Mendelova univerzita v Brně

Lesnická a dřevařská fakulta

Ústav nauky o dřevě

Vliv opracování a máčení na frekvenčně-rezonanční vlastnosti dřevěných nosníků reálných rozměrů

Diplomová práce

Martin Janda

2016/2017

Lesnická
a dřevařská
fakulta

Ústav nauky o dřevě
Akademický rok: 2016/2017

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Zpracovatel :	**Bc. Martin Janda**
Studijní program:	Dřevařské inženýrství
Obor:	Dřevařské inženýrství
Konzultant:	Ing. Jan Tippner, Ph.D.
Název tématu:	**Vliv opracování a máčení na frekvenčně-rezonanční vlastnosti dřevěných nosníků reálných rozměrů**
Rozsah práce:	50-60 stran včetně příloh

Zásady pro vypracování:

1. Vyhledat literární zdroje týkající se frekvenčně-rezonančních vlastností dřeva a jejich měření. Sepsat základní teorii kmitání dřevěných desek a vyhledat současné poznatky v dané oblasti
2. Změřit vlastní frekvence frekvenčně-rezonanční metodou vzorků reálných rozměrů s různými způsoby opracování (řezání, tesání, máčení)
3. Statisticky vyhodnotit data tak, aby bylo nalezeno co možná nejvíce vztahů (korelací) mezi jednotlivými veličinami a tak, aby bylo možné stanovit vliv opracování na frekvenčně-rezonanční vlastnosti vzorků reálných rozměrů.
4. Práce bude členěna do následujících kapitol: Úvod, Cíl práce, Literární přehled, Materiál a Metodika, Výsledky, Diskuse, Závěr, Přehled použité literatury.

Mendelova
univerzita
v Brně

Seznam odborné literatury:

1. BUCUR, V. *Acoustics of wood.* 2. vyd. Berlin: Springer, 2010. 393 s. ISBN 978-3-642-06555-2.
2. BUCUR, V. *Nondestructive characterization and imaging of wood.* Berlin: Springer, 2003. 354 s. ISBN 978-3-642-07860-6.
3. *Mechanics of wood and wood composities.* Malabar, Fla.: Krieger Pub., 1982. 712 s. ISBN 0-89464-777-6.
4. KOŇAS, P. *Numerická simulace rezonanční desky klavíru.* Disertační práce. Brno,: MENDELU Brno, 2010. 229.
5. DRDÁCKÝ, M. – KLOIBER, M. Non-desestructive survey of historic timber. In DRDÁCKÝ, M. *In-situ Evaluation of Historic Wood and Masonry Structures.* Praha: 2007, s. 8–23.
6. KOTLÍNOVÁ, M. – KLOIBER, M. – VASCONCELOS, G. – LOURENÇO, P. – BRANCO, J. *Nondestructive Testing of Wood.* Praha: Lesnická práce, 2008. 40 s. první. ISBN 978-80-87154-14-4.

Datum zadání diplomové práce: říjen 2015

Termín odevzdání diplomové práce: duben 2017

L.S.

Lesnická a dřevařská fakulta
Mendelova univerzita v Brně
-3-

Bc. Martin Janda
Autor práce

Ing. Václav Sebera, Ph.D.
Vedoucí práce

doc. Dr. Ing. Pavel Král
Vedoucí ústavu

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

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem práci:

„Vliv opracování a máčení na frekvenčně-rezonanční vlastnosti dřevěných nosníků reálných rozměrů“

vypracoval samostatně a veškeré použité prameny a informace uvádím v seznamu použité literatury. Souhlasím, aby moje práce byla zveřejněna v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a v souladu s platnou Směrnicí o zveřejňování vysokoškolských závěrečných prací.

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

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

V Brně dne .....

Podpis .....

Poděkování

Děkuji pánům Seberovi a Tippnerovi.

Za trpělivost.

Jsou to hodní lidé.

Abstrakt

Autor: Martin Janda

Název práce: Vliv opracování a máčení na frekvenčně-rezonanční vlastnosti dřevěných nosníků reálných rozměrů

Tato práce se zabývá vlivem opracování na mechanické vlastnosti trámů reálných rozměrů. Zkoumány byly tesané a řezané trámy, přičemž tesané vzorky se testovaly ještě ve variantách tesané a poté máčené a máčené a pak tesané. Vlastnosti trámů byly zjišťovány měřením vlastních frekvencí. V úvodní části se proto text zaměřuje na popis kmitavého pohybu a chování vibrujících pevných těles. Dále jsou nahlédnuty akustické vlastnosti dřeva a možnosti využití těchto charakteristik při zjišťování jeho mechanických vlastností. Závěrečná kapitola literárního přehledu je věnována nedestruktivnímu testování dřeva, které hojně využívá akustické metody. Jsou zde rozebrány nejpoužívanější metody nedestruktivního testování a nastíněny poznatky z výzkumu v tomto oboru.

Klíčová slova: vibrace, rezonanční frekvence, nedestruktivní testování dřeva, dynamický modul pružnosti, dřevo

Abstract

Author: Martin Janda

Title: Influence of processing on the acoustic properties of the wooden beams

This paper examines the influence of processing on the acoustic properties of the wooden beams. Hewn beams and sawn beams were examined. Hewn beams were divided into three groups at two moisture content levels. Timber properties were determined by measuring the resonant frequencies. First part of the text is focused on the oscillatory motion and behavior of vibrating solids. Furthermore, there is a description of acoustic properties of wood and the possibility of using these properties when determining the mechanical properties. The next chapter is devoted to non-destructive testing of wood, which often uses acoustic methods.

Key words: vibration, resonant frequency, nondestructive testing of wood, dynamic modulus of elasticity, wood

Obsah

1. Úvod....9
2. Cíl práce....11
3. Literární přehled....12
3.1 Charakteristika vibračně-rezonančních parametrů....12
3.1.1 Kmitání....13
3.1.2 Vlnění....18
3.2 Akustické vlastnosti dřeva....22
3.3 Nedestruktivní testování a hodnocení dřeva....24
3.3.1 Hlavní vibračně-akustické metody NDT....26
3.3.1.1 Statická ohybová zkouška....26
3.3.1.2 Metoda příčných vibrací....27
3.3.1.3 Metoda tlakových vln....32
3.3.1.4 Ultrazvukové metody....37
3.3.1.5 Vizualizační technologie....40
4. Materiál a metodika....43
4.1 Použitý materiál....43
4.2 Měření dat....43
4.2.1 Princip FFT analýzy....47
4.3 Analýza dat....47
4.3.1 Statistická analýza....48
5. Výsledky....50
6. Diskuze....61
7. Závěr....63
8. Summary....64
9. Přehled použité literatury....65
10. Seznam elektronických zdrojů....68
Seznam obrázků....69
Seznam tabulek....72

1. Úvod

Má vliv na kvalitu dřeva i způsob jeho opracování? To je základní otázka stojící na počátku této práce. S lehkou nadsázkou by se vlastně dalo říci, že tématem této práce je zjistit, jestli „šaty dělají člověka“ (samozřejmě v příslušné analogii pro dřevo). Třeba u šindelů se zdá být způsob opracování zásadní. Například už Ottův slovník naučný (1906) ve svém čtyřiadvacátém dílu u hesla šindel zmiňuje dva druhy šindelů – štípaný čili ruční a řezaný čili strojový. Kromě technologie výroby a typických rozměrů se zde uvádí i poznámka, že štípaný šindel je lepší než řezaný. Je to odůvodněno hladším povrchem štípaného šindele a také tím, že na rozdíl od řezání nedochází při štípání k narušení pórů dřeva. Může ale toto mít vliv i na stavební řezivo (je-li tesaný trám stále nazýván řezivem)? Může tesaný povrch ovlivnit frekvenčně-rezonanční vlastnosti trámu?

Dostáváme se k otázce, jak toto ověřit. Pro zkoumání mechanických vlastností se často využívají pouze malé vzorky dřeva a metody, při nichž se vzorek vystavuje takovým podmínkám, že dochází k jeho destrukci. U vzorků reálných rozměrů by toto bylo značně neefektivní a neekonomické. Existují ale i metody, které testováním nenaruší strukturu vzorku – tzv. nedestruktivní metody testování dřeva. Řada těchto metod využívá vibračně-akustických vlastností dřeva. Chování zvuku ve dřevě je velmi dobře popsáno a jak prokázalo mnoho výzkumů, může být adekvátním ukazatelem kvality dřeva. Nedestruktivní metody využívající měření akustických parametrů navíc mohou být využity i mimo laboratorní podmínky a výborně se hodí i pro vzorky reálných rozměrů. Pravě toto by mohla být cesta, jak ověřit vliv opracování na mechanické chování dřeva.

Výše popsanému tudíž odpovídá i struktura textu. V úvodní části je rozebrána fyzikální podstata kmitání částic, dále následuje stručný popis chování zvuku ve dřevě. Stěžejní část literárního přehledu se věnuje nedestruktivním metodám testování dřeva – jsou zde uvedena teoretická východiska jednotlivých metod, na něž navazují ukázky výzkumů používající tyto metody. Praktická část práce se zabývá měřením rezonančních frekvencí trámů a zpracováním a vyhodnocením naměřených dat tak, aby bylo možné prokázat,

zda má způsob opracování dřeva nějaký vliv na jeho vibračně-akustické parametry.

2. Cíl práce

Cílem práce je zjistit, zda má způsob opracování dřeva vliv na jeho frekvenčně-rezonanční vlastnosti. Změřením vlastních frekvencí různě opracovaných nosníků za různých vlhkostních podmínek je získána podélná frekvence, příčná vlastní frekvence prvního modu a příčná vlastní frekvence třetího modu. Na základě získaných dat jsou pak vypočítány dynamické moduly pružnosti, které se jeví jako vhodné ukazatele pro zjištění kvality dřeva. Tomuto předchází studium související literatury.

3. Literární přehled

3.1 Charakteristika vibračně-rezonančních parametrů

Pro bližší pochopení akustických parametrů je třeba začít studiem pohybu. V rámci vědního oboru mechanika se studiem pohybu zabývá kinematika a dynamika. Kinematika zkoumá pohyb z pohledu způsobu pohybu – zaznamenává polohu a rychlost tělesa nebo hmotného bodu. Pro účely studia vibrací a vlnění je ale třeba brát v úvahu i časové závislosti. Tomu věnuje pozornost právě dynamika. Dynamika je obor mechaniky zabývající se vztahem mezi pohybem částic či pevných těles a silami na ně působícími. Dynamika zkoumá působící síly a zohledňuje vliv časového faktoru (Bodig, Jayne 1993). Podle Feynmana, Leightona, Sandse (2013) je základem dynamiky druhý Newtonův zákon, který dává do souvislosti změny pohybu s působícími silami dle vztahu

$$F = \frac{d}{dt} mv \quad , \tag{3.1}$$

kde F je působící síla [N], t je čas [s], m hmotnost tělesa [kg] a v rychlost pohybu tělesa [m/s]. Vztah (3.1) vyjadřuje změnu hybnosti (mv) v čase. Při pohybu tělesa v trojrozměrném prostoru je třeba zohlednit složky pohybu ve směrech osy x, y a z, přičemž směr síly F a zrychlení a je totožný. Výchozí úvaha popisu pohybu má tedy podle Feynmana, Leightona a Sandse (2013) tvar

$$F_x = m\left(\frac{dv_x}{dt}\right) = m\left(\frac{d^2x}{dt^2}\right) = ma_x$$

$$F_y = m\left(\frac{dv_y}{dt}\right) = m\left(\frac{d^2y}{dt^2}\right) = ma_y \quad , \tag{3.2}$$

$$F_z = m\left(\frac{dv_z}{dt}\right) = m\left(\frac{d^2z}{dt^2}\right) = ma_z$$

kde $a_{x,y,z}$ je zrychlení [m/s^2].

3.1.1 Kmitání

Kmitáním se nazývá speciální případ pohybu označovaný termínem oscilační nebo též translační pohyb. Oscilační je takový pohyb, při kterém se hmotný bod nebo soustava hmotných bodů pohybuje kolem své rovnovážné polohy (Bodig, Jayne 1993, Syrový 2003). Oscilační pohyb lze charakterizovat podle toho, zda se prvky pohybu opakují, či nikoli – může tedy být periodický nebo náhodný, přičemž i náhodný oscilační pohyb je možno analyzovat jako lineární kombinaci pohybů periodických (Bodig, Jayne 1993).

Bodig a Jayne (1993) uvádějí, že pro popis všech periodických kmitavých pohybů je třeba znát několik základních veličin. Konkrétně jde o amplitudu A [m], periodu T [s] a frekvenci f [Hz]. Amplituda představuje maximální odchylku od rovnovážné polohy a perioda dobu trvání jednoho cyklu. Frekvence, definovaná jako počet kmitů za jednotku času, je inverzní k periodě (Syrový 2003). Například Požgaj (1997) a Nový (2009) pak uvádějí vztah

$$f = \frac{1}{T} \quad . \tag{3.3}$$

Nejjednodušší případ periodického kmitání může být popsán základními goniometrickými funkcemi. Sinusová křivka (obr. 3.1) je vyjádřením časového zápisu rovnoměrného pohybu (s konstantní rychlostí) hmotného bodu po kružnici, nebo také hmotného bodu zavěšeného na pružině kmitajícího kolem rovnovážné polohy (Syrový 2003).

Popis takového pohybu pak uvádějí například Feynman, Leighton a Sands (2013), Pirner a Fischer (2010) nebo Syrový (2003). Je vyjádřen lineární diferenciální rovnicí s konstantními koeficienty, která má tvar

$$m\frac{d^2y}{dt^2} + k\,y = 0 \quad , \tag{3.4}$$

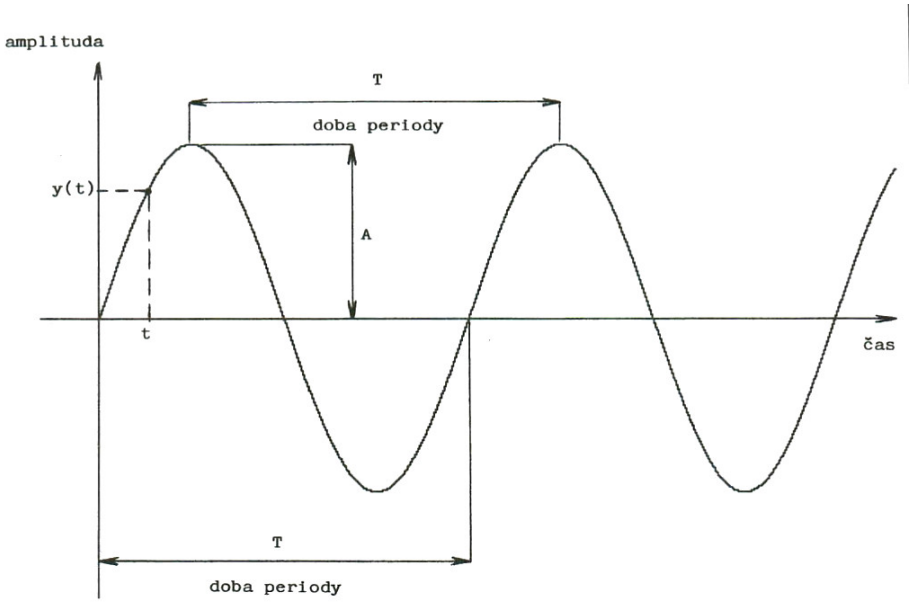
kde m je hmotnost tělesa [kg], t je čas [s], y je výchylka [m] a k tuhost soustavy [N/m]. Za předpokladu, že $\omega^2 = k/m$ můžeme rovnici zapsat ve tvaru

$$\frac{d^2y}{dt^2} + \omega^2 y = 0 \quad , \tag{3.5}$$

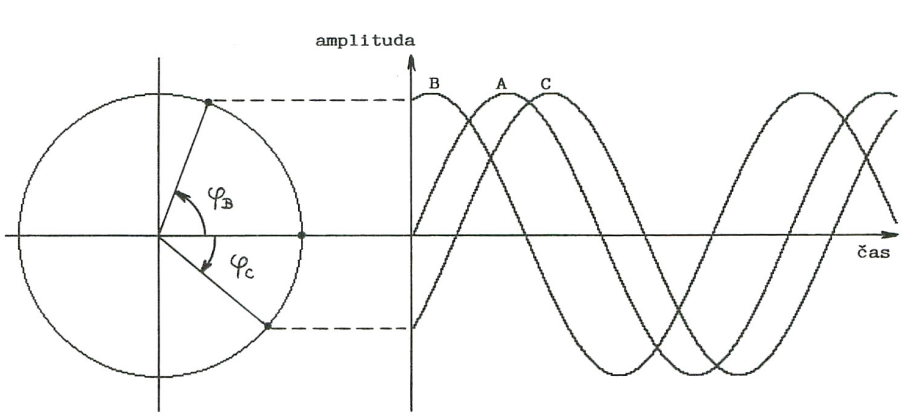
kde ω je úhlová frekvence [rad/s]. Řešení pohybové rovnice lze pak podle Nového (2009) napsat ve tvaru

$$y = A\sin(\omega t + \varphi_0) \quad , \tag{3.6}$$

kde A je amplituda výchylky [m] a φ_0 je fázový posun od počáteční nulové fáze. Fázový posun vyjadřuje zpoždění či předběhnutí dvou různých po sobě jdoucích kmitů – ukazuje, v jaké fázi je konkrétní kmit v určitém čase (obr. 3.2).

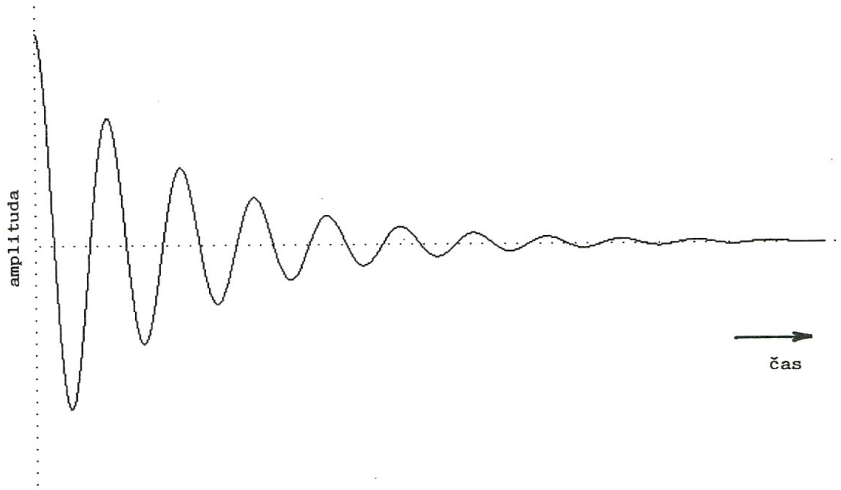


Obr. 3.1: Časový zápis periodického kmitavého pohybu (Syrový 2003)



Obr. 3.2: Fázový posun kmitavého pohybu (Syrový 2003)

Výše popsaný pohyb nicméně probíhá pouze v teoretické rovině, protože neuvažuje působení vnitřního tření. Pro přiblížení teoretického modelu blíže k realitě je třeba do úvahy zahrnout i působení vnitřních sil, případně působení síly, která kmitající systém udržuje v pohybu. Například Bodig a Jayne (1993) pak takový náhled uvádějí. Systém, který je uveden do pohybu a pak ponechán sám sobě, se nazývá volné kmitání nebo také tlumené kmitání. Jedná se tedy o kmitání, při kterém počáteční impulz způsobí oscilaci bodů, které vlivem tření ztrácejí svou energii, až se nakonec zastaví v počáteční nulové poloze obr. 3.3).



Obr. 3.3: Schéma tlumeného kmitání (Syrový 2003)

Síla, která způsobuje útlum kmitání, je přímo úměrná rychlosti kmitavého pohybu a odporu soustavy proti tomuto pohybu – pohybová rovnice (3.5) pak podle Syrového (2003) nabývá tvaru

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + 2\delta \frac{dy}{dt} + \omega^2 y = 0 \quad , \tag{3.7}$$

kde $\delta = \frac{B}{2m}$, δ je konstanta tlumení, B je odpor proti pohybu a m hmotnost soustavy [kg]. Řešení rovnice (3.7) pak vede k výrazu

$$y(t) = A\, e^{-\delta} \sin(\omega_d t + \varphi) \quad , \tag{3.8}$$

kde $\omega_d = \sqrt{\omega^2 - \delta^2}$.

Tlumení kmitů způsobuje zmenšování výchylky a tento úbytek může být vyjádřen další veličinou. Logaritmický poměr dvou po sobě jdoucích amplitud se nazývá logaritmický dekrement útlumu. Jeho matematický zápis uvádí například Požgaj (1997) a má tvar

$$\delta = \ln \frac{A_1}{A_2} \quad , \tag{3.9}$$

kde δ je logaritmický dekrement útlumu a *A1* a *A2* jsou dvě po sobě jdoucí amplitudy [m].

Naproti volnému kmitání je tu pak kmitání nucené. Při nuceném kmitání do systému zasahuje vnější síla, ve většině případů periodická – například působením rotačního pohybu stroje (Bodig, Jayne 1993). Tato síla pak působí takovým způsobem, že kompenzuje ztráty třením – amplitudy kmitajícího systému se pak v čase nezmenšují.

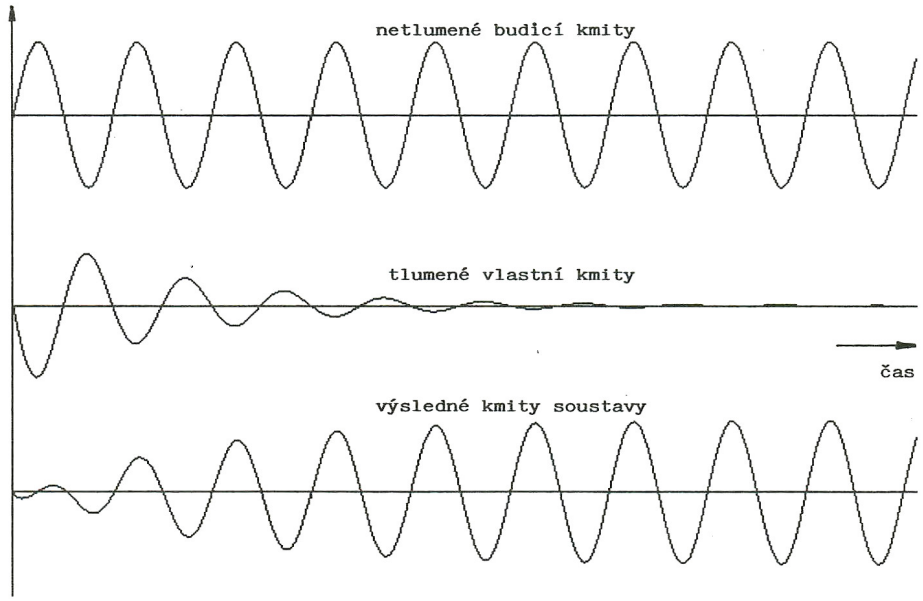
Pokud má působící síla sinusový průběh, Syrový (2003) uvádí transformaci pohybové rovnice do tvaru

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + 2\delta \frac{dy}{dt} + \omega^2 y = \frac{F_0}{m} \sin \Omega t \quad , \tag{3.10}$$

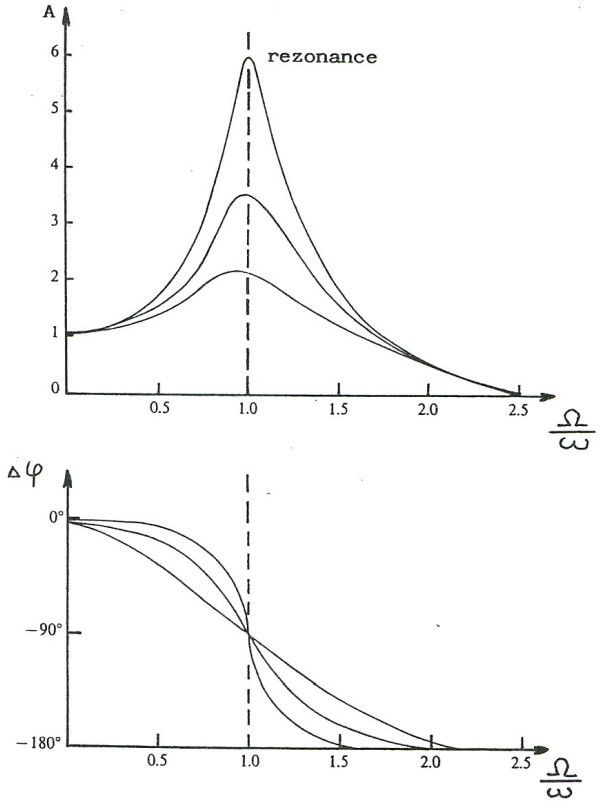
kde F_0 je amplituda vnější síly [N] a Ω je frekvence vnější budící síly [Hz].

Výsledné kmity mají v ustáleném stavu sinusový průběh, nicméně záleží na velikosti obou frekvencí – je-li vlastní frekvence shodná s frekvencí budící síly (obr. 3.4), výsledná amplituda je součtem vlastních kmitů a kmitů budící síly a exponenciálně roste, dokud se neustálí (Syrový 2003). V případě rozdílných frekvencí mohou vznikat rázy a amplituda v zakmitávací fázi může nabývat i větších hodnot než v ustáleném stavu.

Pokud má budící síla souhlasnou frekvenci s frekvencí vlastní soustavy, dochází k rezonanci – je dosaženo maximální výchylky nebo rychlosti kmitání při rezonanční frekvenci. Podle Syrového (2003) nastává rezonance v ideálním prostředí při fázovém posunu 90°, přičemž nucené kmity jsou vždy zpožděny za kmity vnější síly (obr. 3.5).



Obr. 3.4: Schéma nuceného kmitání (Syrový 2003). Vlastní frekvence a frekvence budící síly je shodná.



Obr. 3.5: V ideálním prostřední nabývá amplituda maxima při fázovém posunu 90° (Syrový 2003)

Rezonanční frekvence závisí na vlastní frekvenci mechanické soustavy a na konstantě tlumení dle vztahu (Syrový 2003)

$$\Omega_{rez} = \sqrt{\omega^2 - 2\delta^2} \quad . \tag{3.11}$$

3.1.2 Vlnění

V trojrozměrném prostoru nastává při kmitání bodů jejich vzájemná interakce a dochází tak k šíření elastických vln. Feynman, Leighton a Sands (2013) popisují vlnění jako kmitání, které se v závislosti na čase šíří prostorem. Charakteristická veličina popisující vlastnosti vln je vlnová délka. Je definovaná jako nejmenší vzdálenost mezi body sinusové křivky se stejnou fází nebo také jako vzdálenost, kterou vlna urazí za dobu jednoho kmitu (Nový 2009). Vlnová délka λ [m] je tedy závislá na rychlosti šíření a periodě.

$$\lambda = cT \quad , \tag{3.12}$$

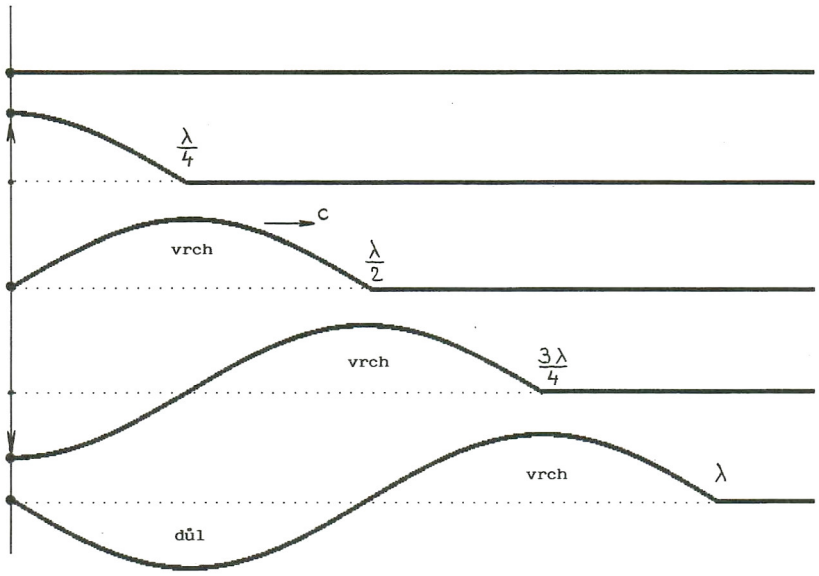
kde c je rychlost šíření [m] a T je perioda [s]. Vlnovou délku lze vyjádřit rovněž ve vztahu k frekvenci. Pak platí vztah

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad . \tag{3.13}$$

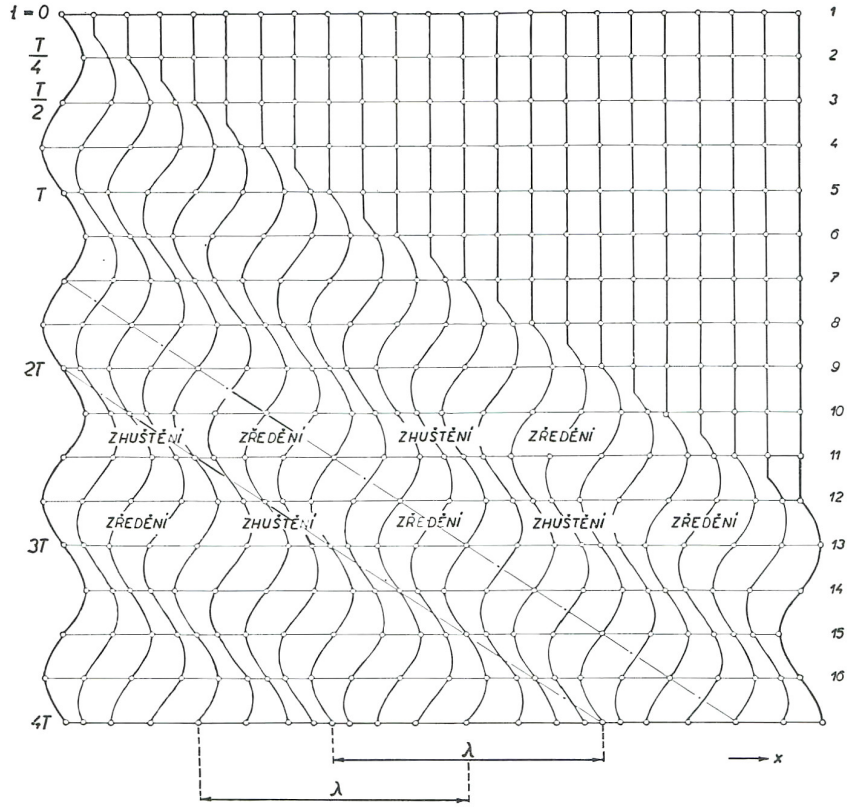
Jak uvádějí Bodig a Jayne (1993), základní směr šíření vln vůči kmitání bodů může být příčný nebo podélný. Při příčném vlnění se vlna šíří kolmo na směr kmitání – kmitající bod postupně rozkmitává i vedlejší body a vlna se přenáší dál – postupně se mění výchylka y, ale poloha bodů x zůstává neměnná (obr. 3.6). Pro maxima vlny se používá termín vrch, o minimech se hovoří jako o dolech (Feynman, Leighton a Sands 2013, Syrový 2003).

Naopak při podélném vlnění (obr. 3.7) kmitají body ve směru shodném se směrem šíření vlny – měnící se výchylka y se pak přičítá a odečítá od souřadnice x (Syrový 2003). Syrový (2003) dále uvádí, že v tomto směru pak nevznikají vrchy a doly, jako při šíření vlny v příčném směru, ale místa zhuštění, kde jsou body blíže u sebe, a místa zředění, kde jsou body naopak dále od sebe.

Šíření vln v podélném i příčném směru se uplatňuje pouze v pevných látkách, v kapalinách a plynech se vlny šíří podélně (Syrový 2003, Feynman, Leighton a Sands 2013).



Obr. 3.6: Schéma šíření příčné vlny (Syrový 2003)



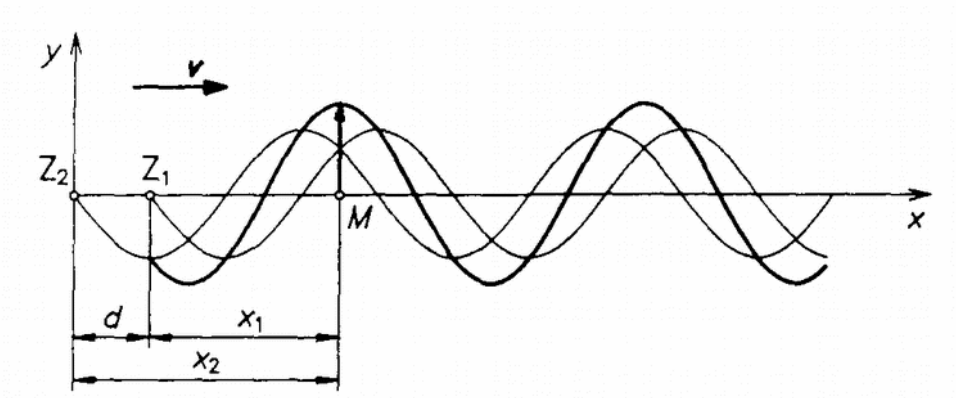
Obr. 3.7: Schéma šíření podélné vlny (Syrový 2003)

Podobně jako kmitání popisuje i šíření vln pohybová diferenciální rovnice, do výpočtu ale navíc vstupuje rychlost šíření vlny (Syrový 2003). Vztah pak má podobu

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2}=\frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad , \tag{3.14}$$

kde c je rychlost šíření vlny [m/s].

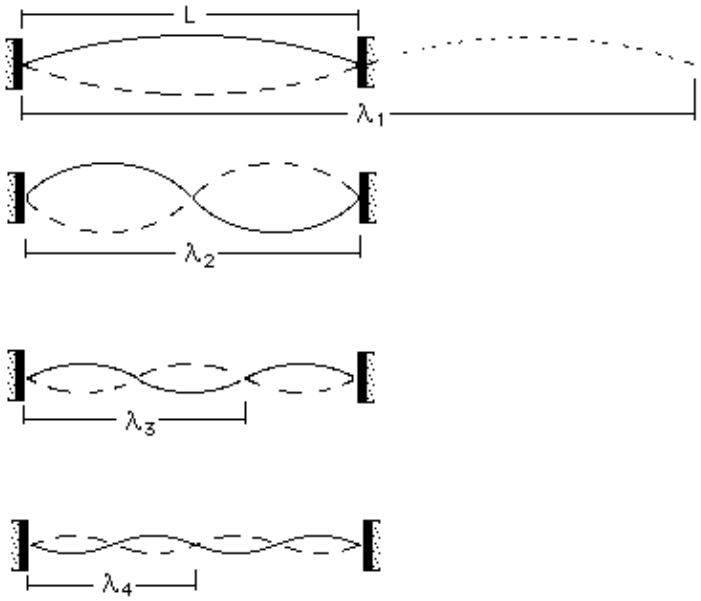
Při šíření více vln současně se vlny skládají – interferují – a vzniká tak jedno výsledné vlnění (Feynman, Leighton a Sands 2013). Nový (2009) uvádí, že pokud se bodovou řadou šíří dvě a více vlnění, výsledné vlny se budou skládat na principu superpozice. Při vlnění v opačných směrech se výsledná vlna skládá vektorově, při navzájem polarizovaném vlnění se stejnou polarizační rovinou má pak výsledná vlna tvar algebraického součtu okamžitých výchylek.



Obr. 3.8: Schéma skládání dvou vln se stejnou amplitudou i frekvencí ale rozdílnou fází (fyzika007.cz)

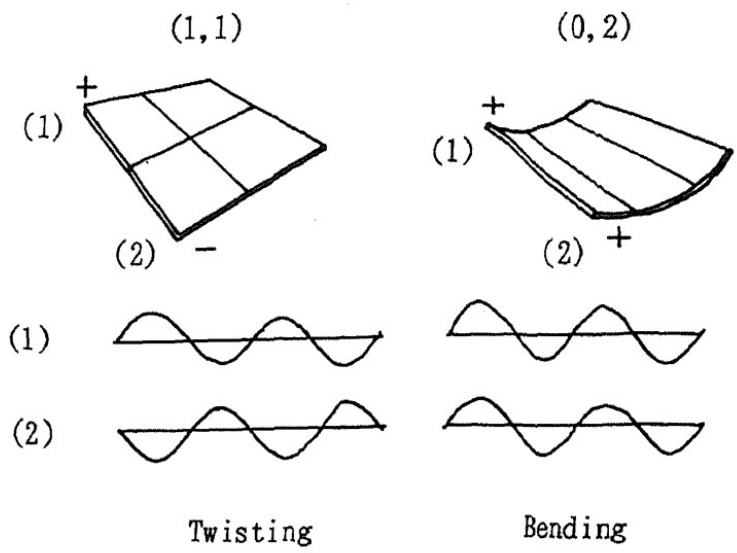
Pohyb vln v pevných tělesech, které jsou charakterizovány určitými danými rozměry, má svá specifika. Feynman, Leighton a Sands (2013) uvádějí, že při pohybu vlny v ohraničené oblasti (např. struna upevněná na obou koncích nebo dřevěný vzorek tyčového charakteru) dochází na pevném konci k odrazu vlny a hrb vlny přicházející ke konci se složí s odraženou zrcadlovou vlnou. Výsledný průběh vlny má při určitých frekvencích sinusoidální tvar. Frekvencím, při kterých k tomuto jevu dochází, říkáme vlastní frekvence nebo také rezonanční frekvence. Obrazová vyjádření těchto frekvencí nazýváme mody (obr. 3.9), přičemž každé těleso může mít více rezonančních frekvencí, tzn. i více modů (Feynman, Leighton, Sands 2013). Mod tedy představuje pohybový obrazec, který se sinusoidálně opakuje.

Vyšší mody mají vždy vyšší frekvenci, nicméně Bodyg a Jayne (1993) tvrdí, že nelze blíže určit, v jakém přesném vztahu jsou k modu základnímu. Bodům, které mají při vlastní frekvenci nulovou souřadnici y, se říká uzlové body (Feynman, Leighton, Sands 2013).



Obr. 3.9: Schéma prvních čtyř modů vlastních frekvencí (utf.mff.cuni.cz)

U kmitání desek lze také pozorovat různé mody vibrací. Podle průběhu vlny deskou lze rozlišit dva základní mody ohybové a dva kroutící mody (Sobue, Kitazumi 1991).



Obr. 3.10: Mody kmitání desek (Sobue, Kitazumi 1991)

3.2 Akustické vlastnosti dřeva

Dřevo je biologický materiál s velmi komplexní anatomickou stavbou. Uspořádání anatomických elementů má za následek rozdílné chování v různých směrech. Po určitém zjednodušení můžeme dřevo považovat za ortotropní materiál, tzn. že v něm lze nalézt tři na sebe kolmé roviny, ve kterých se fyzikální vlastnosti odlišují. V případě mechanických vlastností to platí rovněž.

Vibrace a zvuk se ve dřevě šíří velmi dobře. Důkazem toho je použití dřeva při výrobě hudebních nástrojů (rezonanční dřevo) nebo použití akustických parametrů při zjišťování mechanických konstant dřeva.

Obecně lze u dřeva pozorovat tři druhy vibrací – podélné, příčné a torzní (Bodig, Jayne 1993). Požgaj a kol. (1997) uvádějí, že na základě podélných vibrací lze určit např. elastické konstanty dřeva, rychlost šíření zvuku a logaritmický dekrement útlumu. Na základě torzních vibrací lze zjistit modul pružnosti dřeva.

Důležitým sledovaným parametrem je rychlost šíření zvukových vln. Rychlost šíření zvuku ve dřevě je značně ovlivněna materiálovými vlastnostmi (hustota, modul pružnosti), ale i vlhkostí a teplotou (Gandelová, Šlezingerová, Horáček 2002). Pro výpočet rychlosti zvukových vln ve dřevě c [m/s] uvádějí Požgaj a kol. (1997) vztah

$$c=\sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad , \tag{3.15}$$

kde E je Youngův modul pružnosti [Mpa] a ρ je hustota dřeva [kg/m^3]. Ze vztahu je patrné, že čím větší modul pružnosti a menší hustota dřeva, tím rychleji se zvuk šíří. Moduly pružnosti se ale u dřeva výrazně liší v podélném a příčném směru. Díky tomu, že modul pružnosti napříč vláken je mnohem menší než ve směru podél vláken (přibližně v poměru 1:20), je i rychlost šíření zvuku napříč vláken menší – nabývá hodnot 1/5 až 1/3 rychlosti zvuku podél vláken (Kretschmann 2010). Požgaj a kol. (1997) dodávají konkrétnější specifikaci, kdy je poměr rychlostí $c_{\parallel} : c_{\perp r} : c_{\perp t}$ přibližně $15 : 5 : 3$, přičemž se uvedený poměr mění v závislosti na dřevině s tím, jak se mění poměry modulů pružnosti podél vláken a napříč vláknům.

Rychlost zvuku ve dřevě se mění s hustotou – čím vyšší hustota dřeva, tím větší rychlost – nicméně s rostoucí hustotou roste rychlost šíření zvukových vln jen nevýznamně (Požgaj 1997).

Daleko více ovlivňuje rychlost zvuku ve dřevě přítomnost vlhkosti – voda v buněčných stěnách a v lumenech zvýší odpor proti šíření zvuku, tudíž s rostoucí vlhkostí klesá rychlost zvuku (Ross a kol. 1999, Gandelová, Šlezingerová, Horáček 2002).

Dalším parametrem jsou rezonanční frekvence dřeva. Rezonanci dřeva lze chápat jako schopnost zesilovat zvuk bez zkreslení (Požgaj a kol. 1997). Rezonance nastává při určitých frekvencích, které nazýváme rezonanční frekvence. Na základě jejich znalostí lze, jak uvádí Bucur (2005), zjistit dynamické moduly pružnosti. Vztah pro výpočet modulu pružnosti E pro tělesa tyčového charakteru má tvar

$$E = 4\rho L^2 \left(f_{L,n}/n\right) \quad , \tag{3.16}$$

kde ρ je hustota [kg/m^3], L je délka vzorku [m], $f_{L,n}$ je frekvence podélných vibrací při n=1 [Hz]. Při vyšších modech (n= 2, 3, atd.) je vztah třeba doplnit o opravný koeficient. Pro příčné vibrace pak vztah má tvar

$$E = [4\pi^2 \rho L^4 \left(f_{F,n}\right)^2 A]/I\, k_i^4 \quad , \tag{3.17}$$

kde A je plocha průřezu [m^2], I je moment setrvačnosti [m^4], k_i je opravný koeficient (pro první mod k_i= 4,730, pro druhý mod k_i= 7,853 a pro třetí mod k_i= 10.996). Pro smykový modul pružnosti je to pak vztah

$$G = 4\rho L^2 \left(f_n^T/2\right)^2 \quad , \tag{3.18}$$

kde f_n^T je rezonanční frekvence kroutících vibrací příslušného modu [Hz].

Bucur (2010) uvádí, že obdobná teorie platí i pro desky, kde je pak možno na základě různých vibrací získat čtyři materiálové konstanty.

Podle Bucur (2010) lze u dřeva tyčového charakteru získat z rezonančních frekvencí jeden modul pružnosti a jeden smykový modul pružnosti a dvě odpovídající tlumící konstanty. U dřeva deskového charakteru jsou to pak čtyři elastické konstanty a čtyři odpovídající tlumící konstanty.

3.3 Nedestruktivní testování a hodnocení dřeva

Frekvenčně-rezonančních vlastností dřeva lze dobře využít při zjišťování jeho mechanických parametrů. Parametry jsou zjišťovány nepřímo, tzn. že skrze měřený akustický parametr se dopočítá určitá elastická charakteristika. Princip je tedy podobný jako při zjišťování vlhkosti dřeva měřením elektrického odporu. Obor, který se takovému zkoumání dřeva věnuje, se nazývá nedestruktivní testování.

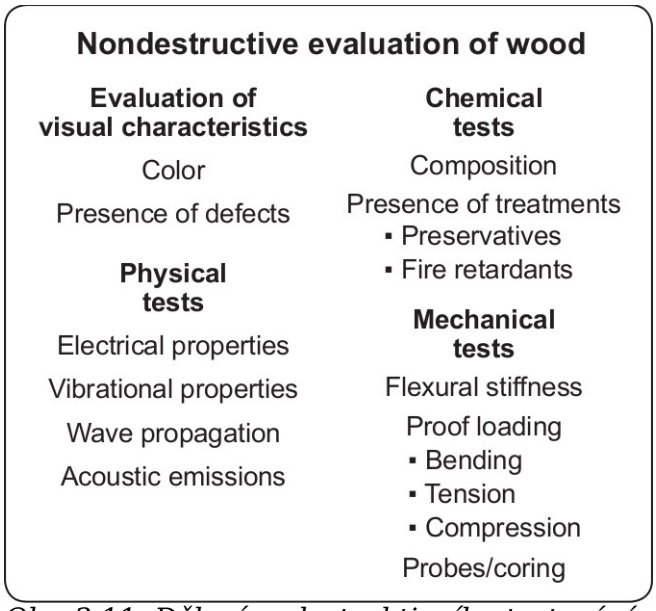
Nedestruktivní testování materiálů (nondestructive testing - NDT[1]) je věda zabývající se zjišťováním fyzikálních nebo mechanických vlastností daného materiálu, a to způsobem, který nenaruší možnosti jeho následného použití (Ross a Pellerin 1994). V dřevařském průmyslu tyto metody vznikly primárně za účelem třídění stavebního řeziva. Na počátku 60. let byla v Severní Americe vyvinuta metoda Machine Stress Rating (MSR) která zjišťovala tuhost dřeva v ohybu měřením modulu pružnosti v ohybu jednoduchou ohybovou zkouškou (Bendtsen a Youngs 1981). Ross (2015a) dokonce uvádí, že jedno z prvních použití nedestruktivního testování dřeva na základě jiných než vizuálních metod praktikovala na konci 18. století firma Hudson Bay Company při výrobě lodí. Kmen byl položen na podstavce, jeden dělník přiložil na čelo kmene kapesní hodinky a druhý dělník poslouchal na druhém konci kmene tikání hodinek. Kmen byl zařazen do výroby pouze v případě, že byl zvuk hodinek slyšet hlasitě a čistě.

Mezi nedestruktivní metody testování dřeva patří kromě sledování akustických parametrů i další metody. Podle Rosse (2015a) lze do této oblasti řadit:

- metody na bázi vizuálního hodnocení,
- chemické metody,
- fyzikální metody,
- mechanické metody.

1 V anglicky psané literatuře se pro nedestruktivní testování používají také termíny nondestructive evaluation (NDE), nondestructive inspection (NDI), nondestructive characterization (NDC) nebo nondestructive sensing (NDS). Lze mezi nimi vnímat jistou odlišnost (například NDT označuje aktuální zkoušku, zatímco NDE dává NDT do širších souvislostí a NDS vypovídá hlavně o použitých zařízeních pro získání dat nedestruktivní cestou), nicméně je můžeme považovat za synonyma (Sarasini, Santulli 2014).

Nedestruktivní metody se zpočátku uplatňovaly hlavně při testování masivního dřeva, nicméně se rozšířily i pro testování materiálů na bázi dřeva (Ross 2015a). Například některé společnosti na výrobu dýhovaných dílců testují pevnost dýh sledováním rychlosti šíření tlakových vln (Ross a Pellerin 1994). Dýhy se třídí podle pevnosti do různých pevnostních tříd. Pevnost dýhy je zjišťována na základě empirického vztahu mezi rychlostí šíření tlakové vlny a pevností.



Obr. 3.11: Dělení nedestruktivního testování podle Rosse (2015a)

Nedestruktivní testování nachází široké využití také na poli zkoušek hodnocení materiálů přímo v terénu (tzn. mimolaboratorní podmínky) – od testování živých stromů až po hodnocení prvků stavební konstrukce.

Podle Rosse (2015a) zapříčinila původně rozvoj nedestruktivních metod potřeba poskytnout metodologii pro přesnější rozhodování. Bylo nutno zajistit účelnější využívání dřeva jakožto výrobního materiálu. Nyní se do popředí dostávají dvě nové hnací síly výzkumu nedestruktivních metod. První z nich je celosvětová tendence klást větší důraz na zdraví lesních ekosystémů – měnící se růstové podmínky budou vyžadovat optimalizaci ekonomické správy lesů, aby zůstalo zdraví lesních ekosystémů zachováno. Druhý důvod představuje stále globalizovanější povaha trhu – nedestruktivní metody testování dřeva mohou pomoci při optimalizaci využití dřevní biomasy.

3.3.1 Hlavní vibračně-akustické metody NDT[2]

U nedřevěných materiálů – kovy, keramiky, polymery – se nedestruktivní testování používá pouze ke zjišťování nehomogenit, pórů a prasklin, protože veškeré materiálové konstanty jsou již známy - jsou kontrolovány a řízeny výrobním procesem (Ross a Pellerin 1994). Naproti tomu, jak Ross a Pellerin (1994) zdůrazňují, u dřeva se nehomogenity a nepravidelnosti ve větší či menší míře vyskytují přirozeně. Nedestruktivní metody testování pro dřevo tedy primárně zkoumají, jak moc dané nepravidelnosti ve vnitřní stavbě dřeva ovlivňují jeho mechanické vlastnosti.

Základním předpokladem pro nedestruktivní testování dřeva je skutečnost, že statické a dynamické chování dřeva vychází ze stejných mechanismů (Ross a Pellerin 1994). Tím pádem lze nalézt mezi dynamickými vlastnostmi a statickými konstantami matematický vztah.

3.3.1.1 Statická ohybová zkouška[3]

Mezi základní metody nedestruktivního testování dřeva může být řazena statická ohybová zkouška, pokud při ní nedojde k porušení testovaného tělesa, tzn. že dřevo na dané zatížení odpovídá pouze elastickou deformací. Tento jednoduchý test dává do souvislosti zatížení s průhybem oboustranně prostě podepřeného vzorku (obr. 3.12) (Ross a kol. 1991, Ross 2015b). Tento princip je základem pro výše uvedenou metodu MSR. Výpočet statického ohybového modulu pružnosti v tříbodém ohybu je dán vztahem

$$MOE = \frac{PL^3}{48\,I\,\delta} \quad , \tag{3.19}$$

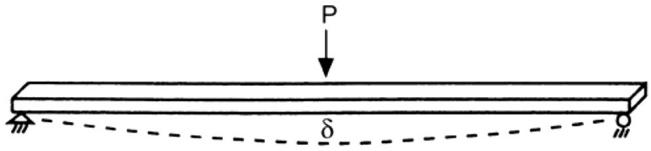
kde MOE je statický ohybový modul pružnosti [N/m^2], P je zatížení [kg], L je rozpětí mezi podporami [m], I je moment setrvačnosti [m^4] a δ je průhyb [m].

2 Značení veličin v této kapitole je převzato ze zahraničních publikací, proto se může lišit od zvyklostí značení zažitých v ČR.

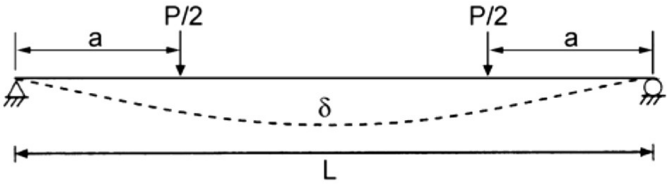
3 Statická ohybová zkouška nepatří mezi akustické metody, nicméně data získaná touto zkouškou často slouží jako referenční hodnoty, s nimiž se data z vibračně-rezonančních zkoušek porovnávají, proto je zde také uvedena.

Je možné rovněž použít i alternativní nastavení pozice zatížení dle obr. 3.13, kdy se místo jedné centrální síly použije dvou sil poloviční velikosti umístěných v určité vzdálenosti od krajů tělesa. Výpočet statického ohybového modulu pružnosti je v tomto případě dán vztahem

$$MOE = \frac{Pa\left(3L^2 - 4a^2\right)}{48 I \delta} \quad . \tag{3.20}$$



Obr. 3.12: Schéma konfigurace ohybové zkoušky (Ross 2015b)



Obr. 3.13: Alternativní konfigurace ohybové zkoušky (Ross 2015b)

3.3.1.2 Metoda příčných vibrací

Další nedestruktivní metodou je metoda příčných vibrací. Tato metoda vychází ze souvislosti mezi vibracemi hmoty a vnitřními silami způsobujícími tlumení těchto vibrací (Ross 2015b). Základem výpočetních vztahů je pohybová rovnice popisující vibrace prostě podepřeného nosníku

$$M\left(\frac{d^2X}{dt^2}\right) + D\left(\frac{dy}{dt}\right) + Kx = P_0 \sin \omega t \quad , \tag{3.21}$$

kde M je hmotnost tělesa [m], K je tuhost tělesa [N/m] a D tlumící síla [N.s/m]. Vyjádření budící síly $P_0 sin\omega t$ je pro volné kmitání rovno nule. Řešení rovnice pro K vede podle Rosse a Pellerina (1994) k vyjádření dynamického modulu pružnosti MOE_d. Zde závisí na konfiguraci samotné zkoušky, resp. na umístění podpor. Při podepření nosníku na dvou uzlových bodech má rovnice tvar

$$MOE_d = \frac{f_r^{\,2} WL^3}{12.65\, Ig} \tag{3.22}$$

a při podepření nosníku na jeho koncích

$$MOE_d = \frac{f_r^{\,2} WL^3}{2.46\, Ig} \quad , \tag{3.23}$$

kde MOE_d je dynamický modul pružnosti [Pa], f_r je rezonanční frekvence [Hz], W je váha nosníku [kg], L rozpětí nosníku [m], I je moment setrvačnosti [m^4] a g je gravitační zrychlení [$m.s^{-2}$].

Divos (2004) pak pro výpočet dynamického modulu pružnosti z příčných vibrací uvádí obecnější vztah, který lze použít i pro další vibrační mody

$$MOE_d = \left(\frac{2 f_n}{\gamma_n \pi} \right)^2 \frac{WL^3}{I} \quad , \tag{3.24}$$

kde f_n je frekvence vibrací příslušného modu [Hz], $\gamma_n = (n+0{,}5)^2$ a n je číslo vibračního modu.

Ross (2015b) dále uvádí, že řešení rovnice (3.21) pro D vede k vyjádření tlumící síly nebo vnitřního tření. V případě volných vibrací pak řešení vyjadřuje vztah

$$\delta = \frac{1}{n-1} \ln \frac{A_1}{A_n} \quad , \tag{3.25}$$

kde δ je logaritmický dekrement útlumu a A_1 a A_n jsou amplitudy dvou po sobě jdoucích n - 1 cyklů.

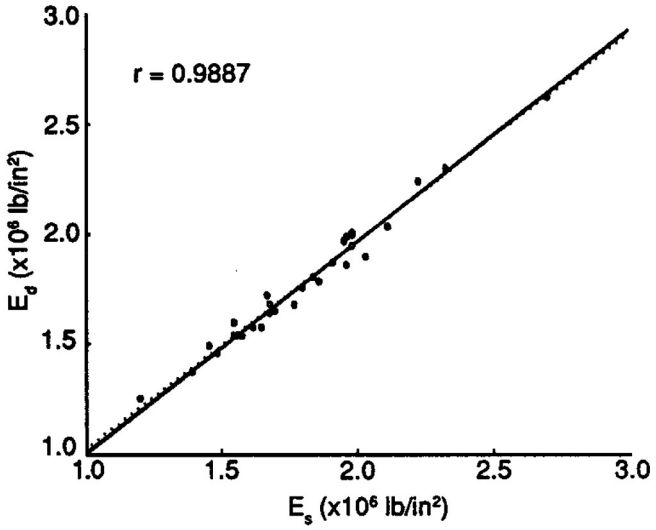
Pro nucené kmitání má pak řešení rovnice (3.21) tvar

$$\delta = \frac{\pi\, \Delta f}{f_r} \frac{1}{\sqrt{(A_r/A)^2 - 1}} \quad , \tag{3.26}$$

kde Δf je rozdíl mezi frekvencemi dvou bodů amplitudy A na každé straně rezonanční křivky, f_r je rezonanční frekvence a A_r je amplituda rezonance.

Například Ross a kol. (1991), Machek, Militz a Sierra-Alvarez (2001) a Wang a kol. (2001b) ve svých pracích porovnali dynamické moduly pružnosti získané měřením frekvencí příčných vibrací s moduly pružnosti vypočítanými na základě metody statické ohybové zkoušky. Všechny potvrdily, že mezi nimi

existuje vztah. Graf na obrázku 3.14 ukazuje, že dynamický modul pružnosti E_d a statický modul pružnosti E_s spolu velmi dobře korelují. Rovněž ostatní zmíněné výzkumy uvádějí korelační koeficient pro různé dřeviny vyšší než 0,8.



Obr. 3.14: Vztah mezi dynamickým E_d a statickým E_s modulem pružnosti pro smrk, jedli a borovici (Ross a kol. 1991)

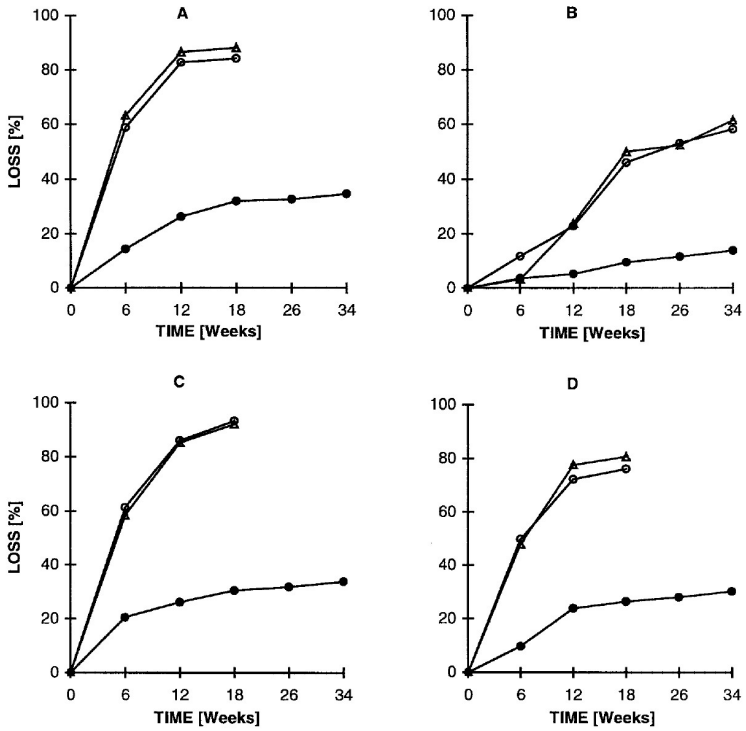
Ross (2015b) zmiňuje pár základních bodů, které je nutné mít na paměti při testování dřeva metodou příčných vibrací:

- podpory vzorku by měly umožnit jeho rotaci,
- vzorek by měl dosedat celou ložnou plochou na podporu, v opačném případě je žádoucí ho otočit případně vhodně podepřít,
- nelze používat žádné boční podpory, pokud je vzorek nestabilní, nelze testovat,
- nadměrné přesahy přes podpory mohou ovlivnit výsledky, přesah by měl být přibližně 25,4 mm (při umístění podpor na konce vzorku), přesahy by měly být stejné u každého vzorku,
- budící síla by měla být vyvolána tak, aby byla jednoduše opakovatelná a vzorek rezonoval v prvním modu,

- u mnoha typů vzorků lze oscilaci vyvolat ručním prohnutím vzorku nebo úderem, doporučuje se co nejkratší kontakt se vzorkem,
- vzorky s velkou tuhostí vyžadují vyšší budící sílu,
- k měření frekvence je možno použít změnu sil působících na podpory,
- v závislosti na počátečním průhybu může být frekvence získána také z měření průhybu uprostřed vzorku,
- vzorek kmitá i v jiných modech než jen v základním, ale ty po chvíli odezní nebo nejsou tak zřetelné, proto je vhodné zaznamenávat data s menším odstupem.

Metodu příčných vibrací využívá řada výzkumů. Například Machek, Militz a Sierra-Alvarez (2001) zkoumali, zda lze z dynamického modulu pružnosti zjistit kvalitu dřeva, resp. zda a jakým způsobem reaguje dynamický modul pružnosti na míru degradace dřeva při kontaktu s půdou. Při výzkumu použili vzorky topolu (*Populus spp.*), jilmu (*Ulmus spp.*), teaku (*Tectona grandis*) a dvojkřídláče křídlatého (*Dipterocarpus alatus*). Jako referenční dřevina byl použit buk (*Fagus silvatica*). Opět potvrdili silnou korelaci mezi statickým modulem pružnosti (získaným ze statických zkoušek podle EN 408 (1995)) a dynamickým modulem pružnosti získaným na základě příčných vibrací. Dále zjistili, že dynamický modul pružnosti velmi citlivě reaguje na degradaci dřeva, vyhodnotili tedy, že metoda příčných vibrací je velmi vhodná ke zjišťování kvality dřeva. Graf na obrázku 3.15 ukazuje úbytek sledovaných parametrů po čas, kdy bylo dřevo vystaveno působení půdy v laboratorních podmínkách.

Obdobný výzkum pak Machek a kol. (2004) provedli na dřevu vystaveném působení půdy a ošetřeném konzervačními látkami. Borovice lesní (*Pinus sylvestris L.*) byla ošetřena sedmi různými ochrannými látkami na bázi mědi i látkami bez obsahu kovů. Autoři zaznamenávali úbytek jeho hmotnosti a zároveň metodou příčných vibrací měřili dynamický modul pružnosti. Z grafů na obrázku 3.16 je patrné, že úbytek hmotnosti je provázen výrazným poklesem MOE_d získaného metodou příčných vibrací. Opět se tedy potvrdilo, že na základě změn hodnot MOE_d lze velmi dobře posoudit kvalitu dřeva.



*Obr. 3.15: Degradace dřeva vlivem působení půdy (*Machek, Militz, Sierra-Alvarez 2001).

A – buk

B – dvojkřídláč

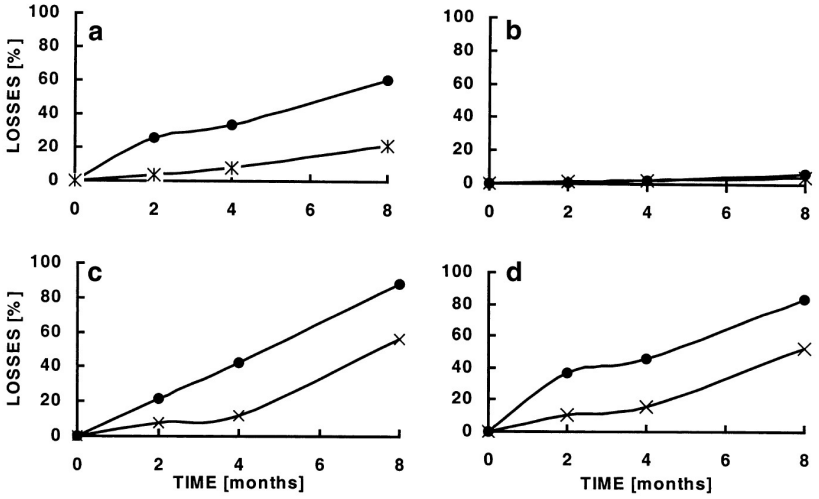
C – topol

D – jilm

● - *úbytek váhy*

▲ - MOE_s

○ - MOE_d



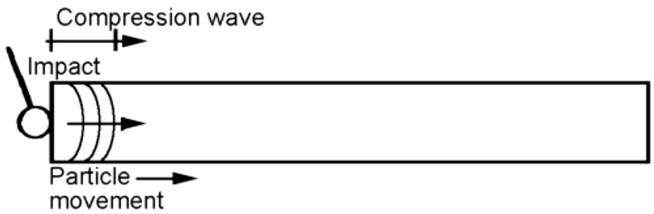
Obr. 3.16: Degradace ošetřeného dřeva (Militz a kol. 2004)

x - úbytek váhy

● - MOE_d

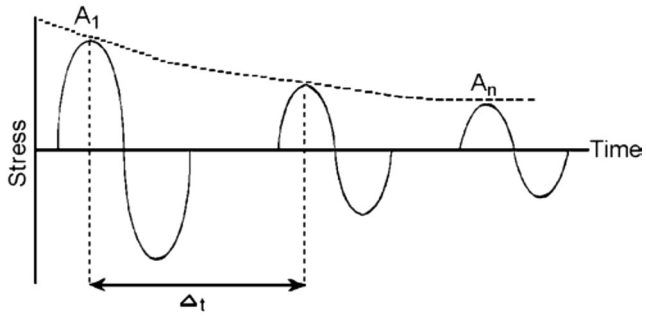
3.3.1.3 Metoda tlakových vln

Metoda tlakových vln je postavená na sledování rychlosti šíření tlakových vln (Ross a Pellerin 1994). Při velké míře zjednodušení lze na pohyb vlny ve dřevě pohlížet jako na jedno-dimenzionální šíření vlny. Po dopadu budící síly se začne šířit podélná vlna (obr. 3.17) z jednoho konce tělesa na druhý, tam se odrazí a putuje zpět.



Obr. 3.17: Šíření podélné tlakové vlny (Ross 2015b)

Vlna se šíří stále konstantní rychlostí, ale částice, které ji přenášejí, postupně kmitají s menší a menší amplitudou, jak to znázorňuje obrázek 3.18. Dřevo nakonec všechnu energii pohltí a pohyb ustane. Rychlost šíření tlakové vlny je do značné míry ovlivněna velikostí síly, která vlnu vyvolala (Ross a Pellerin 1994).



Obr. 3.18: Schéma šíření tlakové vlny (Ross 2015b). Dřevo postupně pohlcuje energii a částice kmitají se zmenšující se amplitudou.

Rychlost šíření vlny C [m/s] závisí na vzdálenosti L [m], kterou musí překonat (rovno délce nosníku) a čase t [s], který k tomu potřebuje. Vyjádřením tohoto je pak vztah

$$C = \frac{2L}{\Delta t} \quad . \tag{3.27}$$

Pokud známe rychlost šíření podélné vlny, lze se znalostí hustoty ρ [kg/m^3] vypočítat modul pružnosti dle vztahu

$$MOE = C^2 \rho \quad . \tag{3.28}$$

Stejně jako u příčných vibrací lze vypočítat logaritmický dekrement útlumu podle vztahu (3.9), nicméně vzhledem k tomu, že charakter vlny závisí na způsobu vyvolání budící síly a její velikosti, nelze výsledky jednotlivých zkoušek mezi sebou přímo porovnávat. I přesto, jak tvrdí Ross a Pellerin (1994), mohou tato data o materiálu poskytnout užitečné informace .

Přestože dřevo je heterogenní ortotropní materiál, Ross (2015b) uvádí, že aplikovatelnost jedno-dimenzionální vlnové teorie pro popis jeho chování byla prokázána četnými výzkumy. Tyto výzkumy zároveň prokázaly silný korelační vztah mezi modulem pružnosti získaným měřením rychlosti šíření podélné vlny a modulem pružnosti získaným ze statických zkoušek, jak ukazuje tabulka 3.1.

Tabulka 3.1: Korelace mezi dynamickým modulem pružnosti získaným na základě měření tlakových vln a statickým modulem pružnosti (Ross 2015b)

Reference	Material	Static loading	Correlation coefficient *r*
Bell et al. (1954)	Clear wood	Compression	0.98
	Clear wood	Bending	0.98
Galligan and Courteau (1965)	Clear wood	Bending	0.96
	Lumber		
Koch and Woodson (1968)	Veneer	Tension	0.96–0.94
Porter et al. (1972)	Lumber	Bending	0.90–0.92
Pellerin and Galligan (1973)	Lumber	Bending	0.96
	Veneer	Tension	0.96
McAlister (1976)	Veneer	Tension	0.99
Gerhards (1982)	Knotty lumber	Bending	0.87
	Clear lumber	Bending	0.95

Dunlop (1983) uvádí, že pro výpočet rychlosti šíření zvukových vln ve dřevě lze využít i rezonanční frekvenci. Vztah má pak tvar

$$C = 2L\frac{f_r}{n} \quad , \tag{3.29}$$

kde L je délka vzorku [m], f_r je rezonanční frekvence [Hz] a n je číslo modu rezonanční frekvence.

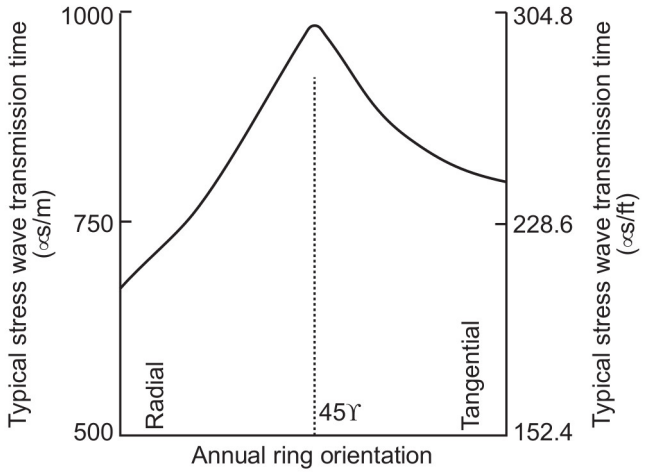
Tabulka 3.2 uvádí výsledky z měření různých výzkumů v oblasti šíření tlakových vln pro různé druhy dřeva. Například Wang a kol. (2001b) porovnali výsledky statického modulu pružnosti s modulem pružnosti získaným metodou tlakových vln a zjistili velkou korelační závislost, která se lišila pro různé druhy dřevin (r = 0,74 pro borovici Banksovu (*Pinus banksiana*) a r = 0,91 pro borovici smolnou (*Pinus resinosa*)).

Tabulka 3.2: Rychlost šíření tlakové vlny z různých výzkumů pro různé druhy dřev (Ross a kol. 1999)

Reference	Species	Moisture content (% ovendry)	Stress wave transmission time (∝s/m (∝s/ft))	
			Parallel to grain	Perpendicular to grain
Smulski 1991	Sugar maple	12	256–194 (78–59)	—
	Yellow birch	11	230–180 (70–55)	—
	White ash	12	252–197 (77–60)	—
	Red oak	11	262–200 (80–61)	—
Armstrong and others 1991	Birch	4–6	213–174 (65–53)	715–676 (218–206)
	Yellow-poplar	4–6	194–174 (59–53)	715–676 (218–206)
	Black cherry	4–6	207–184 (63–56)	689–620 (210–189)
	Red oak	4–6	226–177 (69–54)	646–571 (197–174)
Elvery and Nwokoye 1970	Several	11	203–167 (62–51)	—
Jung 1979	Red oak	12	302–226 (92–69)	—
Ihlseng 1878, 1879	Several	—	272–190 (83–58)	—
Gerhards 1978	Sitka spruce	10	170 (52)	—
	Southern Pine	9	197 (60)	—
Gerhards 1980	Douglas-fir	10	203 (62)	—
Gerhards 1982	Southern Pine	10	197–194 (60–59)	—
Rutherford 1987	Douglas-fir	12	—	1,092–623 (333–190)
Ross 1982	Douglas-fir	11	—	850–597 (259–182)
Hoyle and Pellerin 1978	Douglas-fir	—	—	1,073 (327)
Pellerin and others 1985	Southern Pine	9	200–170 (61–52)	—
Soltis and others 1992	Live oak	12	—	613–1,594 (187–486)
Ross and others 1994	Northern red and white oak	green	—	795 (242)

Na rychlost šíření podélných vln má vliv mnoho faktorů. Jedním z nich je orientace vláken (Ross a kol. 1999). Šíření vln napříč vlákny vykazuje rozdíly ve směru radiálním a tangenciálním, kde se vlny šíří pomaleji ve směru tangenciálním. Jak je patrné z obrázku 3.19, zdaleka nejobtížněji se vlny šíří pod úhlem 45° k letokruhům – tedy na půli cesty mezi tangenciálním a radiálním směrem.

Gerhards (1980, 1982) zkoumal chování tlakových vln v řezivu. Zaměřil se na místa s odklonem vláken a místa se suky. Zjistil, že v okolí těchto defektů se mění rychlost šíření podélných vln. Defekty mají také výrazný vliv na tvar vlny, která pak již nemá rovinný charakter.



Obr. 3.19: Vliv odklonu vláken na rychlost šíření podélné vlny (Ross a kol. 1999)

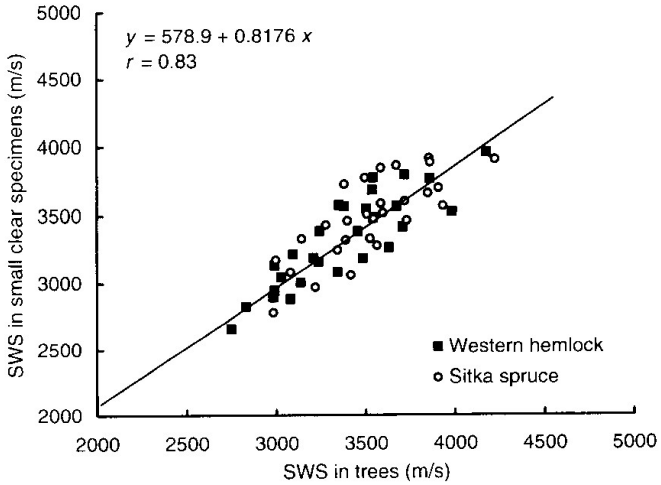
Další defekt, který ovlivňuje rychlost šíření tlakových vln dřevem, je hniloba. Přítomnost hniloby významně snižuje rychlost šíření tlakových vln. Ross a kol. (1999) uvádějí, že pro detekci přítomnosti hniloby jsou výhodnější tlakové vlny napříč vláken, protože při podélném šíření může snáze dojít k minutí degradované oblasti. Dále uvádějí, že například u douglasky se čas šíření tlakové vlny napříč vláken zvýšil z přibližně 800 μs/m u zdravého dřeva na 3200 μs/m u degradovaného dřeva. Při nárůstu času šíření tlakové vlny o 30 % dochází k poklesu pevnosti o 50 %. Ross a kol. (1999) aplikovali metodu tlakových vln na zkoumání stavu dřevěných mostů.

Madhoushi a Daneshvar (2016) zjišťovali vztah mezi statickým a dynamickým modulem pružnosti u topolu bavlníkového (*Populus deltoides*). MOE_d měřili na stojících stromech metodou tlakových vln – v podélném i příčném směru v různých částech kmene. Statický modul pružnosti byl vypočítán z ohybové zkoušky na vzorcích z pokácených stromů. Účelem tohoto výzkumu bylo odhadnout kvalitu dřeva dříve, než bude strom pokácen. Madhoushi a Daneshvar (2016) uvádějí, že relativně vysoký korelační koeficient (r = 0,74) byl prokázán pouze u tlakových vln v podélném směru, a to ještě pouze u kmenů o průměru 25 – 29 cm a jen v určité výšce kmene. Výsledky jejich měření uvádí tabulka 3.3.

Hodnoty MOE_d získané měřením na rostoucích stromech s daty získanými z měření na malých vzorcích dané dřeviny (jedlovec západní – *Tsuga heterophylla* a smrk sitka - *Picea sitchensis*) zkoušeli porovnat i Wang a kol. (2001a). Na jimi testovaných dřevinách se podařilo prokázat daleko silnější korelační vztah, který je patrný z grafu na obr. 3.20.

Tabulka 3.3: Korelační vztah mezi statickým modulem pružnosti z ohybové zkoušky a dynamickým modulem pružnosti získaný měřením rychlosti tlakových vln u různých průměrů stromu v různých částech kmene (Madhoushi a Daneshvar 2016)

	Tree				Log			
	25–29 (cm)		30–35 (cm)		25–29 (cm)		30–35 (cm)	
	R^2	r	R^2	r	R^2	r	R^2	r
Transverse direction								
L1	0.38	0.61	0.048	0.21	0.31	0.55	0.013	0.11
L2	0.262	0.51	0.028	0.16	0.12	0.34	0.18	0.42
L3	0.159	0.39	0.13	0.36	0.40	0.63	0.48	0.69
Longitudinal direction								
L1	0	0	0.046	0.21	0.35	0.59	0.008	0.08
L2	0.003	0.05	0.16	0.40	0.50	0.70	0.17	0.41
L3	0.55	0.74[a]	0.11	0.34	0.18	0.42	0.045	0.21



Obr. 3.20: Korelace mezi hodnotami získanými z rostoucího dřeva a laboratorně změřenými vzorky (Wang a kol. 2001a)

3.3.1.4 Ultrazvukové metody

Ultrazvuk se velmi dobře šíří pevnými látkami. V nedestruktivním testování se ultrazvuk využívá pro detekci vnitřních nehomogenit ve dřevě, jako jsou například různé praskliny, které nejsou patrné na povrchu.

O ultrazvukových vlnách mluvíme při frekvencích 20 kHz a vyšších, přičemž platí, že čím vyšší frekvence, tím menší vlnová délka (Senalik, Schueneman, Ross 2015). Této závislosti je využíváno při detekci poruch ve dřevě – čím menší vlnová délka, tím menší nehomogenita může být detekována. Senalik, Schueneman a Ross (2015) uvádějí, že nejmenší detekovatelná porucha se rovná přibližně jedné polovině vlnové délky. Tato citlivost je znatelnější zvláště u vyšších frekvencí.

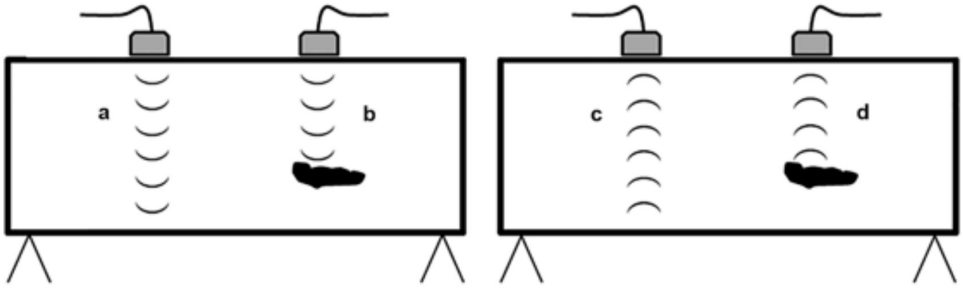
Ultrazvukové vlny se ve dřevě mohou šířit buď v celém objemu ve formě podélných nebo příčných vln, ale také na povrchu, pak se jedná o Rayleighovy vlny, Lambovy vlny, nebo Loveho vlny (Bucur 2010). Opět závisí na směru kmitání částic vůči směru šíření vlny – u podélných vln částice kmitají ve směru shodném se směrem propagace vlny, u příčných vln je směr kmitání kolmý na směr šíření vlny.

Beall (2002) uvádí charakteristické rychlosti ultrazvuku ve dřevě – pro podélný směr je to 5 – 6 km/s, napříč vláken 1 – 2 km/s, kde ve směru radiálním je rychlost šíření přibližně o 50 % větší než ve směru tangenciálním. Rychlost závisí na frekvenci, přičemž pro dřevo se používají převážně frekvence 100 – 200 kHz v závislosti na velikosti a geometrii vzorku.

Základními typy ultrazvukových zkoušek jsou podle Senalika, Schuenemana a Rosse (2015) metoda „Pulse Echo“, metoda „Through Transmission“ a metoda „Angle Beam“. Tyto metody se liší principem snímání ultrazvukových vln.

U metody „Pulse Echo“ je ultrazvukový signál vyslán piezoelektrickým měničem (lze volit intenzitu a frekvenci signálu) skrz průřez vzorku. Signál se na konci vzorku odrazí a stejný senzor, který předtím signál vyslal, ho zaznamená. Pokud vzorek obsahuje defekt, signál se od něj odrazí, jak je znázorněno na obrázku 3.21. Na základě známé rychlosti šíření tlakové vlny lze pak dopočítat vzdálenost defektu od senzoru. Senalik, Schueneman a Ross (2015) zdůrazňují, že při detekci praskliny hraje důležitou roli její orientace vůči tlakové vlně – je-li kolmo ke směru šíření tlakové vlny, dojde k odrazu

většího množství energie, než když je defekt orientovaný podélně se směrem šíření tlakové vlny. V případě, že se jedná o dostatečně úzkou podélně orientovanou prasklinu, nemusí dojít k její detekci vůbec – ultrazvukové vlny projdou kolem ní, aniž by se odrazily, a vzorek se tak může jevit jako neporušený. Orientace prasklin však většinou bývá pod nějakým úhlem, takže k alespoň částečnému odrazu energie dochází. Senalik, Schueneman a Ross (2015) upozorňují na nevýhodu této metody – dřevo pohlcuje signál, a při nutnosti zpětného průchodu vzorkem je tento jev ještě znatelnější. Signál proto musí být dostatečně intenzivní. V případě, že je vzorek příliš tenký, snímač detekuje odraženou vlnu, ale současně i doznívající odcházející vlnu a data jsou pak zkreslená.

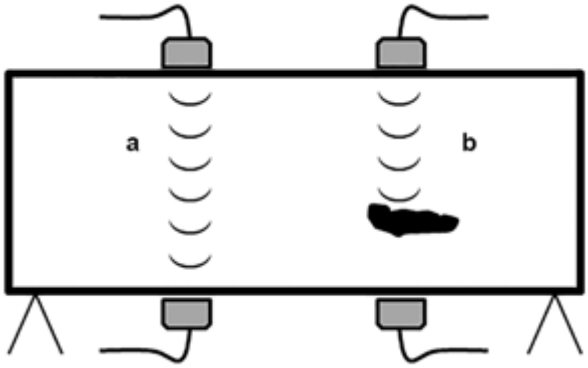


Obr. 3.21: Princip ultrazvukové metody „Pulse Echo“ (Senalik, Schueneman, Ross 2015). V případě zdravého vzorku projde vyslaný signál skrz vzorek (a), na jeho konci se odrazí a senzor zaznamená čas putování signálu vzorkem (c). Je-li v cestě signálu prasklina (b), signál se od ní odrazí zpět k senzoru (d).

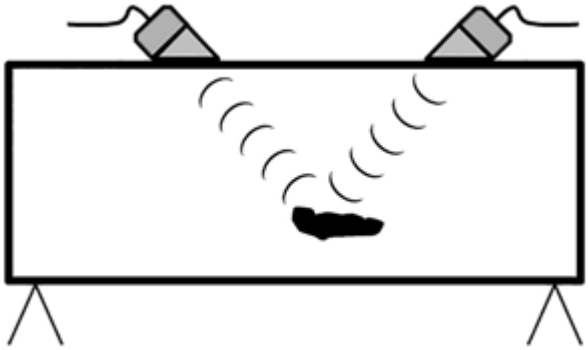
Naproti tomu další metoda, kterou Senalik, Schueneman a Ross (2015) uvádějí, využívá dvou senzorů – jeden vysílá signál a druhý ho snímá na druhé straně vzorku (obr 3.22). Díky tomu, že signál prochází vzorkem jen v jednom směru, intenzita signálu může být daleko menší než u předchozí metody. Pokud vzorek obsahuje defekt, dochází k blokaci signálu, nebo k jeho odklonu a snímač pak zaznamenává příchod signálu se zpožděním. Touto metodou nelze zjistit polohu praskliny, je detekována pouze její přítomnost.

Při alternativní pozici dvou senzorů na jedné straně vzorku – přijímač je v místě předpokládaného odrazu vlny (obr 3.23) – dochází k odrazu vlny od druhé strany vzorku nebo od defektu. Jak Senalik, Schueneman a Ross (2015) uvádějí, výhodu této konfigurace lze vidět v možnosti odhalení prasklin, které

byly v předcházejících případech rovnoběžně se směrem šíření vlny. Vlna opět prochází větší hmotou dřeva, je proto nutná větší intenzita signálu.

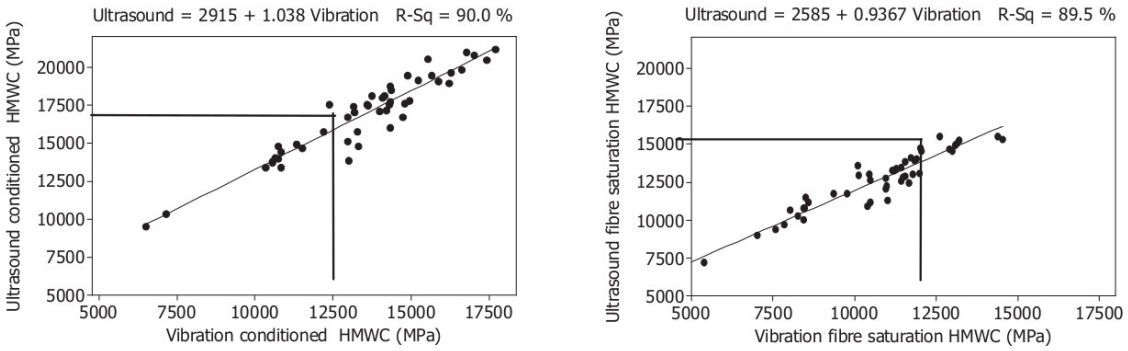


Obr. 3.22: Princip ultrazvukové metody „Through Transmission“ (Senalik, Schueneman, Ross 2015)



Obr. 3.23: Princip ultrazvukové metody „Angle Beam“ (Senalik, Schueneman, Ross 2015)

Alfredsen, Lanrøy a Militz (2006) porovnávali dvě metody zjišťování dynamického modulu pružnosti MOE_d u borovice lesní (*Pinus silvestris L.*), přičemž vzorky měly dvě různé vlhkosti a byly ošetřeny dvěma různými ochrannými prostředky. K měření MOE_d využili metodu rezonančních vibrací a měření rychlosti ultrazvukových vln. Potvrdili, že obě metody vysoce korelují, nicméně u ultrazvukových vln vycházejí vyšší hodnoty $MOE_{d,}$ a to zhruba o 30 % u suchých vzorků a o 37 % u vlhkých vzorků. Potvrdili rovněž, že vlhké vzorky měly nižší hodnoty MOE_d.



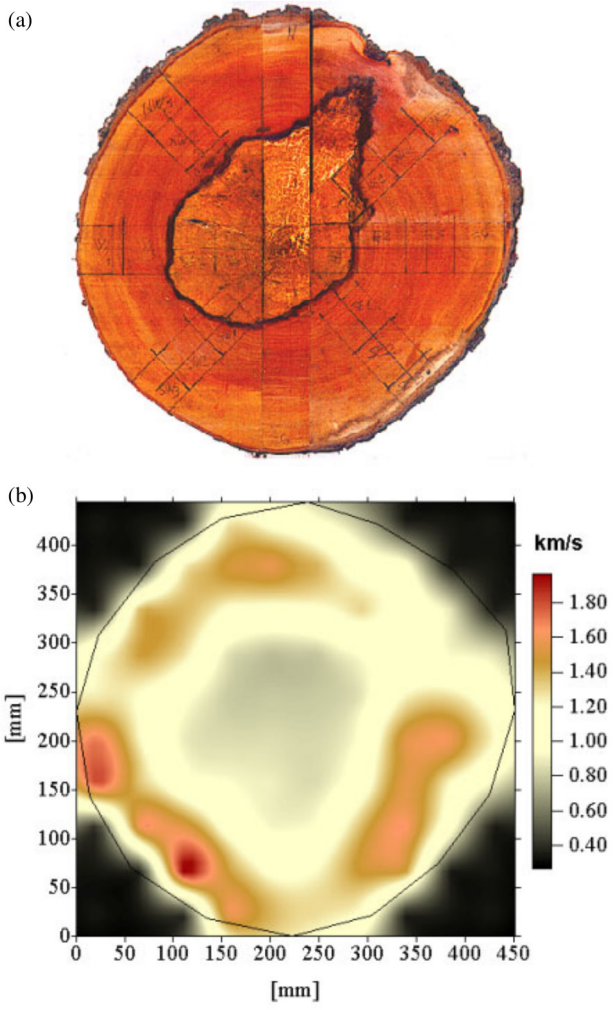
Obr. 3.24: Vztah mezi modulem pružnosti získaným metodou rezonančních frekvencí a modulem pružnosti získaným měřením rychlosti ultrazvukových vln (Alfredsen, Lanrøy, Militz 2006)

3.3.1.5 Vizualizační technologie

Při nedestruktivním testování dřeva se uplatňují i moderní pokročilé metody vizualizace. Bucur (2003) ve svém přehledu zmiňuje, že dalším stupněm vizuálního testování je pohled do jeho vnitřní struktury. Zatímco „klasické“ vizuální metody pracují na principu hodnocení vzhledu povrchu (praskliny, suky), díky vizualizačním technologiím lze nahlédnout i pod povrch dřeva a na základě analýzy obrazu lokalizovat vnitřní poruchy. V této oblasti se uplatňuje hlavně pět technologií – ionizační radiační techniky (x-ray, gamma ray), termální techniky, mikrovlnné techniky, technika nukleární magnetické rezonance a ultrazvukové techniky. Těmito technologiemi lze zjistit například průběh letokruhů, poměr jarního a letního dřeva v letokruhu, orientaci a odklon vláken, lokalizovat dřeň či jádro, odhalit přírodní defekty jako suky, hnilobu, pryskyřičné kapsy, trhliny a zóny s vysokým obsahem vlhkosti. Vzhledem k zaměření práce bude dále blíže popsána pouze metoda ultrazvukové vizualizace.

Jak Bucur (2003) uvádí, vizualizační techniky využívající ultrazvuk jsou méně invazivní než například rentgenová tomografie. K vizualizaci dřeva se využívají především objemové tlakové vlny. Obraz pak tvoří příčný řez vzorku. K vytvoření obrazu souží analýza všech parametrů vlny - doba šíření, amplituda, frekvenční spektrum, fáze atd. Z těchto parametrů je třeba zjistit rozložení energie a její průběh. Pro analýzu těchto dat slouží tři hlavní algoritmy –

transformační metody, iterativní metody a metody přímé inverze. Vytvořené obrazy mohou být získány pro malé vzorky dřeva, ale i pro stojící stromy nebo pro materiály na bázi dřeva. Frekvence pro vizualizace se podle Bucur (2003) obvykle pohybují od 50 kHz do 5 MHz. Ultrazvuková tomografie nachází uplatnění hlavně v diagnostice stojících stromů, při zjišťování kvality řeziva (dokáže odhalit zarostlé suky, odklon vláken, tlakové dřevo, praskliny) nebo v diagnostice dřevěných kompozitů.

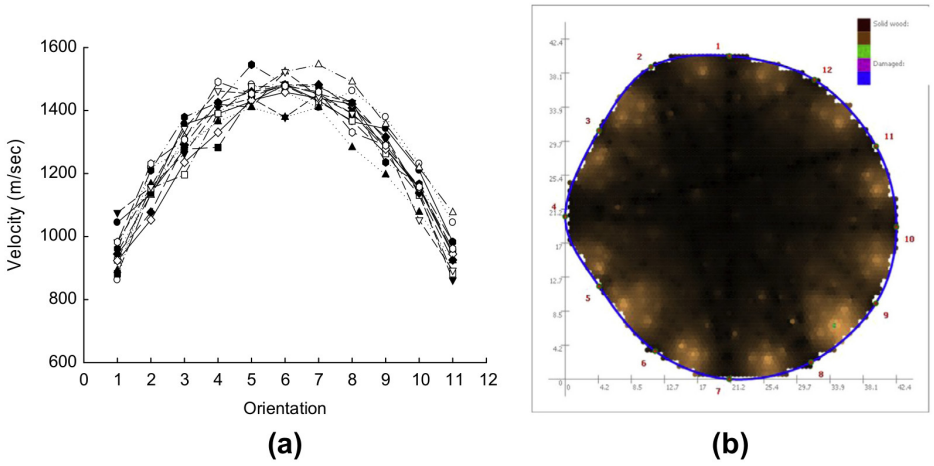


Obr. 3.25: Vizualizace průřezu kmene na základě ultrazvukové tomografie (Bucur 2003).

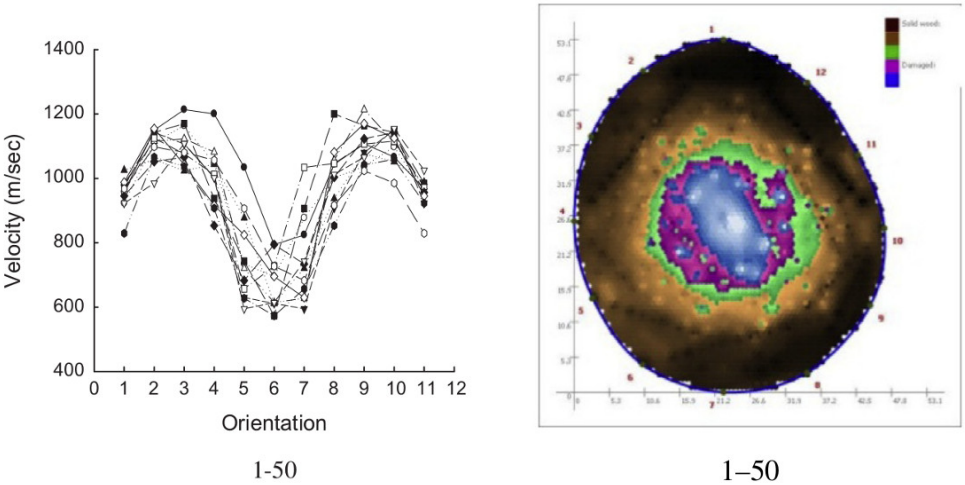
(a) reálná fotografie

(b) ultrazvukový obraz

K vizualizaci průřezu kmene mohou být využity i tlakové vlny. Například Wang a kol. (2009) nebo Li a kol. (2014) použili ke zjišťování stavu stojících stromů analýzu rychlostí tlakových vln. Li a kol. (2014) ve své práci popisují analýzu tlakových vln velmi podrobně. K detekci tlakových vln použili systém zvukového tomografu PiCUS s dvanácti senzory umístěnými v jedné rovině okolo kmene stromu střemchy pozdní (*Prunus serotina*). Signál byl vždy vyslán úderem ocelového kladiva v místě jednoho senzoru a zbývajících 11 senzorů měřilo dobu, za kterou se k nim signál dostane. Tímto způsobem bylo možné detekovat a lokalizovat vnitřní poruchy (například hnilobu) a odlišit tak zdravé stromy (obr 3.26) od těch poškozených (obr 3.27).



Obr. 3.26: Vizualizace zdravého kmene stromu na základě analýzy rychlostí tlakových vln (Li a kol. 2014). Ze záznamu rychlostí tlakových vln (a) je následně rekonstruován obraz průřezu kmene (b).



Obr. 3.27: Vizualizace poškozeného kmene stromu na základě analýzy rychlostí tlakových vln (Li a kol. 2014). Ve střední části kmene je znatelný výrazný pokles rychlostí šíření tlakových vln.

4. Materiál a metodika

4.1 Použitý materiál

Pro změření rezonančních frekvencí nosníků byly použity tyto pomůcky:

PC s FFT softwarem,

mikrofon,

palička s pryžovou hlavou,

ocelové kladivo,

pryžové podpěry,

metr,

váhy.

4.2 Měření dat

Předmětem zkoušení byly 4 skupiny trámů o rozměrech 0,2×0,24×2,5 m (š×v×d). Všechny trámy byly z čerstvého smrkového dřeva. První skupina trámů byla tesaná, další řezaná. Následující dvě skupiny byly tesané a máčené, přičemž se lišily pořadím těchto operací. Jedna skupina tedy byla máčená a poté tesaná, druhá tesaná a poté máčená. Celkem tedy bylo zkoušeno:

- 17× tesaný trám,
- 17× řezaný trám,
- 17× máčený a poté tesaný trám,
- 17× tesaný a poté máčený trám.

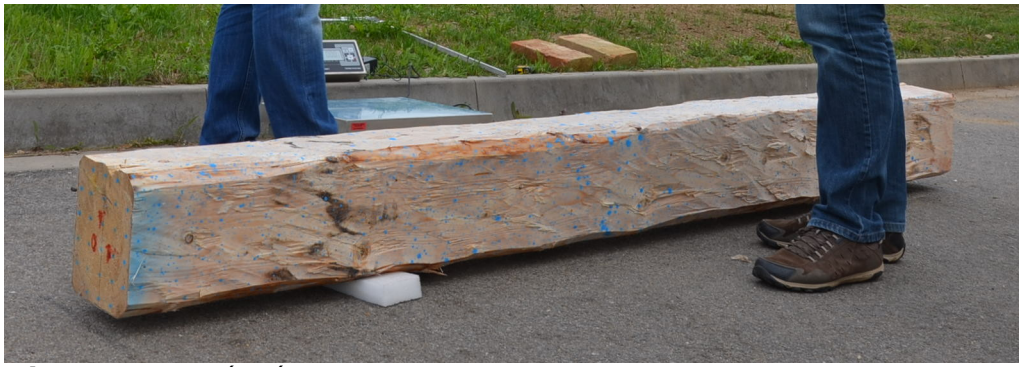
Všechny vzorky byly změřeny a zváženy. Na obrázku 4.1 lze vidět zkoušené trámy.

Obr. 4.1: Zkoušené SM trámy

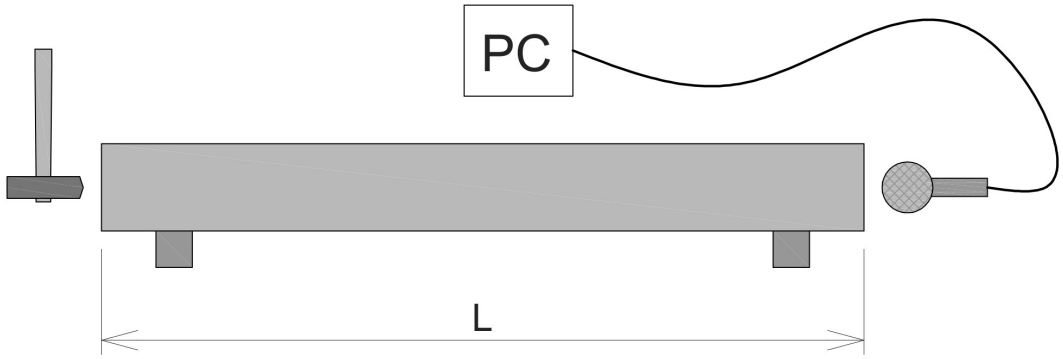
K získání rezonančních frekvencí nosníků byla použita metoda volného kmitání, kterou popisuje Divos (2004). Pro získání podélné frekvence byl vzorek položen na pryžové podpěry, jak značí schéma na obrázku 4.3. Ocelovým kladivem (doporučená váha 0,5 – 5 % váhy vzorku) bylo udeřeno do čela trámu a mikrofon na opačné straně vzorku zaznamenal zvukový signál. Připojené PC pak pomocí FFT softwaru analyzovalo zvukové spektrum a ze zobrazeného „peaku“ se pak odečetla rezonanční frekvence. U podélné tlakové vlny je spektrum „peaků“ obvykle bohatší, proto byla oblast hledané frekvence f_r [Hz] odhadnuta na základě vztahu

$$f_r = 1600/L \quad , \tag{4.1}$$

kde L je délka vzorku [m].

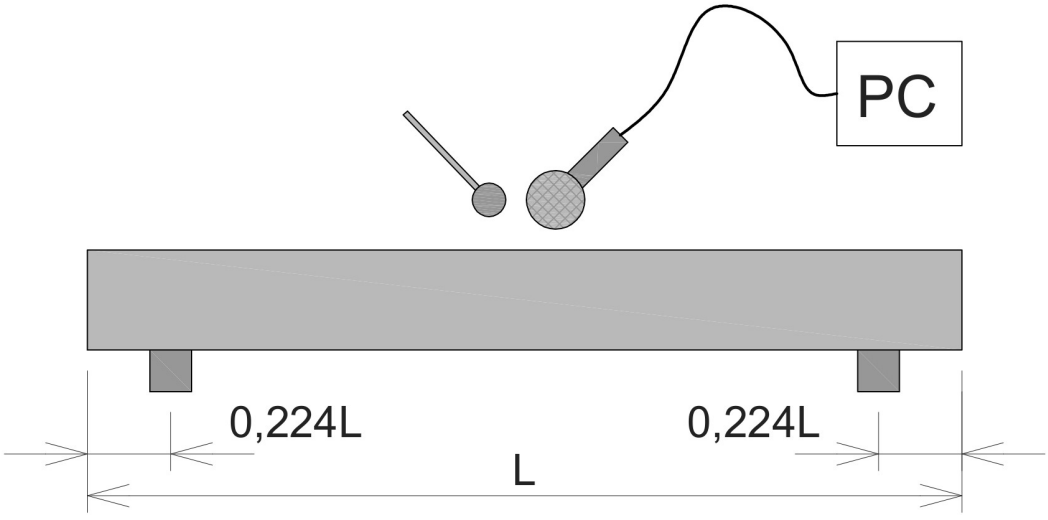


Obr. 4.2: Tesaný trám

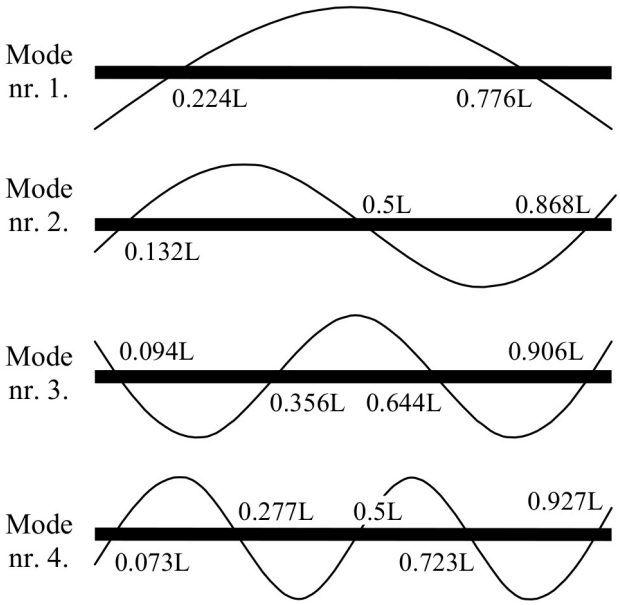


Obr. 4.3: Schéma měření podélné frekvence

Pro změření příčných frekvencí byla konfigurace zkoušky odlišná. Podpěry bylo nutné umístit tak, aby upřednostnily požadovaný mod vibrací a ostatní mody potlačily. Umístění podpěr vycházelo z tvaru samotného vibračního modu, jak je to znázorněno na obrázku 4.5. Podpěry jsou umístěny v uzlových bodech. Pro měření vlastní frekvence prvního vibračního modu byly tedy podpěry umístěny ve vzdálenosti 0,224L a 0,776L, pro třetí vibrační mod pak ve vzdálenostech 0,094L, 0,356L, 0,664L a 0,906L.

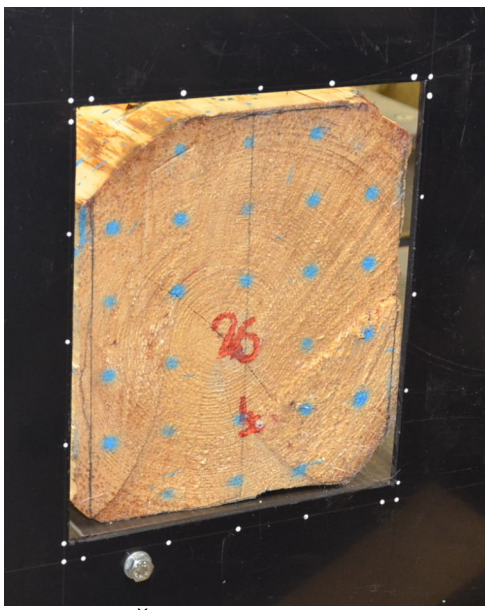


Obr. 4.4: Schéma měření 1. vlastní frekvence



Obr. 4.5: Tvary vibračních modů volného kmitání prismatického tělesa (Divos 2004)

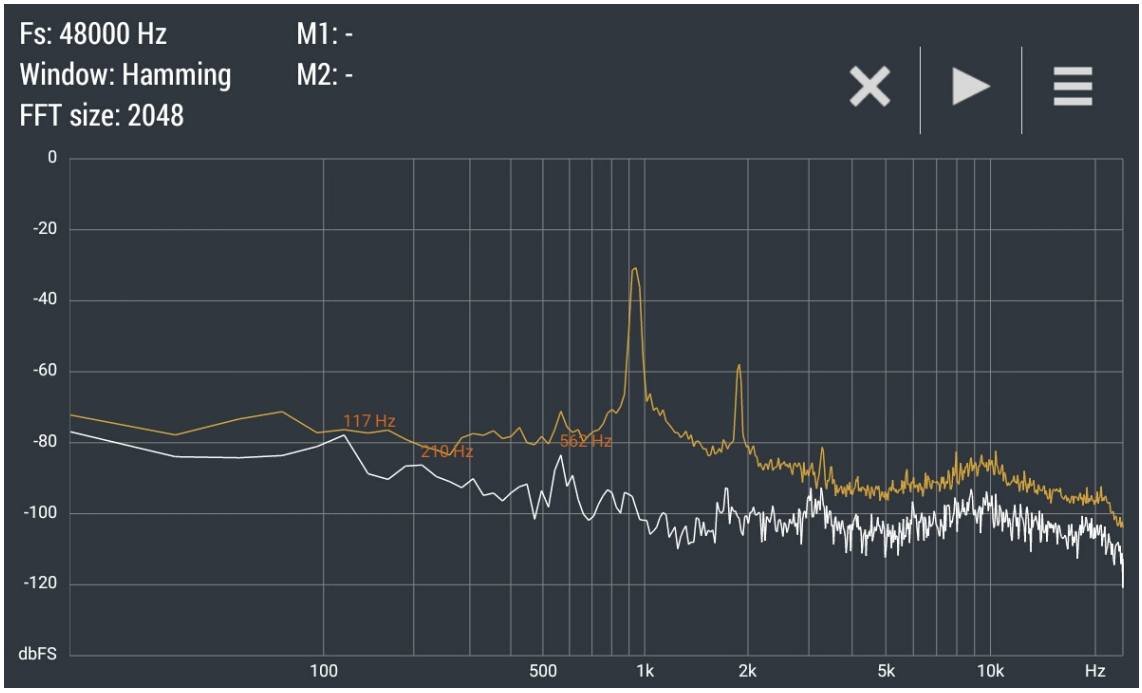
Zvukový signál byl vyvolán úderem paličky s pryžovou hlavou (doporučená váha opět 0,5 – 5 % váhy vzorku) a zaznamenán mikrofonem umístěným nad středem vzorku. Z nejvyššího „peaku“ byla odečtena rezonanční frekvence. Schéma zkoušky pro měření 1. vlastní frekvence ukazuje obrázek 4.4.



Obr. 4.6: Čelo zkoušeného trámu

4.2.1 Princip FFT analýzy

FFT software pracuje na principu Fourierovy transformace, která zaznamenaný kontinuální signál převádí na spojité frekvenční oblasti včetně informace o velikosti a fázi signálu (FFT Spectrum Analyzer). V oblasti digitálního zpracování signálu se využívá algoritmu rychlé Fourierovy transformace (Fast Fourier transform – FFT), která počítá diskrétní Fourierovy tranformace. Diskrétní Fourierova transformace je numerická metoda schopná rekonstruovat spektrum ze vzorků signálu a naopak (Fourierova transformace).



Obr. 4.7: FFT analyzér Advanced Spectrum Analyzer PRO

4.3 Analýza dat

Dle výzkumů uvedených v literárním přehledu se jeví dynamický modul pružnosti jako vhodný ukazatel kvality dřeva. Snahou analýzy je tedy zjištění dynamických modulů pružnosti u všech skupin vzorků.

Použité vzorce pro výpočet dynamického modulu pružnosti kalkulují s geometrickými rozměry vzorku, jeho váhou a samozřejmě s rezonanční frekvencí. Skrze základní vztah, uváděný například Požgajem a kol. (1997), byla na základě znalostí geometrie a váhy vzorku stanovena jeho hustota ρ [kg/m$_3$].

Prvním zjišťovaným akustickým parametrem byla rychlost šíření zvuku ve dřevě c [Hz] v podélném směru. Tato se vypočítala podle vztahu, který uvádí Dunlop (1983). K výpočtu je třeba znát délku vzorku L [m] a podélnou rezonanční frekvenci f_r [Hz] příslušného modu n.

$$c = 2L\frac{f_r}{n} \tag{4.2}$$

Zjištěná rychlost šíření zvuku byla následně dosazena do vztahu uvedeného například Rossem a Pellerinem (1994). Tímto postupem dostaneme podélný dynamický modul pružnosti E_{dynL} [Pa]. Vzorec využívá znalosti rychlosti šíření zvuku ve dřevě c [m/s] a jeho hustoty ρ [kg/m^3].

$$E_{dynL} = c^2\rho \tag{4.3}$$

Pro získání dynamických modulů pružnosti první a třetí vlastní frekvence, byl použit vztah uvedený Divosem (2004)

$$MOE_d = \left(\frac{2f_n}{\gamma_n \pi}\right)^2 \frac{WL^3}{I} \tag{4.4}$$

kde $\gamma_n = (n+0{,}5)^2$. Opět je zapotřebí znát geometrii vzorku - délku L [m], moment setrvačnosti I [m^4] (pro obdélníkový průřez $I = \frac{1}{12}bh^3$, kde b [m] je šířka průřezu a h [m] výška průřezu) – hmotnost vzorku W [kg] a samozřejmě rezonanční frekvenci příslušného modu f_n [Hz].

Získaná data byla uspořádána do tabulek podle skupin vzorků. Pro vizualizaci výsledků byla data sestavena do krabicových grafů, ze kterých jsou patrny rozptyly výsledků.

4.3.1 Statistická analýza

Pro otestování shodnosti či různosti dat byly použity statistické analýzy rozptylů.

F-test ověřil, zda se rozptyly statisticky významně liší či nikoli. Výsledek představuje pravděpodobnost nulové hypotézy o shodě dvou porovnávaných rozptylů při hladině významnosti p=0,05. Pokud je výsledek větší než hladina

významnosti, rozptyly jsou ze statistického hlediska shodné. V opačném případně se jedná o různé rozptyly.

Výsledek F-testu pak rozhodl o použité variantě t-testu. Pro shodné rozptyly byl použit t-test pro nepárové výběry se shodným rozptylem, pro rozdílné rozptyly pak t-test pro nepárové výběry s rozdílným rozptylem. Výsledky t-testů pak mohou ukázat, zda se střední hodnoty porovnávaných skupin statisticky významně liší, či nikoli. Hladina významnosti byla opět p=0,05.

F-testy a t-testy byly použity pro porovnání všech skupin mezi sebou, tzn. každá skupina vzorků s každou.

Další hledaný fenomén představovala souvislost dat – korelace. Bylo zjišťováno, zda má určitá veličina vztah k jiné sledované veličině. Míra této souvislosti je vyjádřena korelačním koeficientem r, který nabývá hodnot od -1 (negativní korelace) do 1 (pozitivní korelace). Relevantní skupiny dat byly uspořádány a poté se zjišťovala jejich korelační závislost. U potencionálně závislých skupin pak byla provedena lineární regresní analýza (pouze pro jednu skupinu vzorků), která vyjadřuje model závislosti. Do vytvořeného grafu byla vložena lineární regresní přímka vypočítaná na základě metody nejmenších čtverců. Regresní přímka je charakterizovaná regresním koeficientem R^2, který vyjadřuje přesnost lineárního vyjádření dat.

5. Výsledky

První zjišťovanou veličinou byla hustota smrkových nosníků. Tabulka 5.1 uvádí průměrné hodnoty jednotlivých skupin vzorků.

Tabulka 5.1: Průměrná hustota

	hustota ρ [kg/m^3]			
	tesané	řezané	máčené_tesané	tesané_máčené
střední hodnota	585	549	630	633
směrodatná odchylka	71	44	70	65
variační koeficient [-]	0,12	0,08	0,11	0,1
minimum	500	479	521	550
maximum	721	621	727	768

Máčené vzorky mají vyšší hustotu než vzorky nemáčené, což je dáno vyšší vlhkostí dřeva.

Tabulky 5.2, 5.3 a 5.4 uvádějí hodnoty naměřených vlastních frekvencí – podélné vlastní frekvence, vlastní frekvence 1. modu a vlastní frekvence 3. modu.

Tabulka 5.2: Průměrná podélná frekvence

	f_L [Hz]			
	tesané	řezané	máčené_tesané	tesané_máčené
střední hodnota	983	1012	947	918
směrodatná odchylka	28	54	46	66
variační koeficient [-]	0,03	0,05	0,05	0,07
minimum	915	870	855	715
maximum	1019	1072	1025	978

Tabulka 5.3: Průměrná vlastní frekvence 1. modu

	f_1 [Hz]			
	tesané	řezané	máčené_tesané	tesané_máčené
střední hodnota	145	150	141	134
směrodatná odchylka	5	9	8	8
variační koeficient [-]	0,03	0,06	0,06	0,06
minimum	130	130	127	109
maximum	151	163	157	144

Tabulka 5.4: Průměrná vlastní frekvence 3. modu

	f_3 [Hz]			
	tesané	řezané	máčené_tesané	tesané_máčené
střední hodnota	532	549	515	503
směrodatná odchylka	17	17	17	32
variační koeficient [-]	0,03	0,03	0,03	0,06
minimum	500	520	487	396
maximum	560	578	547	539

Nejvyšší hodnoty u všech frekvencí vykazují řezané vzorky. U všech tří frekvencí mají nejnižší hodnoty vzorky tesané a poté máčené. Obě skupiny máčených vzorků mají vlivem zvýšené vlhkosti nižší frekvence.

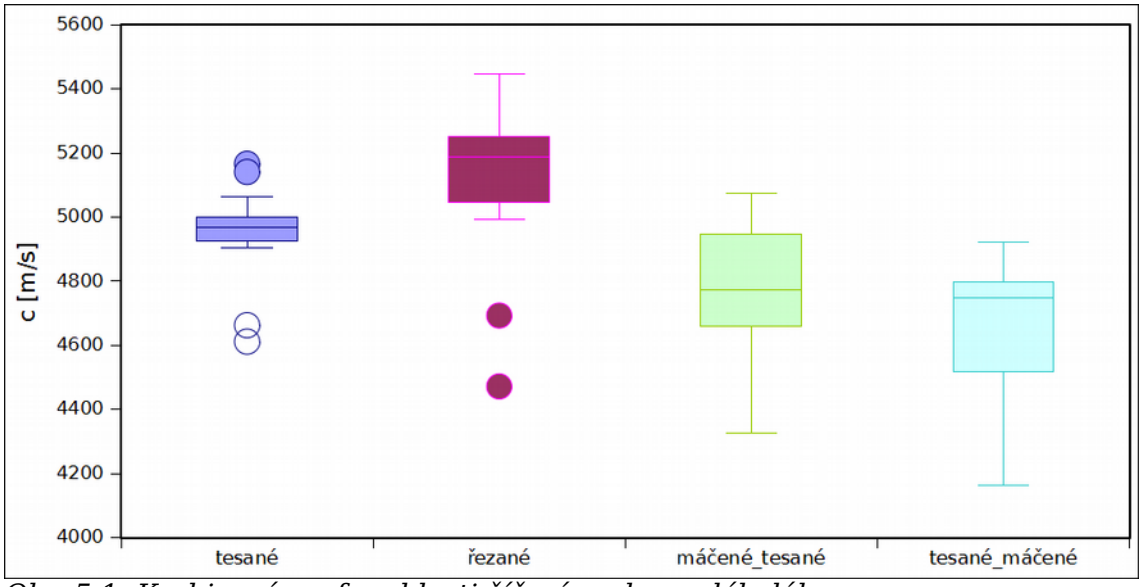
Výsledné hodnoty rychlosti šíření zvuku podél vláken vypočítané dle vztahu (4.2) uvádí tabulka 5.5.

Tabulka 5.5: Průměrná rychlost šíření zvuku podél vláken

	c [m/s]			
	tesané	řezané	máčené_tesané	tesané_máčené
střední hodnota	4953	5126	4777	4614
směrodatná odchylka	140	246	202	335
variační koeficient [-]	0,03	0,05	0,04	0,07
minimum	4612	4472	4326	3595
maximum	5166	5446	5073	4922

Podobně jako u frekvencí vycházejí nejvyšší hodnoty u řezaných vzorků, pomaleji se zvuk šíří v máčených vzorcích, kde tesané a poté máčené vzorky vykazují nižší hodnoty než máčené a poté tesané.

Graf na obrázku 5.1 ukazuje různé rozptyly rychlostí zvuku, přičemž u tesaných a řezaných vzorků se vyskytují extrémy.



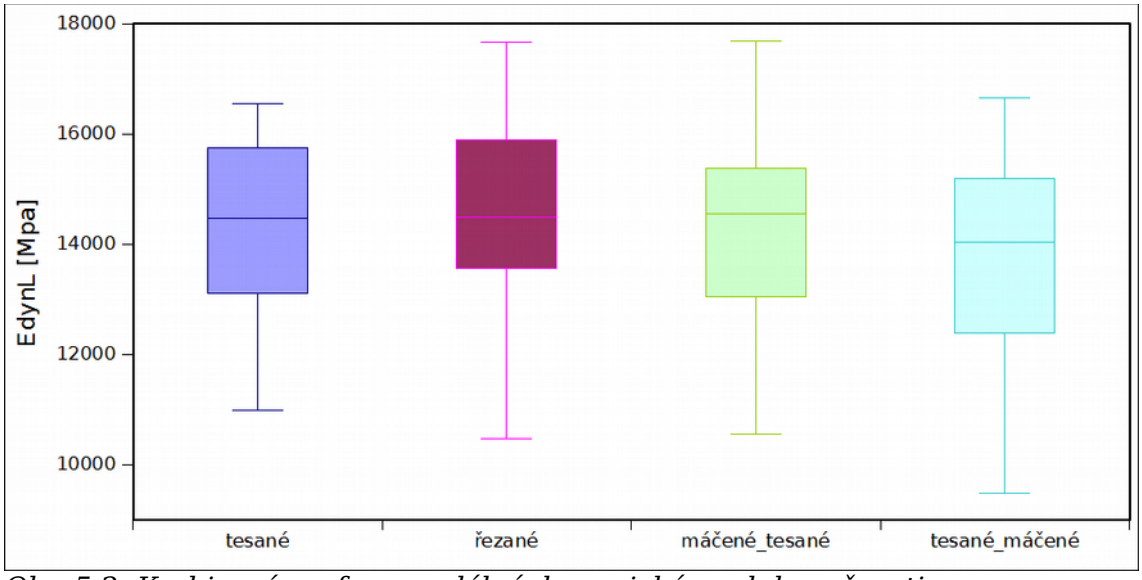
Obr. 5.1: Krabicový graf rychlosti šíření zvuku podél vláken

Následující tabulky uvádí průměrné hodnoty podélných dynamických modulů pružnosti (tabulka 5.6), dynamických modulů pružnosti z 1. modu vibrací (tabulka 5.7) a ze 3. modu vibrací (tabulka 5.8). Podélný dynamický modul pružnosti byl vypočítaný dle vztahu (4.3), dynamický modul pružnosti 1. a 3. modu dle vztahu (4.4).

Tabulka 5.6: Průměrný dynamický modul pružnosti podél vláken

	E_{dynL} [MPa]			
	tesané	řezané	máčené_tesané	tesané_máčené
střední hodnota	14349	14484	14408	13519
směrodatná odchylka	1753	2077	2000	2189
variační koeficient [-]	0,12	0,14	0,14	0,16
minimum	10984	10472	10558	9487
maximum	16554	17656	17692	16662

Hodnoty podélného dynamického modulu pružnosti vycházejí u tesaných, řezaných a máčených a poté tesaných vzorků velice podobně, liší se pouze hodnoty tesaných a poté máčených vzorků, které jsou zhruba o 6 % nižší. Grafické vyjádření výsledků je znázorněno v grafu na obrázku 5.2.

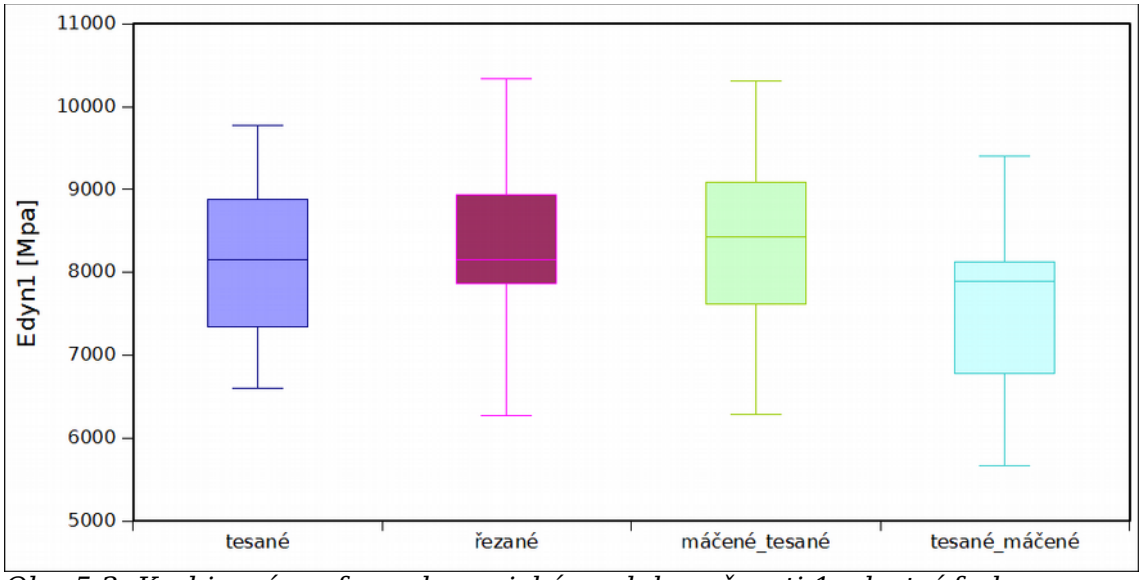


Obr. 5.2: Krabicový graf pro podélný dynamický modul pružnosti

Tabulka 5.7: Průměrný dynamický modul pružnosti z 1. vlastní frekvence

	E_{dyn1} [MPa]			
	tesané	řezané	máčené_tesané	tesané_máčené
střední hodnota	8249	8463	8463	7584
směrodatná odchylka	971	1169	1125	1125
variační koeficient [-]	0,12	0,14	0,13	0,15
minimum	6703	6374	6382	5759
maximum	9924	10496	10461	9548

Hodnoty dynamického modulu pružnosti pro první vlastní frekvenci vycházejí přibližně podobně pro tesané, řezané i máčené a poté tesané vzorky. Nižší hodnoty E_{dyn1} (zhruba o 10 %) vykazují vzorky tesané a poté máčené. Grafické zobrazení dat na obr. 5.3 potvrzuje hodnoty uvedené v tabulce 5.7.



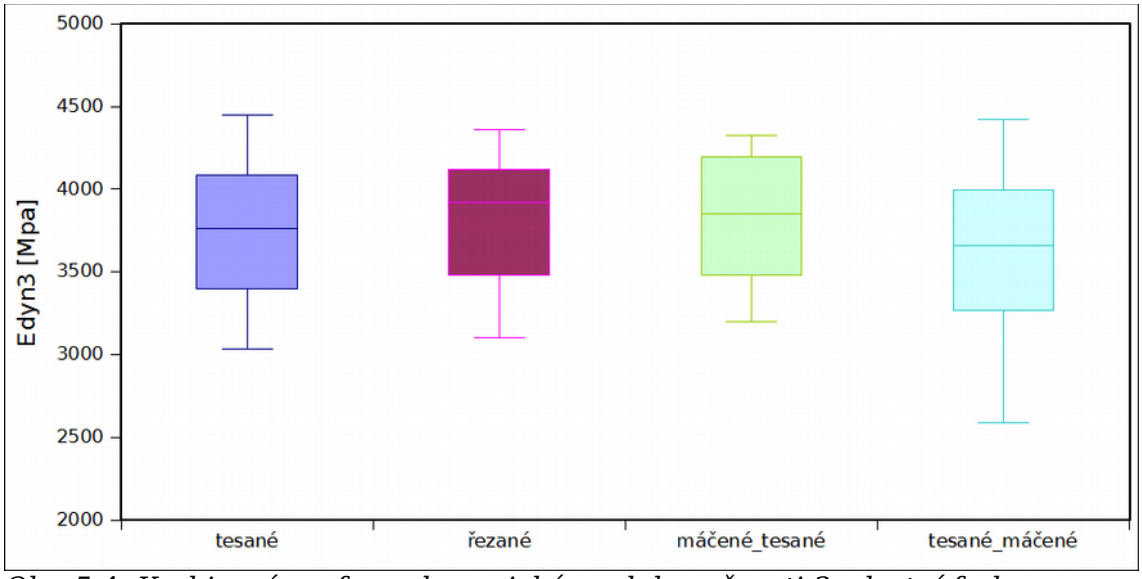
Obr. 5.3: Krabicový graf pro dynamický modul pružnosti 1. vlastní frekvence

Tabulka 5.8 uvádí výsledky modulů pružnosti ze 3. vlastní frekvence.

Tabulka 5.8: Průměrný dynamický modul pružnosti ze 3. vlastní frekvence

	E_{dyn3} [MPa]			
	tesané	řezané	máčené_tesané	tesané_máčené
střední hodnota	3746	3827	3809	3602
směrodatná odchylka	424	379	388	500
variační koeficient [-]	0,11	0,1	0,1	0,14
minimum	3034	3105	3198	2588
maximum	4448	4364	4324	4421

Dynamický modul pružnosti ze třetí vlastní frekvence je opět u všech skupin vzorků velmi podobný, menších hodnot nabývá pouze u tesaných a poté máčených nosníků. Grafické vyjádření dat je pak patrné na obrázku 5.4.



Obr. 5.4: Krabicový graf pro dynamický modul pružnosti 3. vlastní frekvence

Následující tabulky 5.9 – 5.12 obsahují výsledky F-testů a t-testů pro jednotlivé veličiny, kde

- A – tesané vzorky
- B – řezané vzorky
- C – máčené a poté tesané vzorky
- D – tesané a poté máčené vzorky

Tabulka 5.9: F-test a t-test pro rychlost šíření zvuku podél vláken

	c [m/s]					
	A x B	A x C	A x D	B x C	B x D	C x D
F-test	0,03	0,152	0,001	0,436	0,228	0,0504
významnost	p<0,05 (+)	p>0,05 (-)	p<0,05 (+)	p>0,05 (-)	p>0,05 (-)	p>0,05 (-)
t-test	0,019	0,006	0,001	0,0001	0,00002	0,095
významnost	p<0,05 (+)	p<0,05 (+)	p<0,05 (+)	p<0,05 (+)	p<0,05 (+)	p>0,05 (-)

Tabulka 5.10: F-test a t-test pro podélný dynamický modul pružnosti

	E_{dynL} [MPa]					
	A x B	A x C	A x D	B x C	B x D	C x D
F-test	0,504	0,604	0,384	0,881	0,838	0,722
významnost	p>0,05 (-)	p>0,05 (-)	p>0,05 (-)	p>0,05 (-)	p>0,05 (-)	p>0,05 (-)
t-test	0,839	0,928	0,231	0,914	0,197	0,226
významnost	p>0,05 (-)	p>0,05 (-)	p>0,05 (-)	p>0,05 (-)	p>0,05 (-)	p>0,05 (-)

Tabulka 5.11: F-test a t-test pro dynamický modul pružnosti z první vlastní frekvence

	E_{dyn1} [MPa]					
	A x B	A x C	A x D	B x C	B x D	C x D
F-test	0,467	0,563	0,562	0,881	0,882	0,999
významnost	p>0,05 (-)	p>0,05 (-)	p>0,05 (-)	p>0,05 (-)	p>0,05 (-)	p>0,05 (-)
t-test	0,566	0,556	0,074	0,999	0,033	0,030
významnost	p>0,05 (-)	p>0,05 (-)	p>0,05 (-)	p>0,05 (-)	p<0,05 (+)	p<0,05 (+)

Tabulka 5.12: F-test a t-test pro dynamický modul pružnosti ze třetí vlastní frekvence

	E_{dyn3} [MPa]					
	A x B	A x C	A x D	B x C	B x D	C x D
F-test	0,660	0,726	0,517	0,929	0,279	0,320
významnost	p>0,05 (-)	p>0,05 (-)	p>0,05 (-)	p>0,05 (-)	p>0,05 (-)	p>0,05 (-)
t-test	0,564	0,653	0,369	0,897	0,149	0,185
významnost	p>0,05 (-)	p>0,05 (-)	p>0,05 (-)	p>0,05 (-)	p>0,05 (-)	p>0,05 (-)

Tabulky 5.13 – 5.16 uvádějí výsledky korelační analýzy pro jednotlivé skupiny vzorků. Data závislosti mezi rychlostí šíření zvuku c a podélným modulem pružnosti E_{dynL} nejsou relevantní, protože rychlost zvuku byla použita k výpočtu podélného dynamického modulu pružnosti. To samé platí i pro vztah mezi podélným dynamickým modulem pružnosti E_{dynL} a hustotou ρ.

Tabulka 5.13: Korelační analýza u tesaných vzorků

	korelace - tesané				
	c	E_{dynL}	E_{dyn1}	E_{dyn3}	ρ
c	1				
E_{dynL}	~~0,31666~~	1			
E_{dyn1}	0,31186	0,93861	1		
E_{dyn3}	0,11719	0,87345	0,86925	1	
ρ	-0,15884	~~0,88442~~	0,81226	0,84797	1

Tabulka 5.14: Korelační analýza u řezaných vzorků

	korelace - řezané				
	c	E_{dynL}	E_{dyn1}	E_{dyn3}	ρ
c	1				
E_{dynL}	~~0,84614~~	1			
E_{dyn1}	0,76619	0,96680	1		
E_{dyn3}	0,45602	0,81304	0,86296	1	
ρ	0,38199	~~0,81320~~	0,84508	0,92337	1

Tabulka 5.15: Korelační analýza u máčených a poté tesaných vzorků

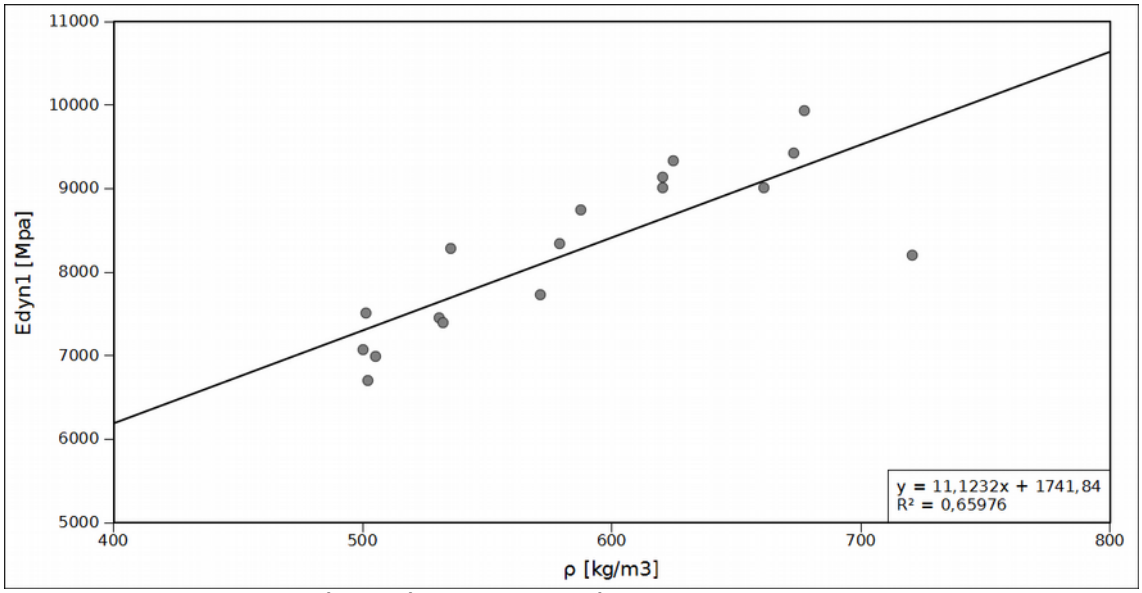
	korelace - máčené_tesané				
	c	E_{dynL}	E_{dyn1}	E_{dyn3}	ρ
c	1				
E_{dynL}	~~0,60355~~	1			
E_{dyn1}	0,52353	0,94660	1		
E_{dyn3}	0,16577	0,83343	0,87921	1	
ρ	0,01215	~~0,80166~~	0,78596	0,92643	1

Tabulka 5.16: Korelační analýza u tesaných a poté máčených vzorků

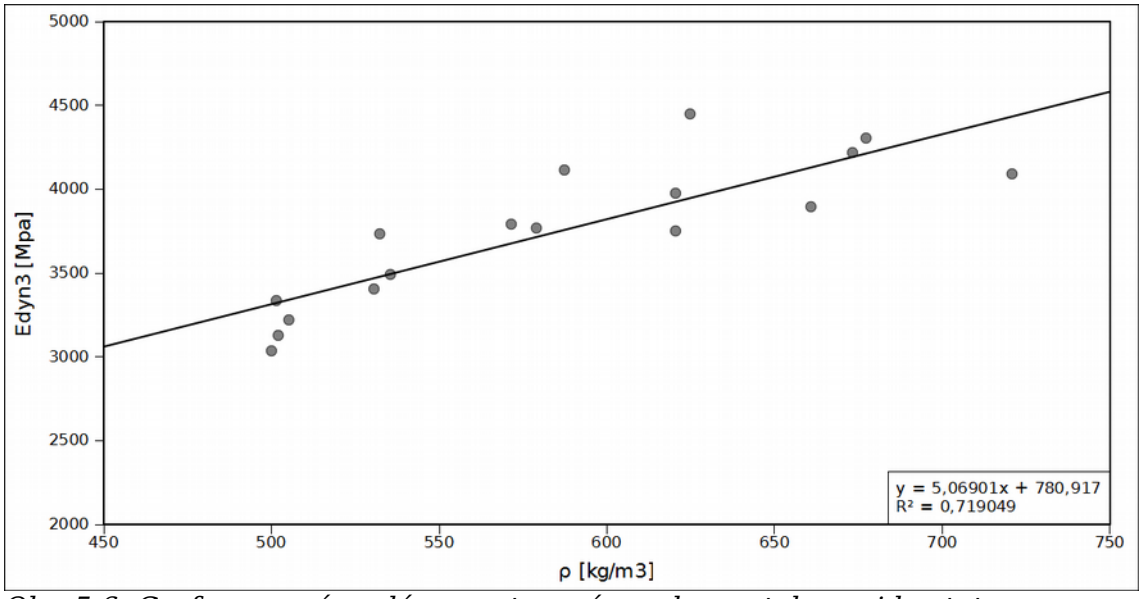
	korelace - tesané_máčené				
	c	E_{dynL}	E_{dyn1}	E_{dyn3}	ρ
c	1				
E_{dynL}	~~0,79751~~	1			
E_{dyn1}	0,69772	0,96331	1		
E_{dyn3}	0,71818	0,90238	0,93938	1	
ρ	-0,16620	~~0,45863~~	0,54330	0,40666	1

U všech skupin jsou hodnoty korelačního koeficientu podobné, dynamické moduly pružnosti závisí na hustotě, korelují i mezi sebou navzájem. Vztah mezi rychlostí šíření zvuku dřevem a dynamickým modulem pružnosti není průkazný.

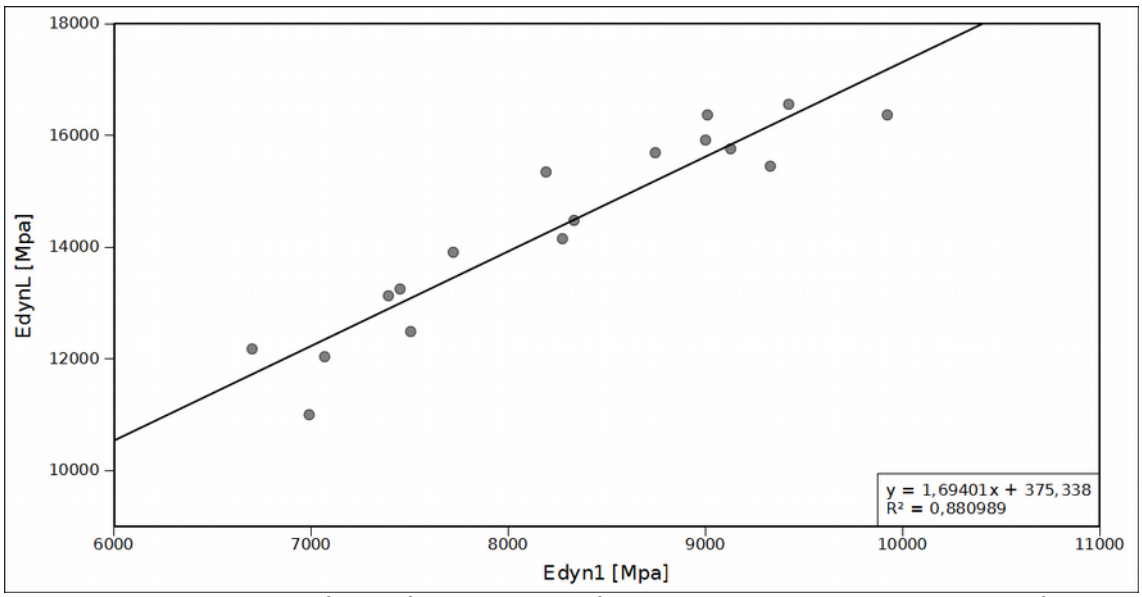
Grafy na obrázcích 5.5 – 5.8 ukazují vztah mezi sledovanými fenomény pomocí regresní analýzy.



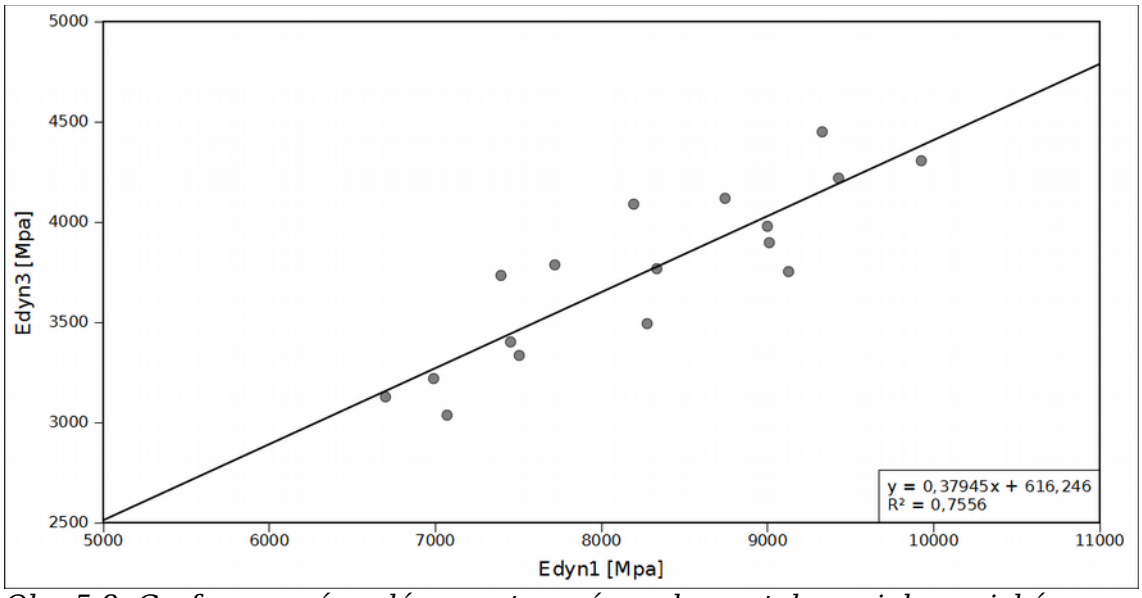
Obr. 5.5: Graf regresní analýzy pro tesané vzorky - vztah mezi hustotou a dynamickým modulem pružnosti 1. modu



Obr. 5.6: Graf regresní analýzy pro tesané vzorky - vztah mezi hustotou a dynamickým modulem pružnosti 3. modu



Obr. 5.7: Graf regresní analýzy pro tesané vzorky - vztah mezi dynamickým modulem pružnosti 1. modu a dynamickým modulem pružnosti 3. modu



Obr. 5.8: Graf regresní analýzy pro tesané vzorky - vztah mezi dynamickým modulem pružnosti 1. modu a podélným dynamickým modulem pružnosti

Regresní analýza ukázala vztah mezi sledovanými veličinami.

6. Diskuze

Nejprve se zastavíme u hustoty jednotlivých skupin vzorků. Jak se dalo předpokládat, máčené vzorky mají vlivem nasákavosti dřeva vyšší hustotu, přičemž obě máčené skupiny mají hustotu téměř shodnou. Přesná vlhkost vzorků není známá, ale na základě nomogramu, který uvádí Požgaj a kol. (1997), a průměrné hustoty smrku, kterou uvádějí Gryc a kol. (2009), je možno vlhkost odhadnout na 30 - 35 % u nemáčených vzorků a na 55 – 60 % u máčených vzorků. Vzhledem k tomu, že máčené vzorky vlivem příjmu vody nebobtnaly, lze s jistotou říci, že nemáčené vzorky měly vlhkost nad mezí hygroskopicity.

Rychlost šíření zvuku dřevem vychází částečně dle očekávání. Výsledky přibližně odpovídají hodnotám, které uvádí např. Kretchmann (2010). Nemáčenými vzorky se zvuk šíří rychleji, voda zvyšuje odpor prostředí. Řezané vzorky vykazují nejvyšší hodnoty, přestože mají nižší hustotu. Závislost rychlosti šíření zvuku dřevem na hustotě není sice nikterak veliká (Požgaj a kol. 1997), nicméně s rostoucí hustotou roste i rychlost. Je možné, že tesané vzorky obsahovaly vnitřní nehomogenity (suky, praskliny), které mohou rychlost šíření zvuku velmi ovlivnit (Gerhards 1980, 1982). T-testy prokázaly statisticky významné rozdíly mezi jednotlivými skupinami (kromě dvou máčených skupin vzorků). Rozdíly jsou patrné i z krabicového grafu na obr. 5.1. Toto je nicméně způsobeno spíše vlivem vlhkosti a anomálií vnitřní struktury dřeva, než rozdílným způsobem opracování. Výsledky rychlosti šíření zvuku pro řezané a tesané vzorky obsahovaly i řadu extrémů, což svědčí spíše ve prospěch hypotézy o poruchách vnitřní stavby.

Hodnoty dynamického modulu pružnosti 1. modu vycházejí zhruba stejně pro vzorky tesané, řezané a máčené a poté tesané. Nižší hodnoty vykazují pouze vzorky tesané a poté máčené. F-test prokázal shodnost rozptylů všech skupin vzorků, ovšem t-test zjistil statisticky významný rozdíl středních hodnot tesaných a poté máčených vzorků oproti ostatním skupinám. Jak bylo uvedeno v literárním přehledu, hodnoty dynamického modulu pružnosti získaného z příčných vibrací přibližně odpovídají hodnotám dynamického modulu získaného ohybovou zkouškou. Vycházíme-li z tohoto předpokladu, pak výsledky

nemáčených vzorků přibližně odpovídají průměrnému modulu pružnosti, který uvádí například Kretchmann (2010).

Data dynamických modulů pružnosti 3. modu nabývají zhruba polovičních hodnot v porovnání s dynamickým modulem pružnosti 1. modu. Hodnoty se ale jeví vyrovnanější co do rozptylu (F-test), tak i rozdílu středních hodnot (t-test). Zdá se tedy, že dynamický modul pružnosti 3. modu není tak citlivým ukazatelem vlastností dřeva jako dynamický modul pružnosti 1. modu. S jeho znalostí by ale mohl být dynamický modul pružnosti prvního modu odhadován, protože mezi moduly pružnosti 1. modu a 3. modu byl nalezen silný korelační vztah, kde u všech skupin vzorků byl korelační koeficient $r>0,8$.

Korelační vztahy byly pak nalezeny i mezi E_{dynL} a E_{dyn1}. Analogicky tedy existuje i korelační vztah mezi E_{dynL} a E_{dyn3}. Z naměřených dat nevyplývá žádný silný vztah mezi rychlostí šíření zvuku a dynamickými moduly pružnosti.

Korelační analýza zjistila, že s rostoucí hustotou roste i dynamický modul pružnosti, přičemž u nemáčených vzorků je tato tendence znatelnější. Výsledky korespondují s informacemi, které uvádí i Požgaj a kol. (1997).

Vliv opracování na frekvenčně-rezonanční vlastnosti nebyl prokázán. Rozdílnost výsledků způsobují spíše anomálie ve vnitřní stavbě, hustota a vlhkost dřeva. Nicméně se zdá, že výsledky analýzy dat ukazují zajímavý rozdíl mezi máčenými a poté tesanými vzorky a vzorky tesanými a poté máčenými. Odlišnosti naznačují, že rozdílné opracování povrchu může mít vliv na přijímání vody. Pro zjištění závislostí v tomto směru by bylo ale vhodné sestavit zkoušku zaměřenou na sledování těchto parametrů.

7. Závěr

Práce se zabývala vlivem opracování na akustické vlastnosti dřevěných nosníků. Byly změřeny rezonanční frekvence (podélná a dvě příčné) u čtyř skupin vzorků – tesané, řezané, máčené a poté tesané a tesané a poté máčené. Na základě rezonančních frekvencí byly vypočítány dynamické moduly pružnosti a rychlost šíření zvuku podél vláken. Byly nalezeny korelační vztahy mezi jednotlivými dynamickými moduly pružnosti (podélným, z 1. vlastní frekvence, ze 3. vlastní frekvence) a mezi dynamickými moduly pružnosti (z 1. vlastní frekvence a ze 3. vlastní frekvence) a hustotou.

K ověření shodnosti či rozdílnosti dat byly použity statistické testy – F-test a t-test. T-test prokázal statisticky významné rozdíly rychlosti šíření zvuku podél vláken u jednotlivých skupin vzorků. Tyto byly ale způsobeny rozdíly v hustotě a vlhkosti a vnitřními nehomogenitami (suky, praskliny).

Statisticky významné rozdíly mezi dynamickými moduly pružnosti jednotlivých skupin se neprokázaly. Nižší hodnoty vykazovaly pouze vzorky tesané a poté máčené, opět kvůli vlivu vnitřních defektů.

Vliv opracování na mechanické vlastnosti nosníků měřené akustickými metodami nebyl prokázán.

8. Summary

Thesis deals with the influence of processing on the acoustic properties of the wooden beams. Longitudinal and two transverse resonant frequencies were measured. There were four groups of samples - hewn, sawn, dipped and hewn, hewn and dipped. Resonance frequencies were measured (using stress wave and transverse vibration method) and the dynamic modulus of elasticity and the sound velocity along the fiber were calculated. Correlation relationships between all types of dynamic modulus of elasticity (longitudinal, 1. mode, 3. mode) and between the dynamic modulus of elasticity (1. mode, 3. mode) and density were found.

Statistical tests (F-test and t-test) were used to verify the data. T-test revealed statistically significant differences in sound velocity along the fibers of each group of samples. However, these distinctions were due to differences in density and moisture content and internal defects – knots and cracks. Tests did not find statistically significant differences between the dynamic modulus of elasticity of testing samples. Lower values of dynamic modulus of elasticity of hewn and dipped samples found by tests can be explained by internal defects.

Influence of processing on the mechanical properties of the beams measured by acoustic methods has not been demonstrated.

9. Přehled použité literatury

Alfredsen G., Lanrøy E., Militz H., *Dynamic MOE testing of wood: Influence of wood protecting agents and moisture content on ultrasonic pulse and resonant vibration*, Wood Research 51 (1), 11 – 20, 2006.

Beall F. C., *Overview of the use of ultrasonic technologiesin research on wood properties*, Wood Science and Technology, Springer, 2002.

Bendtsen A. B., Youngs R. L., *Machine Stress Rating of Wood: An Overview.,* Forest Service, Forest Product Laboratory, Madison, Wisconsin, 1981.

Bodig J., Jayne B. A., *Mechanics of wood and wood composites*, Kreiger publishing company, Malbar, Florida, 1993.

Bucur V., *Techniques for high resolution imaging of wood structure: a review.*, IOP Publishing Ltd, Meas. Sci. Technol. 14, R91–R98, 2003.

Bucur V., *Acoustics of wood,* 2nd ed., Springer, Berlin, 2010.

Divos F., *Nondestructive Testing of Wood*, University of West Hungary, Sopron, 2004.

Dunlop J.I., *Testing of Poles by Acoustic Resonance*, The University of New South Wales, Kensington, Australia 1983.

Feynman R. P., Leighton R. B., Sands M., Feynmanovy přednášky z fyziky – reviidované vidání - 1. díl, Fragment, 2013

Gandelová L, Šlezingerová J., Horáček P., Nauka o dřevě 2., nezměn. vyd. V Brně: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 2002c1996, 176 s. ISBN 978-80-7157-577-12008.

Gerhards C.C., *Effect of cross grain on stress waves in lumber.*, Research Paper, Forest Products Laboratory, Forest Service, Madison, Wisconsin, 1980.

Gerhards C.C., *Effect of knots on stress waves in lumber.*, Research Paper, Forest Products Laboratory, Forest Service, Madison, Wisconsin, 1982.

Gryc, V., Vavrčík, H., Šlezingerová, J. & P. Koňas, *Basic density of spruce wood, wood with bark, and bark of branches in locations in the Czech Republic*, TRACE Vol. 8, p. 151 – 156, 2010

Kolektiv autorů, *Ottův slovník naučný.* Dvacátýčtvrtý díl. Praha: J. Otto, 1906.

Kretchmann D. E., Wood Handbook, Chapter 05: Mechanical Properties of Wood, General Technical Report FPL-GTR-190. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory: 5-1 - 5-46. Chapter 5., 2010.

Li G., Wang X., Feng H., Wiedenbeck J., Ross R. J., Analysis of wave velocity patterns in black cherry trees and its effect on internal decay detection, Elsevier, Computers and Electronics in Agriculture 104, 32–39, 2014.

Madhoushi M., Daneshvar S., *Predicting the static modulus of elasticity in eastern cottonwood (Populus deltoides) using stress wave non-destructive testing in standing trees*, Springer, Eur. J. Wood Prod. DOI 10.1007/s00107-016-1043-0, 2016.

Machek L., Militz H., Sierra-Alvarez R., *The use od an acoustic technique to assess wood decay in laboratory soil-bed tests*, Springer, Wood Science and Technology 34, 467 – 472, 2001.

Nový, R., *Hluk a chvění*. 1.vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1995. 389 s. ISBN 80-01-01306-5.

Pirner M., Fischer O., *Dynamika ve stavební praxi*, Informační centrum ČKAIT, Praha, 2010

Požgaj, A., Chovanec D., Kurjatko S., Babiak M., *Štruktura a vlastnosti dreva,* Príroda, Bratislava, 1997.

Ross R. J., *Nondestructive Testing and Evaluation of Wood*, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, Wisconsin, 2015a.

Ross R. J., *Static Bending, Transverse Vibration, and Longitudinal Stress Wave Nondestructive Evaluation Methods*, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, Wisconsin, 2015b.

Ross R. J., Pellerin R. F., Volny N., Salsig W. W., Falk R. H., *Inspection of Timber Bridges Using Stress Wave Timing Nondestructive Evaluation Tools*, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, Wisconsin, 1999.

Ross R. J., Geske E. A., Larson G. H., Murphy J. F., *Transverse Vibration Nondestructive Testing Using a Personal Computer*, Forest Service, Forest Product Laboratory, Madison, Wisconsin, 1991.

Ross R. J., Pellerin R. F., *Nondestructive Testing for Assessing Wood Members in Structures: A Review.,* Forest Service, Forest Product Laboratory, Madison, Wisconsin, 1994.

Sarasini F., Santulli C., *Non-destructive testing (NDT) of natural fibre composites: acoustic emission technique.* University of Rome, Rome, 2014.

Senalik C. A., Schueneman G., Ross R. J., Ultrasonic-Based Nondestructive Evaluation Methods for Wood, Forest Products Laboratory, Madison, Wisconsin, 2015.

Sobue N., Kitazumi M., Identification of Power Spectrum Peaks of Vibrating Completely-Free Wood Plates and Moduli of Elasticity Mesurements, Mikuzai Gakkaishi Vol. 37, No. 1, p. 9 – 15, 1991.

Syrový, V. *Hudební akustika*. 1 vyd., Akademie múzických umění, Praha, 2003. 426 s. ISBN 80-7331-901-2.

Wang X., Ross R. J., McClellan M., Barbour R. J., Erikson J. R., Rorsman J. W., McGinnis, G. D., *Nondestructive evaluation of standing trees with a stress wave method*, Wood and Fiber Science, 33 (4), pp. 522 – 533, 2001a.

Wang X., Ross R. J., Mattson J. A., Erickson J. R., Geske E. A., Wehr M. A., *Nondestructive Evaluation Techniques for Assessing Stiffness and MOE of Small-Diameter Logs*, Forest Service, Forest Product Laboratory, Madison, Wisconsin, 2001b.

Wang X., Wiedenbeck J., Liang S., Acoustic Tomography for Decay Detection in Black Cherry Trees, Wood and Fiber Science, 41(2), pp. 127–137, 2009.

10. Seznam elektronických zdrojů

Fourierova transformace, [online] citováno 1. dubna 2017. Dostupné na World Wide Web
<https://cs.wikipedia.org/wiki/Fourierova_transformace#Diskr.C3.A9tn.C3.AD_Fourierova_transformace>

FFT Spectrum Analyzer, [online] citováno 1. dubna 2017. Dostupné na World Wide Web
<http://www.radio-electronics.com/info/t_and_m/spectrum_analyser/fft-analyzer.php>

Seznam obrázků

Obr. 3.1: Časový zápis periodického kmitavého pohybu

Obr. 3.2: Fázový posun kmitavého pohybu

Obr. 3.3: Schéma tlumeného kmitání

Obr. 3.4: Schéma nuceného kmitání

Obr. 3.5: V ideálním prostřední nabývá amplituda maxima při fázovém posunu 90°

Obr. 3.6: Schéma šíření příčné vlny

Obr. 3.7: Schéma šíření podélné vlny

Obr. 3.8: Schéma skládání dvou vln se stejnou amplitudou i frekvencí ale rozdílnou fází

Obr. 3.9: Schéma prvních čtyř modů vlastních frekvencí

Obr. 3.10: Mody kmitání desek

Obr. 3.11: Dělení nedestruktivního testování podle Rosse (2015a)

Obr. 3.12: Schéma konfigurace ohybové zkoušky

Obr. 3.13: Alternativní konfigurace ohybové zkoušky

Obr. 3.14: Vztah mezi dynamickým E_d a statickým E_s modulem pružnosti pro smrk, jedli a borovici

Obr. 3.15: Degradace dřeva vlivem působení půdy

Obr. 3.16: Degradace ošetřeného dřeva

Obr. 3.17: Šíření podélné tlakové vlny

Obr. 3.18: Schéma šíření tlakové vlny

Obr. 3.19: Vliv odklonu vláken na rychlost šíření podélné vlny

Obr. 3.20: Korelace mezi hodnotami získanými z rostoucího dřeva a laboratorně změřenými vzorky

Obr. 3.21: Princip ultrazvukové metody „Pulse Echo“

Obr. 3.22: Princip ultrazvukové metody „Through Transmission“

Obr. 3.23: Princip ultrazvukové metody „Angle Beam“

Obr. 3.24: Vztah mezi modulem pružnosti získaným metodou rezonančních frekvencí a modulem pružnosti získaným měřením rychlosti ultrazvukových vln

Obr. 3.25: Vizualizace průřezu kmene na základě ultrazvukové tomografie

Obr. 3.26: Vizualizace zdravého kmene stromu na základě analýzy rychlostí tlakových vln

Obr. 3.27: Vizualizace poškozeného kmene stromu na základě analýzy rychlostí tlakových vln

Obr. 4.1: Zkoušené SM trámy

Obr. 4.2: Tesaný trám

Obr. 4.3: Schéma měření podélné frekvence

Obr. 4.4: Schéma měření 1. vlastní frekvence

Obr. 4.5: Tvary vibračních modů volného kmitání prismatického tělesa

Obr. 4.6: Čelo zkoušeného trámu

Obr. 4.7: FFT analyzér Advanced Spectrum Analyzer PRO

Obr. 5.1: Krabicový graf rychlosti šíření zvuku podél vláken

Obr. 5.2: Krabicový graf pro podélný dynamický modul pružnosti

Obr. 5.3: Krabicový graf pro dynamický modul pružnosti 1. vlastní frekvence

Obr. 5.4: Krabicový graf pro dynamický modul pružnosti 3. vlastní frekvence

Obr. 5.5: Graf regresní analýzy pro tesané vzorky - vztah mezi hustotou a dynamickým modulem pružnosti 1. modu

Obr. 5.6: Graf regresní analýzy pro tesané vzorky - vztah mezi hustotou a dynamickým modulem pružnosti 3. modu

Obr. 5.7: Graf regresní analýzy pro tesané vzorky - vztah mezi dynamickým modulem pružnosti 1. modu a dynamickým modulem pružnosti 3. modu

Obr. 5.8: Graf regresní analýzy pro tesané vzorky - vztah mezi dynamickým modulem pružnosti 1. modu a podélným dynamickým modulem pružnosti

Seznam tabulek

Tabulka 3.1: Korelace mezi dynamickým modulem pružnosti získaným na základě měření tlakových vln a statickým modulem pružnosti

Tabulka 3.2: Rychlost šíření tlakové vlny z různých výzkumů pro různé druhy dřev

Tabulka 3.3: Korelační vztah mezi statickým modulem pružnosti z ohybové zkoušky a dynamickým modulem pružnosti získaný měřením rychlosti tlakových vln u různých průměrů stromu v různých částech kmene

Tabulka 5.1: Průměrná hustota

Tabulka 5.2: Průměrná podélná frekvence

Tabulka 5.3: Průměrná vlastní frekvence 1. modu

Tabulka 5.4: Průměrná vlastní frekvence 3. modu

Tabulka 5.5: Průměrná rychlost šíření zvuku podél vláken

Tabulka 5.6: Průměrný dynamický modul pružnosti podél vláken

Tabulka 5.7: Průměrný dynamický modul pružnosti z 1. vlastní frekvence

Tabulka 5.8: Průměrný dynamický modul pružnosti ze 3. vlastní frekvence

Tabulka 5.9: F-test a t-test pro rychlost šíření zvuku podél vláken

Tabulka 5.10: F-test a t-test pro podélný dynamický modul pružnosti

Tabulka 5.11: F-test a t-test pro dynamický modul pružnosti z první vlastní frekvence

Tabulka 5.12: F-test a t-test pro dynamický modul pružnosti ze třetí vlastní frekvence

Tabulka 5.13: Korelační analýza u tesaných vzorků

Tabulka 5.14: Korelační analýza u řezaných vzorků

Tabulka 5.15: Korelační analýza u máčených a poté tesaných vzorků

Tabulka 5.16: Korelační analýza u tesaných a poté máčených vzorků