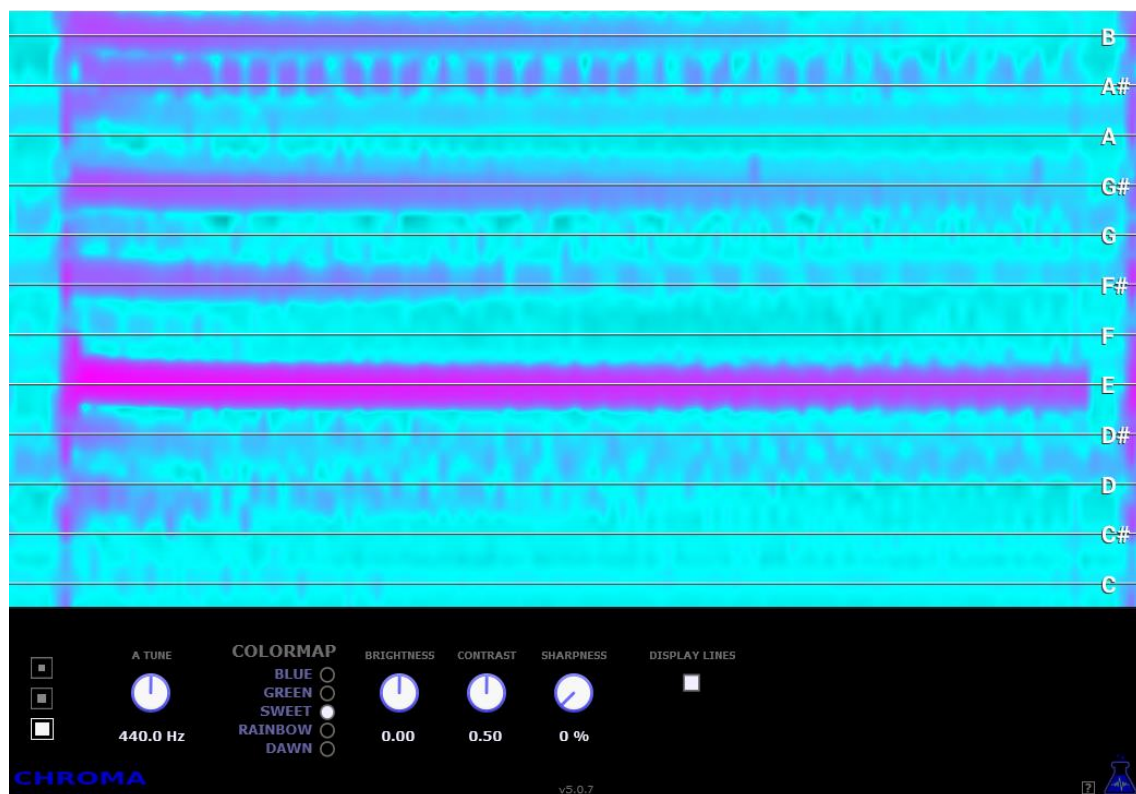
Příloha 16 Merbau-2-E6 elektromagnetický snímač (autor)



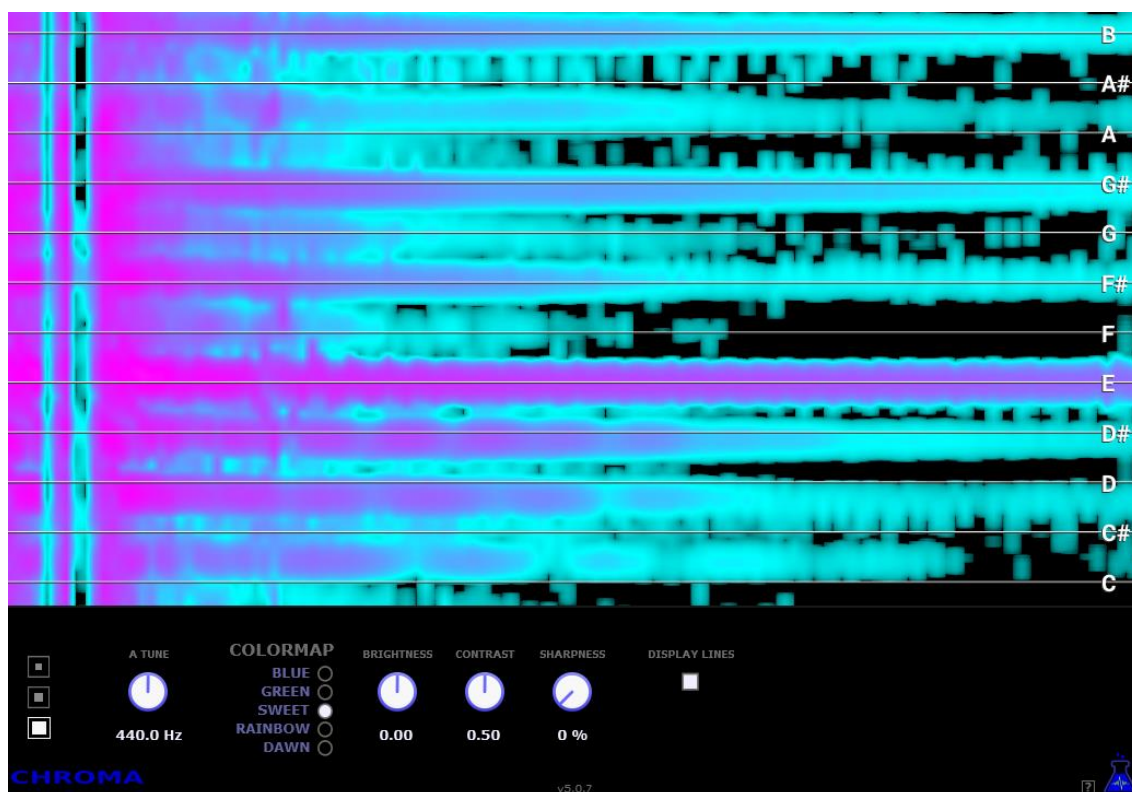
Příloha 17 Merbau-2-E6 piezoelektrický snímač (autor)



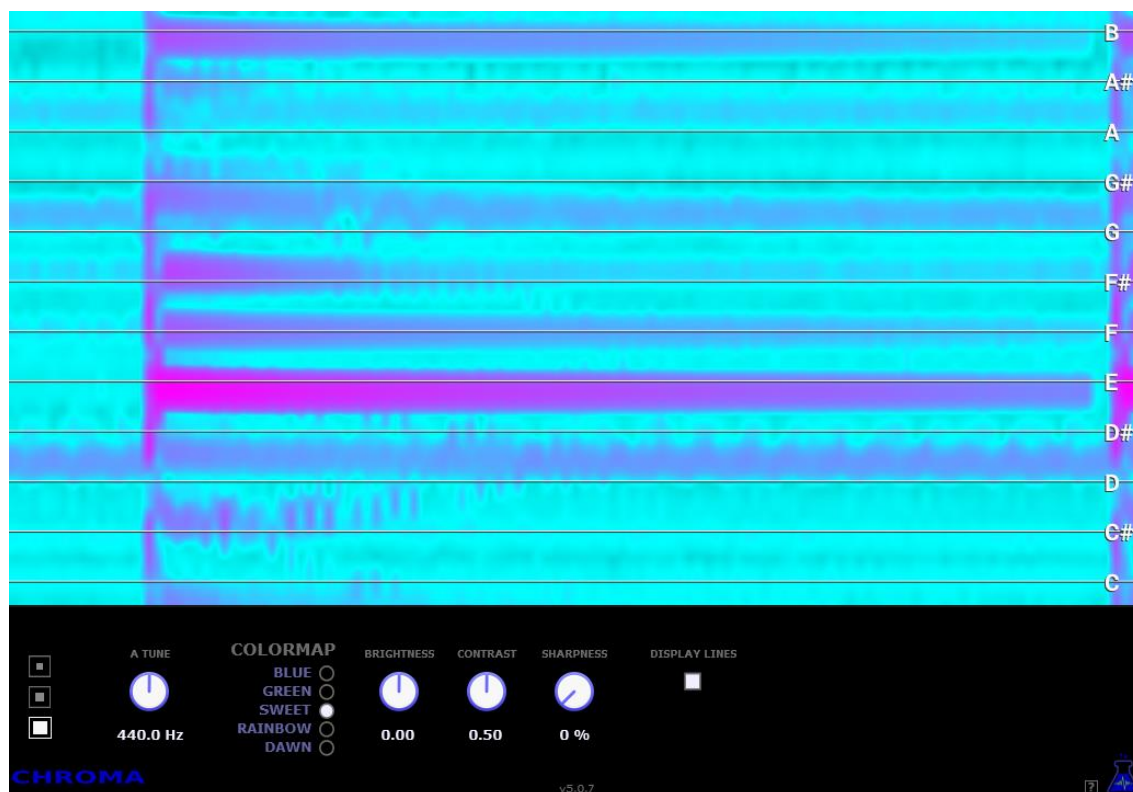
Příloha 18 Merbau-3-E6 elektromagnetický snímač (autor)



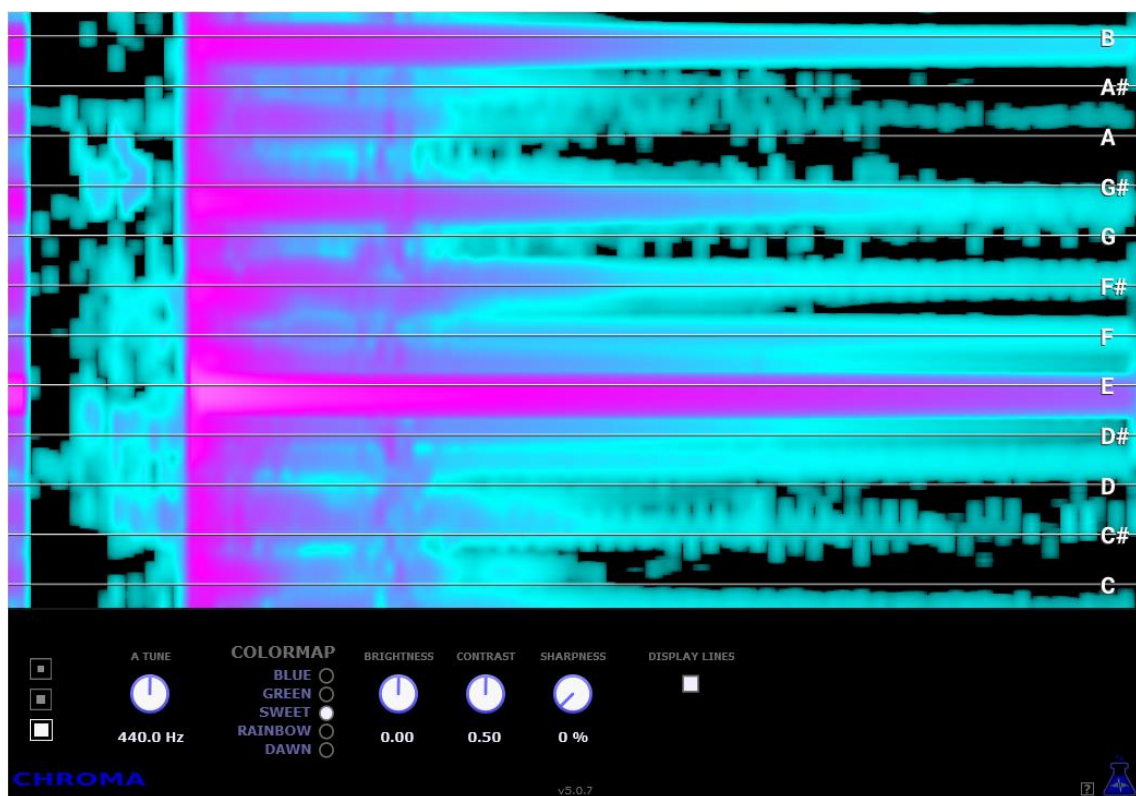
Příloha 19 Merbau-3-E6 piezoelektrický snímač (autor)



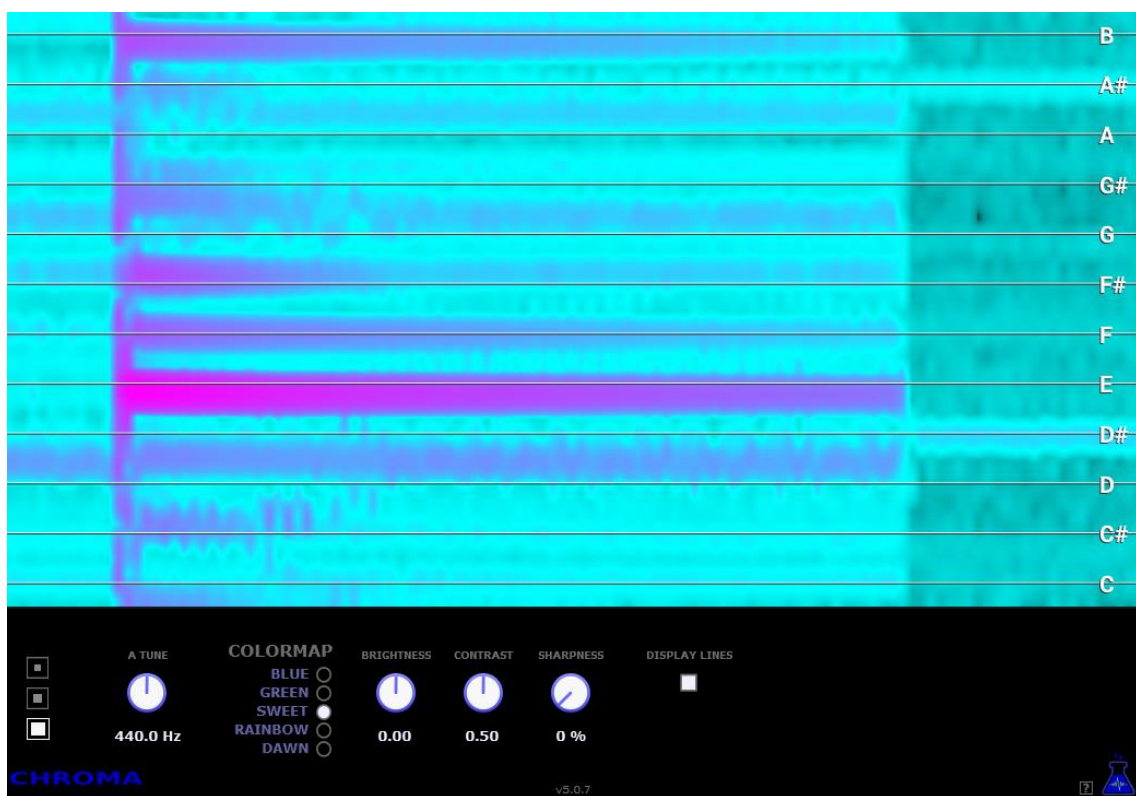
Příloha 20 Olše-2-E1 elektromagnetický snímač (autor)



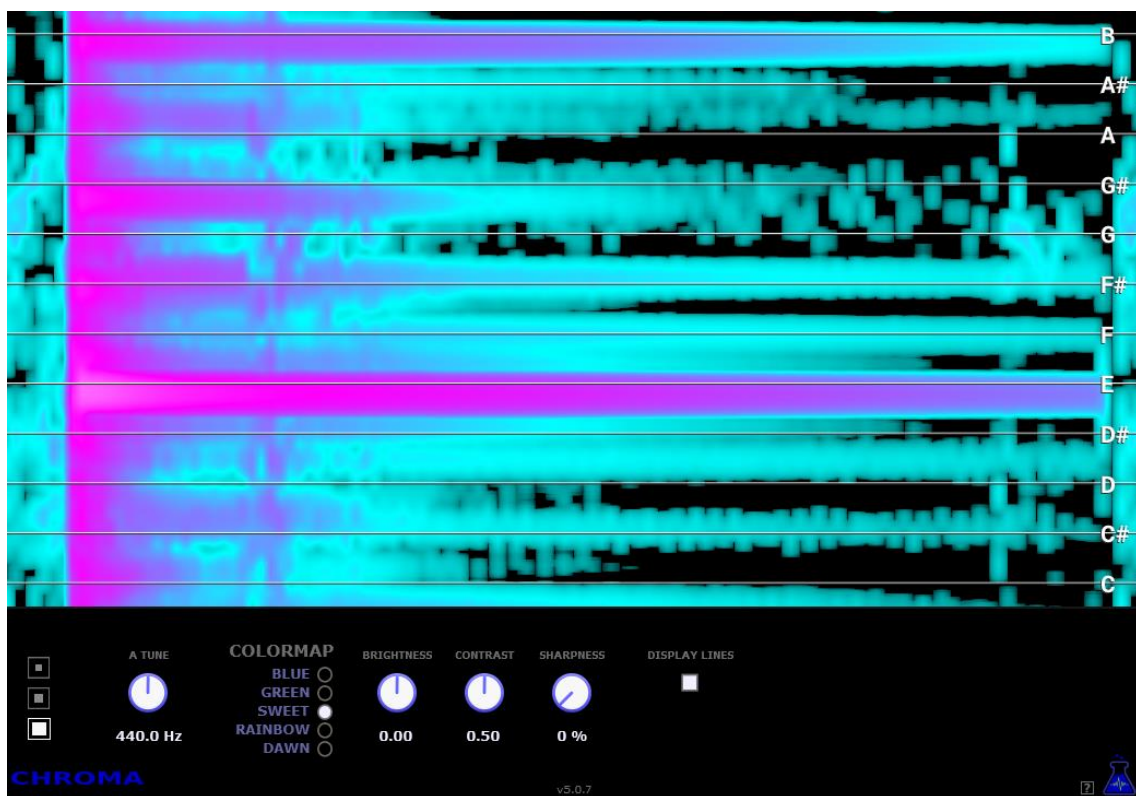
Příloha 21 Olše-2-E1 piezoelektrický snímač (autor)



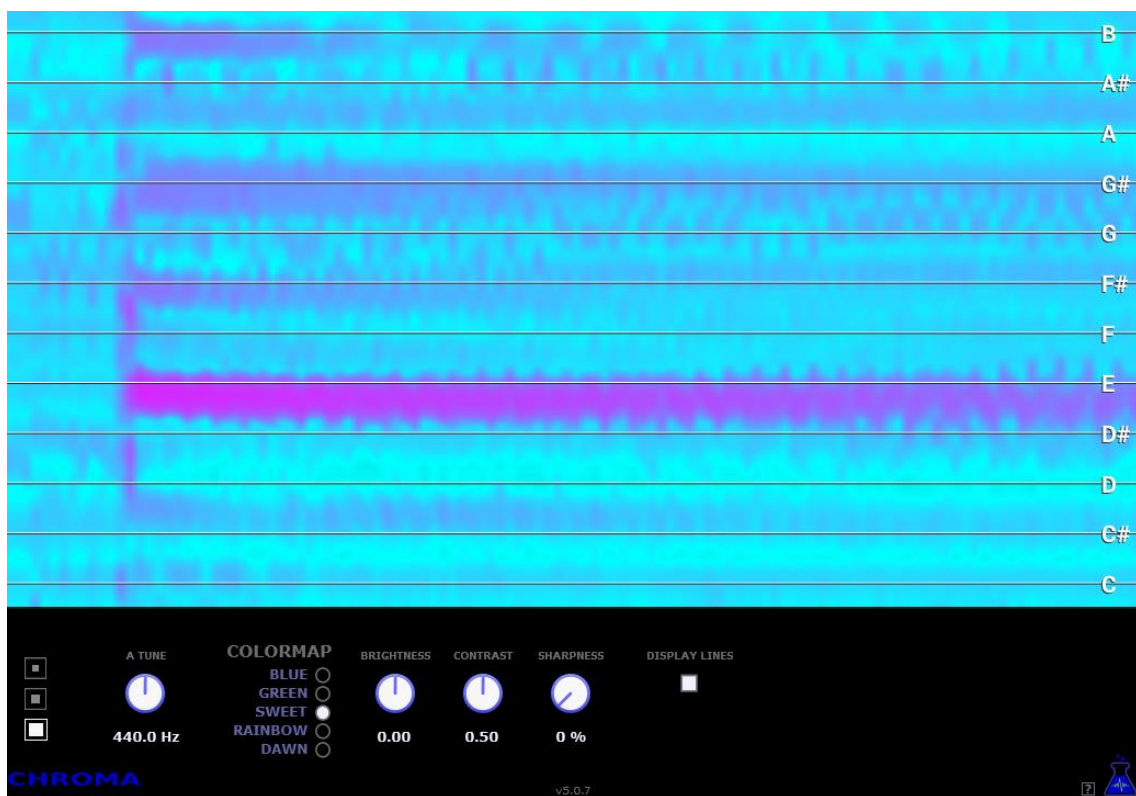
Příloha 22 Olše-3-E1 elektromagnetický snímač (autor)



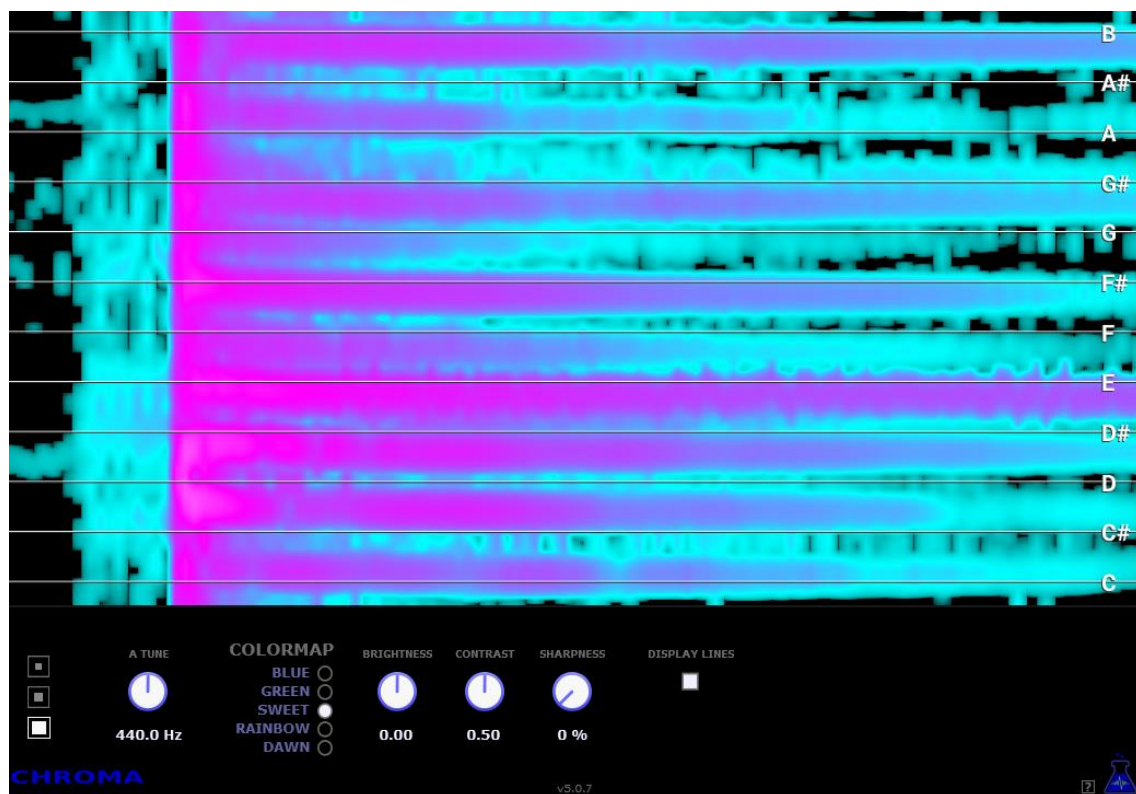
Příloha 23 Olše-3-E1 piezoelektrický snímač (autor)



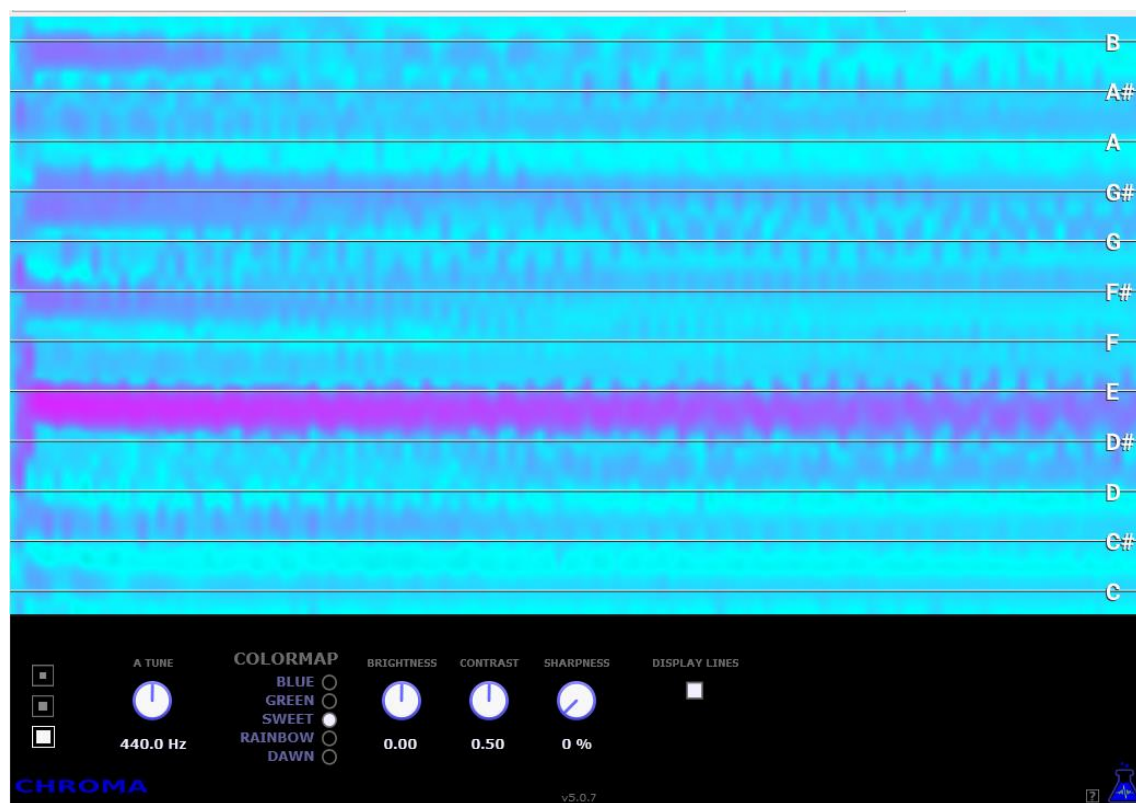
Příloha 24 Olše-2-E6 elektromagnetický snímač (autor)



Příloha 25 Olše-2-E6 piezoelektrický snímač (autor)



Příloha 26 Olše-3-E6 elektromagnetický snímač (autor)



Příloha 27 Olše-3-E6 piezoelektrický snímač (autor)

