

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta lesnická a dřevařská

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů



**Potenciál nedestruktivních metod pro hodnocení
pevnostních charakteristik dřeva douglasky**

Bakalářská práce

Autor: Jan Bárta

Vedoucí práce: doc. Ing. Aleš Zeidler, Ph.D.

2020

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta lesnická a dřevařská

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jan Bárta

Dřevařství
Dřevařství

Název práce

Potenciál nedestruktivních metod pro hodnocení pevnostních charakteristik dřeva douglasky

Název anglicky

Potential of nondestructive methods for strength evaluation of Douglas-fir wood

Cíle práce

Cílem práce je posoudit spolehlivost nedestruktivních metod využívajících akustické vlastnosti dřeva pro stanovení pevnostních a pružnostních charakteristik dřeva douglasky (*Pseudotsuga menziesii* /MIRBEL/FRANCO). Dále zhodnotit vliv dalších faktorů ovlivňujících variabilitu zkoumaných vlastností.

Metodika

- 1) Zpracovat literární rešerši o nedestruktivních metodách, posuzovaných vlastnostech a hodnocené dřevině.
- 2) Na normalizovaných zkušebních tělesech douglasky a vybraných domácích jehličnatých dřevin stanovit dynamický modul pružnosti, statický modul pružnosti a pevnost v ohybu a posoudit míru vzájemné závislosti mezi těmito vlastnostmi.
- 3) Dále zhodnotit vliv hustoty, případně dalších faktorů, na hodnocené vlastnosti.
- 4) Výsledky statisticky zpracovat a interpretovat v textové, tabelární a grafické podobě.

Doporučený rozsah práce

30 – 40 stran textu

Klíčová slova

dřevo, douglaska, pevnost, nedestruktivní metody

Doporučené zdroje informací

- BUCUR, V. Acoustics of Wood. 2. vyd. Berlin: Springer Verlag, 2006. 393 s.
- BUCUR, V. Nondestructive Characterization and Imaging of Wood. Springer Science & Business Media, 2013. 354 s.
- KLOIBER, M. Nedestruktivní zjišťování vlastností dřeva. Brno: MZLU, 2007. 105 s.
- POŽGAJ, A., CHOVANEC, D., KURJATKO, S., BABIAK, M. Štruktúra a vlastnosti dreva. 2. vydání. Bratislava: Príroda, 1997. 485 s.
- RAJČAN, E., DANIHELOVÁ, A., URGELA, S. Aplikácia akustiky při štúdiu vlastností dreva. Zvolen: TU, 1998. 63 s.
- TSOUMIS, G. Science and technology of wood – structure, properties, utilization. New York: Chapman and Hall, 1991. 497 s.
- WAGENFÜHR, R. Holzatlas. Leipzig: Fachbuchverlag, 2000. 707 s.
-

Předběžný termín obhajoby

2017/18 LS – FLD

Vedoucí práce

doc. Ing. Aleš Zeidler, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra základního zpracování dřeva

Konzultant

Ing. Vlastimil Borůvka, Ph.D.

Elektronicky schváleno dne 20. 11. 2017

doc. Ing. Milan Gaff, PhD.

Vedoucí ústavu

Elektronicky schváleno dne 10. 2. 2018

prof. Ing. Marek Turčáni, PhD.

Děkan

V Praze dne 17. 02. 2020

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci na téma Potenciál nedestruktivních metod pro hodnocení pevnostních charakteristik dřeva douglasky vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Aleše Zeidlera, Ph.D. a použil jsem jen prameny, které uvádím v seznamu použitých zdrojů.

Jsem si vědom, že zveřejněním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách v platném znění, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Praze dne

Podpis autora

Poděkování

Rád bych poděkoval doc. Ing. Alešovi Zeidlerovi, Ph.D. za vstřícnost a trpělivou pomoc při zpracování této práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Vlastimilu Borůvkovi, Ph.D. a Ing. Tomáši Holečkovi za cenné rady a pomoc při měření a vyhodnocování výsledků. Děkuji hraběnce Kristině Colloredo-Mansfeldové za poskytnutí materiálu.

V neposlední řadě bych rád poděkoval své rodině za trpělivost a podporu při studiu.

Abstrakt:

Tato práce se zabývá potenciálem nedestruktivních metod využívajících akustické vlastnosti dřeva pro měření pevnostních a pružnostních charakteristik dřeva douglasky. V práci byly nedestruktivními metodami, ultrazvukem a rezonanční metodou, měřeny dynamické moduly pružnosti a pro srovnání byl měřen statický modul pružnosti v ohybu a pevnost v ohybu. Měření probíhalo na vzorcích dřeva douglasky tisolisté (*Pseudotsuga menziesii*), smrku ztepilého (*Picea abies*) a modřínu opadavého (*Larix decidua*). Všechny stromy pocházely ze stejné lokality z oblasti Opočna. Následně byla posouzena vzájemná závislost měřených charakteristik a vliv dalších faktorů na výsledky měření, především hustoty, a pozice ve kmeni. Mezi dynamickým modulem pružnosti měřeným ultrazvukem a statickým modulem pružnosti v ohybu byla zjištěna silná závislost, což potvrzuje spolehlivost tohoto nedestruktivního měření. Nebyl zjištěn významný vliv hustoty na dynamický modul pružnosti. Významný vliv na dynamický modul pružnosti měla pozice vzorku ve kmeni. Výsledky byly porovnány s literaturou a vzájemně mezi měřenými dřevinami. Douglaska dosáhla lepších výsledků než smrk ve všech měřených charakteristikách, kromě statického modulu pružnosti v ohybu. Modřín předčil svými výsledky douglasku ve všech měřeních kromě pevnosti v ohybu.

Klíčová slova: dřevo, douglaska, pevnost, nedestruktivní metody

Abstract:

This thesis focuses on the potential of nondestructive methods based on acoustic properties of wood for strength evaluation of Douglas fir wood. The nondestructive methods used for dynamic MOE measurement in this work were ultrasound, and resonance methods and for comparison, the static MOE and bending strength were determined by three-point bending test. Measurements were done on Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii*), Norway spruce (*Picea abies*) and European larch (*Larix decidua*) wood samples. All the trees came from the same region in Opočno. The correlation among these measured characteristics was done with the focus on other influencing factors, such as density and horizontal stem position of samples. The static

and dynamic MOE measured with ultrasound method proved to have good correlation, which proves the reliability of the ultrasound method. The effect of density on dynamic MOE was not confirmed. The stem position showed significant effect on the results of dynamic MOE. The results were compared with literature and between the different tree species. Douglas fir had better results than Norway spruce in all measured characteristics, except for static MOE. Larch showed better results than Douglas fir in all areas, except for bending strength.

Keywords: wood, douglas fir, strength, nondestructive methods

Obsah

1	Úvod.....	12
2	Cíl práce	12
3	Literární rešerše.....	13
3.1	Akustické vlastnosti dřeva	13
3.1.1	Rychlost šíření vlny ve dřevě.....	14
3.2	Nedestruktivní metody měření vlastností dřeva.....	15
3.3	Smyslové metody	17
3.4	Přístrojové metody zkoumání dřeva.....	17
3.4.1	Akustické metody.....	17
3.4.1.2	Metoda akustické emise (AE)	17
3.4.1.3	Ultrazvuková metoda (UZ)	17
3.4.1.4	Rezonanční (vibrační) metoda	18
3.4.1.5	Podélná rezonanční metoda.....	19
3.4.1.6	Pitch and Catch	20
3.4.1.7	Akusticko-ultrazvuková metoda	21
3.4.1.8	Stress wave.....	21
3.6	Pevnostní a pružnostní charakteristiky.....	22
3.6.1	Pevnost dřeva	22
3.6.2	Pružnost dřeva.....	22
3.6.2.1	Modul pružnosti	22
3.6.3	Pevnost v ohybu	23
3.6.3.1	Statický modul pružnosti v ohybu	24
3.6.3.2	Dynamický modul pružnosti.....	24
3.7	Další faktory ovlivňující zkoumané vlastnosti.....	24
3.7.1	Vlhkost	24
3.7.2	Hustota	25
3.7.3	Vliv pozice vzorku ve kmeni	26
3.7.4	Vliv světových stran na posuzované vlastnosti.....	26
3.8	Douglaska tisolistá	26
3.8.1	Dřevo douglasky	27
3.8.2	Názory na pěstování douglasky v ČR.....	27
3.9	Srovnání testovaných dřevin.....	28
4	Metodika	30
4.1	Výběr a příprava vzorků.....	30
4.2	Postup měření.....	31
4.2.1	Ultrazvuková nedestruktivní metoda	31
4.2.2	Rezonanční nedestruktivní metoda	32
4.2.3	Stanovení statického modulu pružnosti a pevnosti v ohybu	34
4.2.3.1	Statický modul pružnosti	34
4.2.3.2	Pevnost v ohybu	35
5	Výsledky a diskuse.....	36
5.1	Hustota	36

5.2	Dynamický modul pružnosti.....	38
5.3	Statický modul pružnosti	39
5.4	Pevnost v ohybu	41
5.5	Vzájemná závislost a vyhodnocení měřených charakteristik.....	42
5.6	Vliv hustoty na ostatní měřené veličiny.....	47
5.7	Porovnání rychlostí vlny ve dřevě u UZ a rezonanční metody.....	48
5.8	Vliv pozice ve kmeni	48
5.6	Vliv světových stran.....	50
6	Závěr	51
7.	Použitá literatura	52
7.1	Seznam internetových zdrojů.....	58

Seznam obrázků

Obrázek 1 Schéma možností měření metodou UZ (KLOIBER 2007)	18
Obrázek 2 Schéma podélné rezonanční metody (SENALIK ET AL. 2014)	19
Obrázek 3 Útlum zvukové vlny (SENALIK ET AL. 2014)	19
Obrázek 4 Schéma metody Pitch and Catch (SENALIK ET AL. 2014)	21
Obrázek 5 Princip metody Stress wave (KASAL et al. 2011).....	22
Obrázek 6 Zatížení dřeva v ohybu. a) kolmo na vlákna v radiálním směru; b) kolmo na osu tělesa; c) podél vláken (POŽGAJ et al. 1997).....	23
Obrázek 7 Postup měření metodou napříč vláken.....	33
Obrázek 8 Postup měření metodou podél vláken.....	34
Obrázek 9 Schéma trojbodového ohybu	35

Seznam tabulek

Tabulka 1 Statistika výsledků měření hustoty	36
Tabulka 2 Srovnání naměřených hodnot hustoty DG s literaturou.....	37
Tabulka 3 Srovnání naměřených hodnot hustoty MD a SM s literaturou	37
Tabulka 4 Statistika výsledků MOEdu všech tří dřevin	38
Tabulka 5 Srovnání výsledků MOEdu douglasky s hodnotami v literatuře	39
Tabulka 6 Statistika výsledků MOEdvl a MOEdvt všech tří dřevin.....	39
Tabulka 7 Průměrné hodnoty MOEs douglasky ve srovnání s literaturou	40
Tabulka 8 Statistika výsledků MOEs všech tří dřevin.....	40
Tabulka 9 Průměrné hodnoty MOEs pro smrk a modřín ve srovnání s literaturou	40
Tabulka 10 Srovnání naměřených hodnot pevnosti v ohybu douglasky s literaturou	41
Tabulka 11 Statistika výsledků pevnosti v ohybu všech tří dřevin.....	41
Tabulka 12 Srovnání naměřených hodnot pevnosti v ohybu MD a SM s literaturou.	41
Tabulka 13 Korelační koeficienty pro závislost MOEdu na ostatní měřených modulech	45
Tabulka 14 Porovnání průměrných hodnot MOEdvl a MOEdvt.....	46
Tabulka 15 Výsledky hustoty pevnosti v ohybu a jednotlivých modulů pružnosti pro všechny dřeviny	46
Tabulka 16 Vliv hustoty na měřené MOEs a MOEd	47
Tabulka 17 Průměrné hodnoty rychlosti vlny pro UZ a rezonanční metodu a jejich korelace	48
Tabulka 18 Vývoj MOEdu rychlosti vlny a pevnosti v ohybu vzhledem k pozici ve kmeni.....	49
Tabulka 19 Průměrné hodnoty hustoty, MOEs, MOEdu a rychlosti vlny vzhledem ke světové straně	50

Seznam grafů

Graf 1 Hustoty jednotlivých dřevin v kg.m-3	38
Graf 2 Výsledky pevnosti v ohybu jednotlivých dřevin	42
Graf 3 Korelace MOEs a MOEdu DG	43

Graf 4 Korelace MOEs a MOEdu SM	44
Graf 5 Korelace MOEdu a MOEdvl, MOEdvt DG.....	45
Graf 6 Korelace jednotlivých NDM a hustotě pro DG	48

Seznam zkratek

AE – metoda akustické emise

AU – akusticko-ultrazvuková metoda

DG – douglaska tisolistá

MOE – modul pružnosti (MPa)

MD – modřín opadavý

MOEd – dynamický modul pružnosti (MPa)

MOEdu – dynamický modul pružnosti měřený ultrazvukovou metodou (MPa)

MOEdvl – dynamický modul pružnosti měřený podélnou rezonanční metodou (MPa)

MOEdvt – dynamický modul pružnosti měřený rezonanční metodou napříč vláken (MPa)

MOEs – statický modul pružnosti

NDM – nedestruktivní metody

SM – smrk ztepilý

UZ – ultrazvuk

1 Úvod

Hlavní potenciál nedestruktivních metod využívající akustické vlastnosti dřeva spočívá v možnosti měření bez nutnosti zásahu do dřeva, dřevěného prvku nebo konstrukce a bez nutnosti ovlivnit jejich funkci a vlastnosti. Na základě nedestruktivního zkoušení lze spolehlivě odhadnout mechanické vlastnosti dřeva.

Nedestruktivní metody nacházejí stále větší uplatnění zejména díky nízké ceně a rychlosti provedení zkoušek.

Tato bakalářská práce se zabývá potenciálem nedestruktivního měření pro měření pevnostních a pružnostních charakteristik dřeva douglasky. Douglaska tisolistá (*Pseudotsuga menziesii*) se jeví jako dřevina s vysokým potenciálem pro české lesní hospodaření a pro dřevařský průmysl. Práce se zabývá srovnáním výsledků douglasky s výsledky domácích dřevin, smrku ztepilého a modřínu opadavého.

2 Cíl práce

Cílem práce je posoudit spolehlivost nedestruktivních metod využívajících akustické vlastnosti dřeva pro stanovení pevnostních a pružnostních charakteristik dřev a douglasky (*Pseudotsuga menziesii*). Dále zhodnotit vliv dalších faktorů ovlivňujících variabilitu zkoumaných vlastností.

3 Literární rešerše

3.1 Akustické vlastnosti dřeva

Zvuk je charakterizován jako mechanické vlnění prostředí. Toto vlnění vnímáme sluchovým orgánem. Pro člověka je slyšitelný zvuk s frekvenčním rozsahem od 16 do 20 000 Hz. Zvuk se může šířit jen v hmotném prostředí, protože se šíří vzájemným silovým působením molekul. K charakterizování zvuku jako mechanického vlnění používáme vlnovou délku, frekvenci, rychlost šíření zvuku a amplitudu vlnění. Rychlost zvuku lze vypočítat podle tohoto vzorce, kde c je rychlost, f je frekvence a λ vlnová délka (GANDELOVÁ et al. 2014).

$$c = \lambda \cdot f [m \cdot s^{-1}]$$

Když na dřevo působí vnější periodické síly, dochází ke vzniku vibrací. Tyto vibrace závisí na frekvenci síly působící na dřevo. „Při určitých frekvencích dřevo reaguje s maximální amplitudou vynucené vibrace. Tyto frekvence nazýváme rezonančními nebo vlastními frekvencemi dřeva“ (GANDELOVÁ et al. 2014). Pro dřevo existují tři druhy vibrací: podélné, příčné a torzní (BUCUR 2006). Když vezmeme těleso jednoduchého tvaru, můžeme za pomoci těchto rezonančních frekvencí určit některé vlastnosti dřeva. Těmi jsou modul pružnosti, akustická konstanta, nebo logaritmický dekrement útlumu (GANDELOVÁ et al. 2014).

Pokud na těleso přestane působit vnější síla, která způsobovala vibrace, začne těleso přicházet o energii. Začne se rozptylovat vlivem radiace zvuku a vnějšího tření. Amplitudy vibračních cyklů začnou klesat. Logaritmický dekrement útlumu lze poté vypočítat jako poměr těchto amplitud (SCHWARZER 2014).

Další využívanou vlastností dřeva je schopnost zesilovat zvuk. Když dochází ke kmitání dřeva, tak se část této mechanické energie mění na zvukovou energii a část na teplo, které vzniká třením. Rezonanční vlastnosti udává akustická konstanta K . Nejvyšších hodnot u nás dosahuje rezonanční smrk s akustickou konstantou $K > 12 (m^4 \cdot kg^{-1} \cdot s^{-1})$. Jehličnany mají obecně lepší rezonanční vlastnosti. Tyto vlastnosti jsou ovlivněny především hustotou, množstvím vad, podmínkami růstu. Dalšími

dřevinami s dobrými akustickými vlastnostmi jsou jedle, borovice, jasan, buk, javor a bříza (GANDELOVÁ et al. 2014). V současnosti zásoby opravdu kvalitního smrku bohužel ubývají, zejména z důvodu měnícího se způsobu lesního hospodaření a klimatu (www.silvarium.cz).

3.1.1 Rychlost šíření vlny ve dřevě

Obecně platí, že rychlost šíření zvukové vlny ve dřevě se odvíjí především od aktuálního stavu materiálu. Je závislá na hustotě, druhu dřeva, stavbě dřeva, tuhosti a také na vnějších podmínkách, jako například teplotě, či vlhkosti. Když vlna prostupuje dřevem, hledá si přitom nejsnazší cestu, tedy obchází vady, jako jsou například suky nebo trhliny, čímž dochází ke snížení její rychlosti (KLOIBER 2007).

Pokud chceme vypočítat rychlost zvuku ve dřevě, můžeme použít tento zjednodušený vztah (GANDELOVÁ et al. 2014).

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} [m \cdot s^{-1}]$$

c – rychlost zvuku [$m \cdot s^{-1}$]

E – modul pružnosti [MPa]

ρ – hustota [$kg \cdot m^{-3}$]

Rychlost zvuku ve dřevě je tedy závislá na modulu pružnosti a hustotě. Mělo by tedy platit, že s rostoucím modulem pružnosti a klesající hustotou se rychlost zvyšuje. Rychlost zvuku ve dřevě se tedy odvíjí velkou mírou od druhu dřeviny (GANDELOVÁ et al. 2014).

Bucur uvádí průměrnou rychlost šíření ultrazvukové vlny ve dřevě podél vláken 5000–6000 $m \cdot s^{-1}$, při vlhkosti 12 %. Pro směr napříč vláken je rychlost nižší 1000–2000 $m \cdot s^{-1}$. Rychlost v radiálním směru je přibližně o 50 % větší než v tangenciálním (BUCUR 2006). Z našich dřevin například smrk o průměrné hustotě 470 $kg \cdot m^{-3}$ a vlhkosti 12 % dosahuje při měření rychlosti vlny ve dřevě rychlosti 4790 $m \cdot s^{-1}$ (KOLLMANN & COTÉ 1968).

Závislost rychlosti vlny ve dřevě na hustotě je malá a v praxi spíše nevyužitelná (GANDELOVÁ et al. 2014). Ilic tvrdí, že pro rychlost vlny a hustoty při měření rychlosti vlny podél vláken neexistuje žádná závislost (ILIC 2003).

Významný vliv na rychlost vlny ve dřevě má degradace dřeva. Takové poškození výrazným způsobem snižuje rychlost průchodu vlny (FEIO 2005).

3.2 Nedestruktivní metody měření vlastností dřeva

Nedestruktivní metody měření (NDM) jsou takové metody, které definují fyzikální a mechanické vlastnosti materiálu, aniž by ovlivňovaly jeho funkci. Jejich cílem je zjistit vlastnosti, použitelnost a stav zkoušeného materiálu (ROSS & PELLERIN 1994).

V oblasti dřevařství byly tyto metody vyvíjeny za účelem ohodnocení konstrukčních materiálů, například zjišťování pevnosti dřeva (GALLIGAN & OTHERS 1977).

Další oblastí využití NDM se časem stalo posuzování stavebních konstrukcí. NDM totiž nabízí možnost testovat konstrukci bez nutnosti invazivního zásahu. NDM jsou v tomto ohledu podstatně spolehlivější než často využívané smyslové ohodnocení, založené většinou na vizuálním ohodnocení. Tyto diagnostické metody mají možnost doplnit smyslové ohodnocení a výsledky znatelně zpřesnit. Při NDM není potřeba zasahovat do stavby, navíc se jedná o metody rychle proveditelné a poměrně levné.

Hlavní využití nachází NDM u historicky cenných konstrukcí, kde především pomáhají zjistit stabilitu dřevěných prvků, biotické nebo abiotické poškození dřeva.

Další příklad využití je v městských zástavbách, parcích nebo třeba alejích, kde je potřeba odhadnout stav stojícího stromu (KLOIBER 2007).

V současnosti probíhají další výzkumy, především za účelem zpřesnění metod, zjištění závislostí postupů například na hustotě, vlhkosti, nebo teplotě. Jako vhodné využití se jeví také zkoumání stojících stromků v pěstebních zařízeních, za účelem zefektivnění pěstování (ŠKORPÍK et al. 2018).

Kloiber uvádí tyto oblasti použití NDM: zjištění vlastností dřeva, určení rozsahu poškození, určení typu poškození, určení příčiny poškození a vypracování návrhu péče a oprav (KLOIBER 2007). FPL uvádí tyto použití NDM: kontrolu kvality, kontrolu dřevařských výrobních procesů, nebo třídění dřeva. Dále uvádí jejich využití u dřevěných staveb a stavebních komponentů, nebo jako nástroj pravidelné kontroly např. u dřevěných sloupů, nebo třeba důlních výztuží (FALK et al. 1990).

NDM jsou často používány v kombinaci s vizuálními, ale i s destruktivními metodami. V současnosti jsou také vyvíjeny modely, které se snaží stanovit postupy, ve kterých kombinace těchto různých metod dosahují nejlepších výsledků.

V oblasti akustických metod neexistuje jednoznačně daná terminologie a kategorizace. Každý autor nabízí jiné rozdělení metod (KLOIBER 2007). Mezi metody používané se řadí ultrazvuk, rezonanční metoda, stress wave, akusticko-ultrazvuková metoda a další. Tyto metody ale fungují téměř všechny na principu měření průchodu zvukové vlny materiálem. Liší se např. používanými frekvencemi a měřicími přístroji. Většina běžně používaných metod využívá dvou senzorů, pomocí kterých zjišťují rychlost vlny (FALK et al. 1990).

Byla zjištěna významná korelace mezi statickými moduly pružnosti dřeva a dynamickými moduly pružnosti (LAGAŇA & ROHANOVÁ 2014; FALK et al. 1990; VALÁŠKOVÁ 2015; POŽGAJ et al. 1997). Těto závislosti lze využít při potřebě nedestruktivního zkoušení dřeva, protože lze pomocí dynamického modulu pružnosti odhadnout modul statický, bez nutnosti destruktivního zkoušení. Srovnáním nedestruktivního a destruktivního měření, přesněji srovnáním statického a dynamického modulu pružnosti a jejich vzájemnou závislostí, se zabývalo již několik autorů (VAFAI et al. 1976; LIU et al. 2014, BUČAR & BUČAR 2011; ZHANG et al. 2009; HOLEČEK et al. 2017). Dynamický modul pružnosti měřený na základě akustických vlastností dřeva se jeví jako vhodná metoda zjištění vlastností, které by jinak vyžadovaly destruktivní zkoušky.

3.3 Smyslové metody

Mezi nejvíce používané metody posuzování stavu dřeva patří vizuální hodnocení, čichové, hmatové a sluchové metody. Tyto metody, především metoda vizuálního hodnocení, stále převažují v praxi. Nejsou ovšem zdaleka tak spolehlivé. Lze jimi určit především dřevinu, typ konstrukce, viditelné poškození. Pomocí vizuálního hodnocení můžeme například identifikovat působení biologických škůdců, nebo například uvolnění, nebo deformaci konstrukčních prvků. Existují i normy zabývající se problematikou vizuálního hodnocení, ale jsou myšleny především pro řezivo a zkušební tělíska, nikoliv pro prvky v konstrukcích (KLOIBER 2007).

3.4 Přístrojové metody zkoumání dřeva

3.4.1 Akustické metody

Akustické metody NDM využívají zvuk k určení pevnostních a pružnostních charakteristik dřeva. V dostupné literatuře neexistuje přesně dané dělení těchto metod. Lze je rozdělit podle způsobu jakým vzniká zvuk ve dřevě, podle způsobu měření, nebo také podle frekvence zvuku.

3.4.1.2 Metoda akustické emise (AE)

Tato metoda spočívá ve vlastnosti dřeva vytvářet při zatížení zvukové impulzy o vysoké frekvenci. Tyto impulzy vznikají při vzniku poruchy ve stavbě dřeva. Testy probíhají tak, že je materiál vystavený zatížení a přístroje měří množství a původ akustických emisí (FALK et al. 1990). Beall a Wilcox (BEALL & WILCOX 1987) tuto metodu používali při zjišťování hniloby ve dřevě.

3.4.1.3 Ultrazvuková metoda (UZ)

Měření ultrazvukem je v případě dřevěných konstrukcí nejužívanější metodou. Spočívá v měření rychlosti ultrazvukové vlny ve dřevě. Mechanické vlnění ultrazvuku dosahuje hodnoty přes 16 000 Hz (ŠKVOR 2012), přes 20 000 Hz (ROSS & PELLERIN 2002). Testovaný materiál je při testování buďto ponořen do kapaliny (vhodné pro laboratorní podmínky), nebo jsou na něj přímo přiloženy senzory.

Při měření jeden ze senzorů vyše signál a druhý jej zachytí. Takto lze snadno změřit čas průchodu vlny vzorkem s vysokou přesností, Bucur uvádí chybu méně než 1 % (BUCUR 2006). Metoda je flexibilní a jeví se jako nejvhodnější metoda testování dřevěných materiálů. Testují se pomocí ní stromy, kulatina, drobné zkušební vzorky, ale i dřevěné kompozity. Největší předností této metody je, že při ní nedochází vůbec k žádnému poškození a lze ji opakovat na stejném vzorku (BUCUR 2006).

Díky zjištění rychlosti vlny ve dřevě můžeme s pomocí hustoty vypočítat dynamický modul pružnosti pomocí následujícího vzorce (BUCUR 2006):

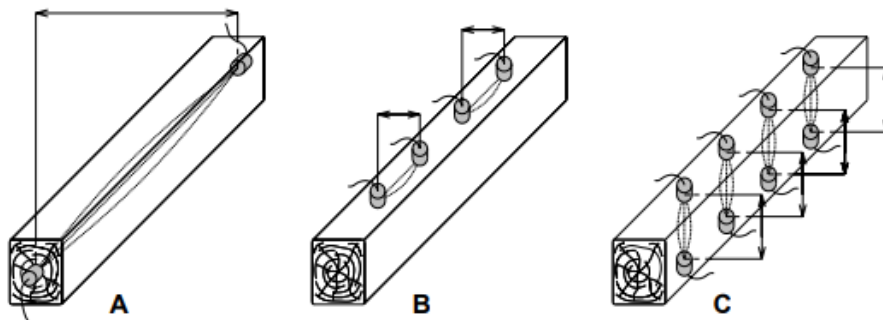
$$MOE_{du} = v^2 \rho \text{ [Pa]}$$

MOE_{du} – dynamický modul pružnosti pro UZ [Pa]

v – rychlost vlny [m.s⁻¹]

ρ – hustota [kg.m⁻³]

Obrázek 1 zobrazuje možnosti měření pomocí UZ. V této práci byla použita metoda B, tedy nepřímé měření podél vláken, při které nejsou senzory přiloženy naproti sobě na koncích tělesa, ale nacházejí se na stejné ploše.



Obrázek 1 Schéma možností měření metodou UZ (KLOIBER 2007)

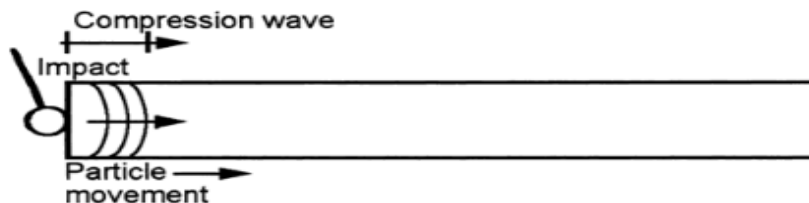
3.4.1.4 Rezonanční (vibrační) metoda

V případě této metody probíhá měření na tělese daných rozměrů. Každé těleso vytváří vibrace o určitých frekvencích. Tyto frekvence jsou závislé na stavbě a vlastnostech tělesa, především na hustotě a dynamickém modulu pružnosti (HASSAN 2013).

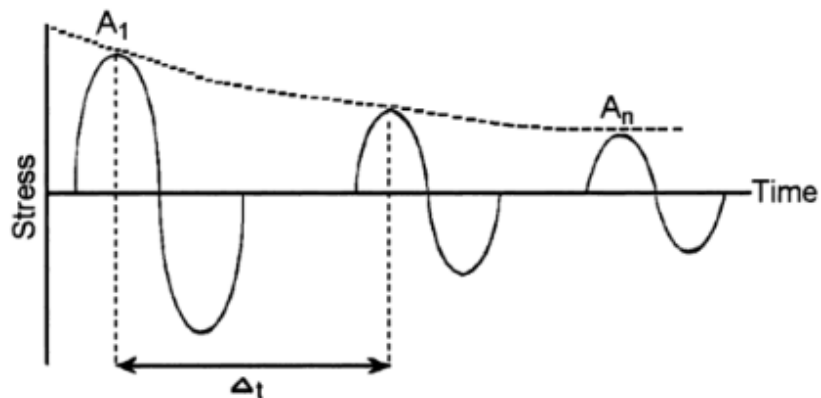
Při měření rezonančními metodami se využívá frekvencí pod 20 kHz (BUCUR 2006) a lze s jejich pomocí stanovit elastické konstanty dřeva, rychlost šíření zvuku ve dřevě, moduly pružnosti, nebo logaritmický dekrement útlumu (FALK et al. 1990).

3.4.1.5 Podélná rezonanční metoda

Příkladem rezonanční NDM je podélná rezonanční metoda. Její princip spočívá ve vytvoření vlny úderem do dřeva na jednom konci vzorku. Síla úderu přitom nemá vliv na rychlost vlny. Vlna poté cestuje z jednoho konce vzorku na druhý, přičemž slábne její energie, ale neztrácí přitom rychlost. Díky tomu lze měřit čas průchodu vlny vzorkem a z toho následně vypočítat rychlost vlny, když známe rozměry tělesa. Pokud je známá rychlost vlny i hustota vzorku, lze tuto metodu využít ke zjištění dynamického modulu pružnosti (SENALIK et al. 2014).



Obrázek 2 Schéma podélné rezonanční metody (SENALIK et al. 2014)



Obrázek 3 Útlum zvukové vlny (SENALIK et al. 2014)

Obrázek 3 zobrazuje postupné snižování amplitudy pulzů ve dřevě. Tohoto útlumu lze následně využít ke zjištění dalších charakteristik materiálu (SENALIK et al. 2014). Čas

t se měří jako čas mezi jednotlivými pulzy, následně je použit při výpočtu rychlosti podle následujícího vztahu (SENALIK et al. 2014).

$$v = \frac{2L}{\Delta t} [m \cdot s^{-1}]$$

v – rychlost vlny [m.s⁻¹]

L – délka vzorku [m]

Δt – čas mezi pulzy [s]

Modul pružnosti lze poté vypočítat podle tohoto vzorce (BUCUR 2006).

$$MOE = v^2 \rho [Pa]$$

MOE – modul pružnosti [Pa]

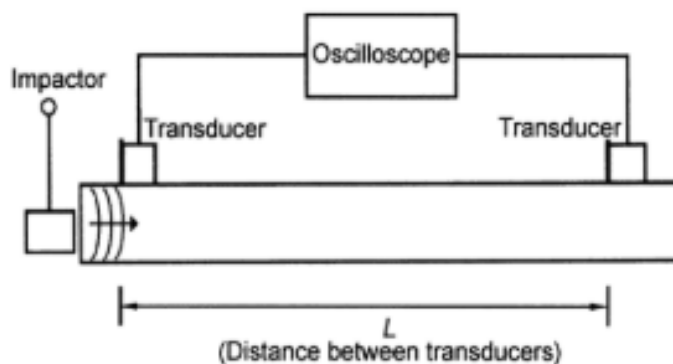
v – rychlost vlny [m.s⁻¹]

ρ – hustota [kg.m⁻³]

Baar zjistil rozdíl v rychlostech vlny při měření ultrazvukovou a rezonanční metodou. UZ dosahovala průměrně o 6 % vyšších hodnot. Tento rozdíl Baar vysvětluje rozdílnou dráhou, kterou vlna ve dřevě urazí. V případě podélné rezonanční metody prochází vlna celou délkou tělesa, kdežto u UZ pouze vzdáleností mezi senzory. Z tohoto důvodu se může stát, že se vlna vyhne defektům ve dřevě, které jsou mimo oblast mezi senzory. To činí rezonanční metodu jako více citlivou (BAAR et al. 2012).

3.4.1.6 Pitch and Catch

Dalším možným příkladem rezonanční NDM je Pitch and Catch. Principem této metody je, že vlna vznikne opět úderem například kladívka, ale na tělese jsou za sebou po délce umístěny dva senzory. Tyto senzory postupně zaznamenají, kdy kolem nich projde vlna a výsledný čas průchodu vlny mezi nimi vydělí vzdáleností mezi senzory. Takto lze snadno zjistit rychlost vlny ve vzorku (SENALIK et al. 2014). Metoda se liší od UZ ve způsobu vytvoření zvukové vlny, ale jinak je princip velice podobný.



Obrázek 4 Schéma metody Pitch and Catch (SENALIK ET AL. 2014)

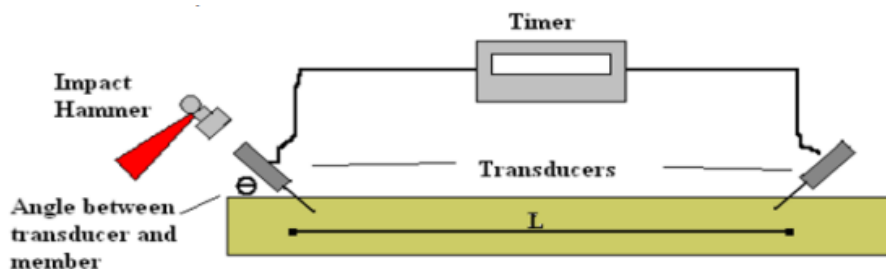
3.4.1.7 Akusticko-ultrazvuková metoda

Akusticko-ultrazvuková metoda (AU) je kombinací ultrazvuku a akustické emise. Je při ní měřený jak průchod signálu, tak frekvence vznikající ve dřevě. Při měření lze zjistit útlum zvuku ve dřevě a pomocí toho odhalit například poškození dřeva (DUNLOP 1983), odhalit suky, hnilobu, nebo třeba orientaci vláken (BEALL & WILCOX 1987).

Hlavní rozdíl AU od AE je, že při ní jsou vysílány pulzy do tělesa pomocí piezoelektrických senzorů. Následně jsou vlny procházející tělesem analyzovány, přičemž jsou zjišťovány rozdíly vzniklé během jejich průchodu vzorkem. Vlny jsou měřeny senzorem používaným při AE metodě. Od UZ se AU odlišuje vyšší přesností a schopností odhalit i velmi drobné vady (BEALL 2002).

3.4.1.8 Stress wave

Jednou z používaných metod NDM je metoda Stress wave. Funguje na principu měření průchodu vlny dřevem mezi dvěma piezoelektrickými senzory. Rozdíl oproti ostatním NDM je ten, že zvukový signál vzniká úderem kladívka do jednoho senzoru. Princip je opět velmi podobný metodě UZ a je zobrazený na obrázku 5:



Obrázek 5 Princip metody Stress wave (KASAL et al. 2011)

3.6 Pevnostní a pružnostní charakteristiky

3.6.1 Pevnost dřeva

Pevnost dřeva udává odpor, případně odolnost vůči jeho trvalému poškození. Vyjadřuje se pomocí napětí σ (MPa). Při zkoumání pevnosti dřeva hledáme hodnotu meze pevnosti, která udává hodnotu napětí, které působí na těleso v okamžiku jeho porušení. Údaje o mezi pevnosti se získávají při stanovených zkušebních postupech. Za účelem porovnávání těchto vlastností došlo k ustanovení určité dohody o zkušebních postupech (POŽGAJ et al. 1997). Ke stanovení těchto hodnot tedy dochází za přesně daných podmínek, např. vlhkosti a definované zkušební metody.

3.6.2 Pružnost dřeva

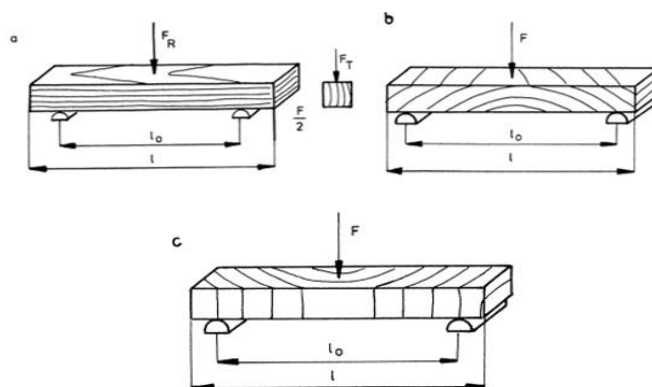
Pružnost dřeva lze definovat jako schopnost dřeva navrátit původní rozměry a tvar po uvolnění vnějších sil. Definovat pružnost lze pomocí charakteristik pracovního diagramu, tedy modulem pružnosti, Poissonovými čísly, mezí úměrnosti a energií pružné deformace.

3.6.2.1 Modul pružnosti

Pomocí modulu pružnosti se vyjadřuje vnitřní odpor materiálu vůči pružné deformaci. V případě dřeva rozlišujeme dva typy modulu pružnosti. Pro normálové namáhání Youngovy moduly pružnosti E (ohyb, tlak, tah), a pro tangenciální namáhání Youngovy moduly pružnosti G (krut, smyk). Obecně se jedná o poměr velikosti zatížení a pružné deformace (POŽGAJ et al. 1997).

3.6.3 Pevnost v ohybu

Pevnost dřeva v ohybu dělíme podle směru vláken na ohyb kolmo na vlákna v radiálním nebo tangenciálním směru, ohyb s průběhem kolmo na osu tělesa a na ohyb, kde vlákna probíhají rovnoběžně se směrem zatížení. Při testování dřeva se využívá především první možnost, tedy kolmo na vlákna, protože nachází největší uplatnění, například u zkoušek dřevěných nosníků.



Obrázek 6 Zatížení dřeva v ohybu. a) kolmo na vlákna v radiálním směru; b) kolmo na osu tělesa; c) podél vláken (POŽGAJ et al. 1997)

Při zatížení ohybem kolmo na vlákna se téměř výhradně zatěžuje těleso v tangenciálním směru (tangenciálním ohybem), přičemž nám vznikají dva druhy napětí. Na vnitřní straně napětí tlakové a na vnější tahové. K porušení dochází v tlakové části, protože pevnost v tlaku je podstatně nižší než v tahu. Toto porušení ovšem není většinou viditelné pouhým okem a k viditelnému porušení dojde nakonec nejdříve v tahové části (GANDELOVÁ et al. 2014). Pevnost v ohybu podle bodů b) a c) na obrázku 9 je velmi nízká, dosahuje 5–10 % při ohybu a) (POŽGAJ et al. 1997).

Zkouška pevnosti dřeva v ohybu je jednou z nejčastějších a nejdůležitějších zkoušek mechanických pevnostních charakteristik u dřeva. Při této zkoušce máme nosník, na jehož střed působí zatížení, a který je na obou stranách podepřený. Mez pevnosti dřeva v ohybu lze vypočítat pomocí vzorce pro pevnost při působícím maximálním napětí. Hodnota meze pevnosti se pohybuje okolo 100 MPa (GANDELOVÁ et al. 2014).

$$\sigma_{max} = \frac{3Fl_0}{2bh^2} [MPa]$$

F – působící síla [N]

l_0 – vzdálenost mezi podpěrami [mm]

h – výška nosníku [mm]

b – šířka nosníku [mm]

3.6.3.1 Statický modul pružnosti v ohybu

Modul pružnosti v ohybu při zatížení ve středu tělesa v tangenciálním směru se vypočítá podle vzorce (GANDELOVÁ et al. 2014).

$$MOEs = \frac{Fl_0^3}{4bh^3\Delta y} [MPa]$$

F – působící síla [N]

l_0 – vzdálenost mezi podpěrami [mm]

h – výška nosníku [mm]

b – šířka nosníku [mm]

Δy – průhyb zkušebního tělesa [mm]

3.6.3.2 Dynamický modul pružnosti

Dynamický modul pružnosti dřeva lze zjistit na základě jeho akustických vlastností. Pokud známe rychlost zvuku ve dřevě a jeho hustotu, můžeme pomocí nich vypočítat dynamický modul pružnosti (BUCUR 2006). Nejčastěji se využívá metoda měření ultrazvukem.

3.7 Další faktory ovlivňující zkoumané vlastnosti

3.7.1 Vlhkost

Dřevo je hygroskopický materiál. Je schopné přijímat vodu v plynném i kapalném skupenství. Vody je v živém stromě velké množství a je pro život rostoucích stromů naprosto zásadní. Obsah vody ve dřevě je proměnlivý a pro účely, ke kterým je dřevo používáno není vysoký obsah vody žádoucí. Pojí se se zhoršenými mechanickými

vlastnostmi, větší náchylnosti k biotickému poškození, změnami rozměrů, hustoty a dalšími nežádoucími efekty (POŽGAJ et al. 1997).

Existují různé typy vlhkosti dřeva. Absolutní vlhkost dřeva w_{abs} se vyjádří poměrem hmotnosti vody s hmotností dřeva v absolutně suchém stavu, kdežto vlhkost relativní w_{rel} vyjadřuje podíl hmotnosti vody a hmotnosti mokrého dřeva. Při výpočtech fyzikálních a mechanických vlastností dřeva se počítá s vlhkostí absolutní (POŽGAJ et al. 1997).

Při měření vlhkosti u zabudovaných dřevěných částí se nejvíce využívají příruční vlhkoměry (SAID 2004), nejčastěji odporové a kapacitní. U odporových vlhkoměrů je využíván elektrický odpor měřeného materiálu. Kapacitní vlhkoměry měří kapacitu a ztrátový činitel elektrického proudu (KLOIBER 2007).

Při srovnávání hodnot naměřených s hodnotami v literatuře je výhodné počítat s údaji při 12% vlhkosti, protože většina hodnot je uváděna pro hustotu při 12% vlhkosti. Této hustoty je dosaženo při dlouhodobém vystavení dřeva teplotě 20 °C a relativní vlhkosti vzduchu 65 %.

3.7.2 Hustota

Hustota vyjadřuje hmotnost objemové jednotky látky. Značkou pro hustotu je ρ . Vypočítá se jako podíl hmotnosti a objemu. U dřeva se při výpočtech počítá s hustotou při určité vlhkosti.

$$\rho_w = \frac{m_w}{V_w} [kg \cdot m^{-3}]$$

ρ_w – hustota dřeva při dané vlhkosti [$kg \cdot m^{-3}$]

m_w – hmotnost dřeva při dané vlhkosti [kg]

V_w – objem dřeva při dané vlhkosti [m^3]

U dřeva můžeme rozlišit tři typy hustoty: hustotu dřeva, hustotu dřevní substance a redukovanou hustotu (POŽGAJ et al. 1997). Nejčastěji je využívána hustota při 12% vlhkosti dřeva.

3.7.3 Vliv pozice vzorku ve kmeni

Jedním z hlavních posuzovaných faktorů byl vliv pozice vzorku ve kmeni. Hlavním důvodem pro zkoumání tohoto vlivu je měnící se hustota v rámci vzdálenosti od dřene směrem ke kůře. Hustota do velké míry ovlivňuje pevnost a pružnost dřeva jakož i chování akustické vlny ve dřevě. Hustota se u jehličnanů zvyšuje směrem od dřene ke kůře (ZEIDLER & ŠEDIVKA 2015).

3.7.4 Vliv světových stran na posuzované vlastnosti

Dalším faktorem, který by mohl potenciálně ovlivnit výsledky je orientace kmene vzhledem ke světovým stranám. V praxi se jedná o zanedbatelný faktor. Například Zeidler a Šedivka při měření hustoty jedle obrovské nezjistili prakticky žádný vliv světových stran (ZEIDLER & ŠEDIVKA 2015).

3.8 Douglaska tisolistá

Douglaska tisolistá (*Pseudotsuga menziesii*) je jehličnatý strom, dosahující výšky až 70 m a průměru kmene 1-3 m (DOLEJSKÝ 2014). Větvička uvádí až 80 m a průměr až 4 m (VĚTVIČKA 1999). V USA dosahuje douglaska průměrné výšky 76,2 m, nejvyšší změřený strom měřil 100,58 m (ALDEN 1997). V České republice je nepůvodní dřevinou. Pochází ze Severní Ameriky, přesněji její západní části. Její rozšíření v USA je od Skalistých hor po pobřeží Pacifiku a od Mexika po centrální Britskou Kolumbii (ALDEN 1997). Do Evropy byla dovezena z Ameriky Davidem Douglasem (MÖLLEROVÁ 2012).

Považuje se za jednu z nejvýznamnějších nepůvodních dřevin, zejména díky vynikajícím vlastnostem dřeva, rychlému růstu a dalším vlastnostem převažujícím naše dřeviny. V současnosti je douglaska nejrozšířenější nepůvodní dřevinou v západní a střední Evropě (SLODIČÁK et al. 2013). Například ve Francii roste na ploše více než 400 000 ha a ročně se vysadí okolo 5 mil. sazenic (FERRON & DOUGLAS 2010). Ve své domovině v USA je douglaska nejdůležitější dřevina v dřevařském průmyslu (BORMANN 1984).

3.8.1 Dřevo douglasky

Dřevo je vzhledem velice podobné modřínu opadavému, na rozdíl od něj ale na vzduchu časem méně tmavne. Má velice dobré vlastnosti a všestranné použití (ZEIDLER 2013). Douglaska je jádrová dřevina s poměrně výrazným jádrem, s někdy až výraznou červenou barvou. Výrazným znakem douglasky je rozdíl mezi jarním a letním dřevem. Přejít mezi nimi je náhlý a rozdíly mezi hustotou jarního a letního dřeva jsou poměrně vysoké. Požgaj uvádí hustotu jarního dřeva 300 kg.m^{-3} a letního dřeva 790 kg.m^{-3} (POŽGAJ et al. 1997). Dřevo je sukovité s velkými tvrdými sukami a vyžaduje kvalitní nástroje na opracování, protože klade vysoký odpor. Dále je dřevo náchylné na praskání, nesmolí a je celkem těžké (ZÁRUBA & ZÁRUBA 2014). Hodí se na stavební a konstrukční účely, na vnitřní i vnější použití. Vzhledem k výšce a průměru, jakých douglaska dosahuje, je možné při výrobě získat materiál velkých rozměrů. Má dobré mechanické vlastnosti i trvanlivost (HORÁČEK & TIMKO 2014). Nejlepší technologické vlastnosti dosahuje dřevo douglasky při šířce letokruhů mezi 1 a 2 mm (WAGENFÜHR 2000). Dřevo douglasky se těžko impregnuje a jádrové dřevo je středně odolné proti hnilobě (ALDEN 1997). Pevnost v tlaku a v ohybu byla zjištěna vyšší u douglasky pěstované v ČR než v jejích domácích podmínkách. Douglaska představuje dřevinu s potenciálem pěstování dřeva o vysoké kvalitě (GIAGLI et al. 2019).

3.8.2 Názory na pěstování douglasky v ČR

Zejména z důvodu současného měnícího se klimatu a probíhající kalamity lýkožrouta smrkového se jeví douglaska jako vhodná dřevina schopná z části nahradit především ubývající smrkové porosty. Mezi další nepůvodní dřeviny s vysokým potenciálem patří například jedle obrovská (*Abies grandis*), dub červený (*Quercus rubra*) a ořešák černý (*Juglans nigra*) (BERAN & ŠINDELÁŘ 1997). Ve studii SVOL z roku 2013 tvoří podíl douglasky v ČR méně než 0,1 %, tedy 3800 ha porostní plochy, přičemž studie ÚHUL z roku 1994 doporučuje, aby douglaska tvořila až 4 % podílu, studie uvažuje o 2 % (SLODIČÁK et al. 2013). Podrázský uvádí pro rok 2016 podíl 5800 ha (PODRÁZSKÝ 2016).

Douglasku za vhodnou náhradu smrku považuje hned několik autorů (PAGAN 1999; REMEŠ et al. 2006; PODRÁZSKÝ 2016; KANTOR et al. 2001; KUBEČEK et al. 2014). Důvody jsou především: výrazně větší produkční potenciál (KUBEČEK et al. 2014; REMEŠ et al. 2006), Pagan uvádí až o 60 % větší produkci než smrk (PAGAN 1999), nebo až o 90 % větší než borovice lesní; menší vliv na složení půdy, méně okyseluje půdu, a je vhodná jako meliorační dřevina v jehličnatých porostech (KUBEČEK et al. 2014; BLAŠČÁK 2013); menší vliv na biodiverzitu, která je v jejích porostech srovnatelná nebo i vyšší než v přirozených porostních společenstvech; velmi dobrý stabilizační vliv na porosty. Douglaska nemá příliš odlišné nároky na pěstování než jiné jehličnany (KUBEČEK et al. 2014). Na pěstování douglasky v ČR nejsou ovšem pouze zcela pozitivní názory, a to zejména z důvodů snahy zamezit velkému rozšíření nepůvodních dřevin. Současný vývoj klimatu navíc může pohled na věc ještě částečně změnit. Vejpusková a Čihák doporučují ve své studii z roku 2019 opatrnost při nahrazování smrku douglaskou, a to z důvodu zjištěné větší citlivosti douglasky na sucho v posledních letech (VEJPUŠKOVÁ & ČIHÁK 2019).

3.9 Srovnání testovaných dřevin

Douglaska vykazuje podstatně vyšší produkční potenciál než domácí dřeviny. Má lepší vliv na půdu, i na biodiverzitu. Podporuje stabilitu porostů a její nároky na pěstování nejsou příliš odlišné od našich domácích dřevin (KUBEČEK et al. 2014).

V českých podmínkách má douglaska výrazně lepší výsledky než smrk v různých oblastech. Například v případě hustoty dosahuje až o více než 100 kg.m⁻³ vyšší hodnoty. Lepší výsledky má také v případě MOEs i ohybové pevnosti. Až dvakrát větší pevnosti dosahovala u rázové houževnatosti (ZEIDLER et al. 2017).

Douglaska dosahuje v ČR srovnatelné kvality, jako ve své domovině. Dosahuje podstatně vyšší produkce než smrk. Kvalitativně je lepší než smrk, ale nedosahuje kvalit modřínu v hustotě, ohybové pevnosti, tvrdosti, či rázové houževnatosti. Dalším významným pozitivem douglasky je její schopnost přirozené obnovy (SLODIČÁK et al. 2013).

V porostech, kde je douglaska dominantní dřevinou, můžeme najít druhově mnohem bohatší společenstva než například v lesích, kde je dominantní pouze smrk (PODRÁZSKÝ et al. 2014).

Jako možný argument proti pěstování douglasky v původních porostech České republiky můžeme uvést vyšší nároky na půdní živiny. Tyto nároky ale mohou být na druhé straně vyrovnány příznivým vlivem rozkladu a transformace opadu douglasky oproti například smrku ztepilému (PODRÁZSKÝ et al. 2002).

Ve srovnání se smrkovými a listnatými porosty (ve složení především buk, lípa, dub) se v porostech douglasky nachází větší podíl nitrofilních rostlin v bylinném patře (PODRÁZSKÝ et al. 2014).

Douglaska vykazuje značnou odolnost vůči suchu (MAUER et al. 2014). V porostech, kde smrk už trpí nedostatkem vlhkosti naopak ještě problémy nevykazuje (DOLEJSKÝ 2014).

4 Metodika

4.1 Výběr a příprava vzorků

Na zkoušky byly použito dřevo ze tří kmenů douglasky (*Pseudotsuga menziesii*) z oblasti Opočna. Pro srovnání byly na zkoušky připraveny stejným postupem vzorky ze čtyř stromů modřínu (*Larix decidua*) a čtyř smrků (*Picea abies*). Všechny tři dřeviny vyrůstaly ve stejné lokalitě.

Z každého kmene byla odebrána sekce v bazální části o délce 120 cm, na které byla označena severní strana kmene. Z této části byla vyříznuta středová fošna ve směru sever – jih o tloušťce 6 cm. Po vyschnutí byly fošny rozřezány s nadmírou na latě, od středu sekce ke kůře tak, aby po následném formátování měla lať průřez 20x20 mm. Latě byly poté rozřezány na rozměry zkušebního tělesa 20x20x300 mm. Na délku tedy vznikla vždy sada o třech tělesech. Sady byly označeny čísly 1 až 8 podle vzdálenosti od dřeně. Toto označení bylo později využito při posuzování vlivu vzdálenosti od středu kmene na výsledky zkoušek. Celkově bylo použito 358 vzorků, z toho 117 douglasky, 117 modřínu a 124 smrku. Každý vzorek měl v označení dřevinu, pozici od dřeně a světovou stranu.

Vzorky byly umístěny do klimatizační komory Climacell 707 (BMT Medical Technology s.r.o.) při teplotě 20 °C a relativní vzdušné vlhkosti 65 % za účelem získání rovnovážné vlhkosti 12 %.

Vzorky byly nejprve zváženy na digitální váze s přesností 0,01 g. Pravítkem byl označen střed na tangenciální ploše, kvůli pozdějšímu měření pevnosti v ohybu. V místě označení středu byl změřen rozměr na tangenciální a radiální ploše. Rozměry byly změřeny s přesností 0,01 mm posuvným měřítkem.

Hustota byla vypočtena v souladu s normou ČSN 49 0108.

$$\rho_{12} = \frac{m_{12}}{V_{12}} [kg \cdot m^{-3}]$$

ρ_{12} – hustota při 12% vlhkosti

m_{12} – hmotnost při 12% vlhkosti

V_{12} – objem při 12% vlhkosti

4.2 Postup měření

4.2.1 Ultrazvuková nedestruktivní metoda

Ultrazvuková metoda (dále jen UZ) byla použita jako hlavní nedestruktivní zkoušení na všech vzorcích. Zejména kvůli přesnosti a jednoduchosti měření.

Při postupu UZ se měří dynamický modul pružnosti (dále jen MOE_{du}) pomocí měření rychlosti průchodu vlny tělesem. Na měření byl použit Fakopp Ultrasonic Timer (Fakopp Enterprise Bt., Agfalva, Maďarsko) s frekvenčním rozsahem od 15 do 300 kHz a dvěma piezoelektrickými senzory.

Měření probíhalo metodou nepřímo měření podél vláken na radiální ploše ve vzdálenostech senzorů 140 mm. Z jednotlivé sady byl vždy vybrán jeden vzorek, na kterém byl měřen čas průchodu vlny ve vzdálenostech 60, 120, 140, 180 a 240 mm kvůli pozdějšímu výpočtu časové korekce K. Ostatní vzorky ze sady byly měřeny pouze ve vzdálenosti 140 mm. Časová korekce byla zjištěna podle postupu v manuálu Fakopp Ultrasonic Timeru (FAKOPP Ultrasonic timer user's guide) a byla poté použita na všechny vzorky v příslušné sadě. S korekcí se musí počítat z toho důvodu, že přístroj neměří pouze čas průchodu materiálem, ale i průchodu sondami (SCHWARZER 2014).

Při měření byly vzorky na obou stranách podepřeny PUR pěnovými podložkami, kvůli správnému průchodu zvuku. Postup spočívá v přiložení senzorů na danou vzdálenost, při které přístroj vyše signál a změří čas průchodu vlny tělesem. Čas je poté použit na výpočet rychlosti průchodu vlny tělesem podle následujícího vzorce (MISHIRO 1996).

$$v = \frac{l}{(t - K)} \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}\text{]}$$

v – rychlost vlny [m.s¹]

l – délka tělesa [m]

t – čas průchodu vlny tělesem [s]

K – korekce času [s]

Pro výpočet MOEdu byl použit vzorec (BUCUR 2006).

$$MOEdu = v^2 \rho \text{ [Pa]}$$

MOEdu – dynamický modul pružnosti pro UZ [Pa]

v – rychlost vlny [m.s⁻¹]

ρ – hustota [kg.m⁻³]

4.2.2 Rezonanční nedestruktivní metoda

Rezonanční metoda byla použita jako srovnávací nedestruktivní metoda měření. Byla použita pro srovnání s UZ. Při postupu byly vybrány z každé sady vzorků pouze ty vhodné, tedy ty bez výrazných vad. Při rezonanční metodě mají vady příliš velký vliv na přesnost měření.

MOEd byl měřen dvěma metodami. V podélném směru (MOEdvl) a napříč vláken (MOEdvt). Vzorky byly podepřeny dvěma gumovými podložkami ve vzdálenosti vypočítané podle následujícího vzorce (HOLEČEK et al. 2017). Tato vzdálenost byla dodržena za účelem správného šíření vlny ve vzorku.

$$s = l \times 0.22 \text{ [mm]}$$

s – vzdálenost podpěr (mm)

l – délka tělesa (mm)

Kladívko použité na vibrace vážilo mezi 0,5 a 5 % váhy vzorků. Na nahrávání byl použit mikrofon Behringer ECM8000 (Behringer Spezielle Studioteknik GmbH, Willich, Německo) a zesilovač UR22 (Steinberger GmbH, Hamburg, Německo).

Při metodě měření MOEd napříč vláken (MOEdvt) byl mikrofon přiložen na vzdálenost zhruba 2 mm od tělesa, kladívko udeřilo na radiální plochu a mikrofon zaznamenal vzniklou frekvenci. Frekvence byla vyhodnocena podle FFT (Fast Fourier Transform) analýzy v softwaru Fast Fourier Vibration analyzer (Fakopp Enterprise Bt., Agfalva, Maďarsko). Dynamický modul pružnosti při metodě napříč vláken, MOEdvt, se vypočítá podle následujícího vzorce. Korekce γ pro metodu napříč vláken se získá

podle vzorce $\gamma=(n+0,5)^2$. Bucur uvádí $n=1$ pro ohyb napříč vláken a modul setrvačnosti $I=bh^3/12$, kde b je šířka a h je výška tělesa (BUCUR 2006).

$$MOEdvt = \left(\frac{2f_n}{\gamma\pi}\right) \frac{ml^3}{I} \text{ [MPa]}$$

MOEdvt – dynamický modul pružnosti metodou napříč vláken [MPa]

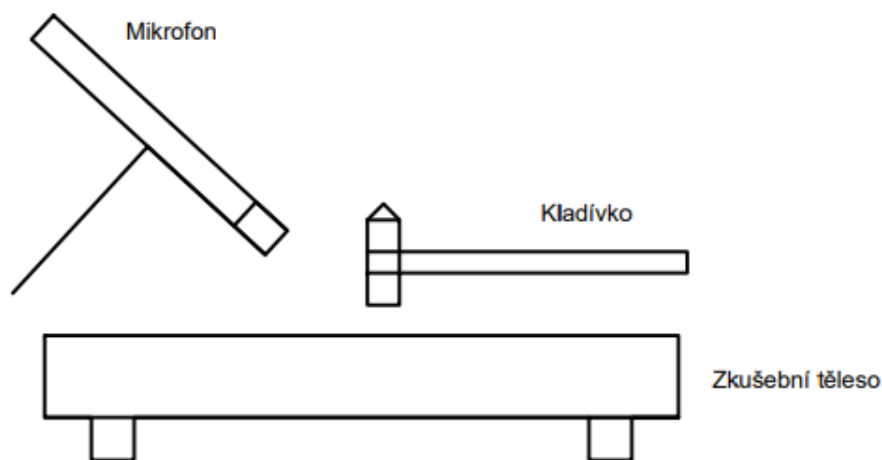
f_n – frekvence vibrací [Hz]

m – hmotnost vzorku [kg]

l – délka tělesa [m]

I – modul setrvačnosti [m⁴]

γ – korekce



Obrázek 7 Postup měření metodou napříč vláken

Pro podélnou metodu měření MOEd (MOEdvl) byl mikrofon umístěn na konec tělesa a do toho bylo udeřeno kladívkem na druhém konci. Mikrofon nahrál frekvenci a poslal ji do PC. Pro výpočet modulu byl použit tento vzorec (SENALIK ET AL. 2014).

$$MOEdvl = v^2\rho \text{ [Pa]}$$

MOEdvl – dynamický modul pružnosti pro podélnou metodu [Pa]

v – rychlost vlny [m.s⁻¹]

ρ – hustota tělesa [kg.m⁻³]

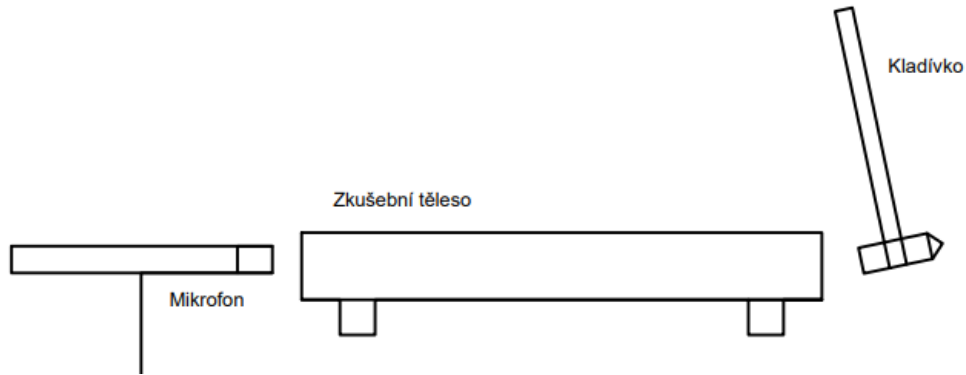
Rychlost vlny byla vypočítána podle tohoto vzorce (ILIC 2003).

$$v = 2lf_n \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$$

v – rychlost vlny [m.s⁻¹]

l – délka tělesa [m]

f_n – frekvence vibrací [Hz]



Obrázek 8 Postup měření metodou podél vláken

4.2.3 Stanovení statického modulu pružnosti a pevnosti v ohybu

4.2.3.1 Statický modul pružnosti

Pro získání statického modulu pružnosti (MOEs) byl použit trojbodový ohyb. Pro zkoušku byl použit trhací stroj UTS 50 se softwarem TIRA. Test byl proveden na základě normy ČSN 49 0115. Vzdálenost podpěr byla 240 mm, tedy 12 x šířka vzorků. Síla působila na radiální plochu, ve středu mezi podpěrami. Toto měření proběhlo na stejných vzorcích jako měření MOEdu. Použitý vzorec podle ČSN 49 0115.

$$MOEs = \frac{Fl_0^3}{4bh^3\Delta y} \text{ [MPa]}$$

MOEs – statický modul pružnosti [MPa]

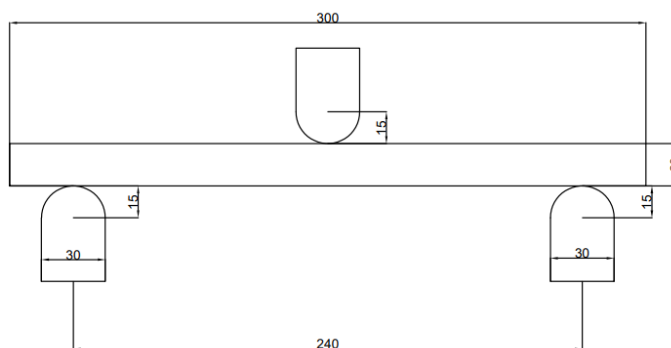
F – působící síla [N]

l_0 – vzdálenost podpěr [mm]

b – šířka tělesa [mm]

h – výška tělesa [mm]

Δy – průhyb tělesa [mm]



Obrázek 9 Schéma trojbodového ohybu

4.2.3.2 Pevnost v ohybu

Dále byla na stejných vzorcích určena pevnost v ohybu. Byl použit tento vzorec (POŽGAJ et al. 1997) podle normy ČSN 49 0115.

$$\sigma_{max} = \frac{3Fl_0}{2bh^2} \text{ [MPa]}$$

σ_{max} – pevnost v ohybu [MPa]

F – působící síla [N]

l_0 – vzdálenost podpěr [mm]

h – výška tělesa [mm]

b – šířka tělesa [mm]

Výsledky byly statisticky vyhodnoceny pomocí programu STATISTICA 13 (Statsoft Inc., OK, USA). V práci byly porovnány výsledky naměřených hodnot s výsledky dostupnými v literatuře. Jednotlivé dřeviny byly porovnány mezi sebou na základě naměřených výsledků. Byla využita popisná statistika, průměr, maximum, minimum, medián, směrodatná odchylka a variační koeficient. Závislosti mezi veličinami byly posouzeny na základě korelační analýzy. Byla zkoumána závislost MOEs a MOEdu, MOEdu a MOEdvl, MOEdvt. Dále byl posouzen vliv dalších faktorů, především hustoty, pozice ve kmeni a příslušnosti světové straně. Byl zhodnocen také vliv těchto faktorů na rychlost vlny ve dřevě.

5 Výsledky a diskuse

5.1 Hustota

Výsledná průměrná hodnota hustoty douglasky činí 526,71 kg.m⁻³. Hodnota je téměř o 85 kg.m⁻³ vyšší než hodnoty smrku. Tyto hodnoty potvrzují výsledky dalších autorů o produkčním potenciálu douglasky převyšujícím potenciál smrku (PAGAN 1999; REMEŠ et al. 2006).

Tabulka 1 Statistika výsledků měření hustoty

ρ_{12} [kg.m ⁻³]	DG	MD	SM
Průměr	526,71	590,53	443,19
Maximum	692	738,7	577,8
Minimum	458,5	394,1	352,4
Medián	551,4	591,1	438,2
Směrodatná odchylka	52,9	80,1	48,8
Variační koeficient [%]	9,6	13,5	11

Douglaska a smrk se řadí do dřev s nízkou hustotou ($\rho_{12} < 540$ kg.m⁻³), modřín patří do dřev se střední hustotou ($\rho_{12} = 540-750$ kg.m⁻³) (MATOVIČ 1993). Výsledky této práce odpovídají tomuto rozdělení. Tabulka 2 zobrazuje naměřené hodnoty hustoty douglasky ve srovnání s hodnotami dostupnými v literatuře. Alden uvádí pro douglasku tři různé průměrné hustoty podle oblasti rozšíření. Pro douglasku ze severní oblasti (Interior North) 480 kg.m⁻³, pro západní (Interior West) 500 kg.m⁻³. V pobřežních oblastech dokonce 540 kg.m⁻³. Výsledky hustoty z této práce se řadí spíše mezi vyšší hodnoty. Průměrná naměřená hodnota byla 526,71 kg.m⁻³.

Tabulka 2 Srovnání naměřených hodnot hustoty DG s literaturou

Hustota douglasky tisolisté	
Zdroj	ρ_{12} [kg.m ⁻³]
Forest Service US Dept. of Agriculture 1999	480
Alden 1997	540
Dřevařská technická příručka 1970	510
Bucur 2006	440
Wagenführ 2000	510
Naměřená hodnota	526,71

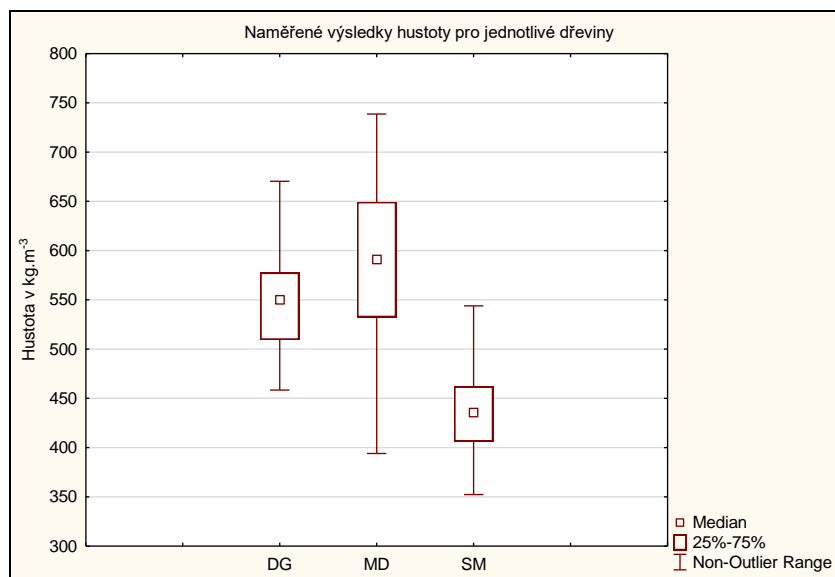
Lze tedy tvrdit, že douglaska dosahuje v ČR stejně dobrých, nebo i lepších výsledků než ve své domovině v USA. Tento závěr se shoduje i s jinými pracemi prováděnými v České republice. Giagli uvádí naměřenou hustotu 562,74 kg.m⁻³ (GIAGLI et al. 2019), Zeidler 568 kg.m⁻³ (ZEIDLER et al. 2017), Chvojka 564 kg.m⁻³ (CHVOJKA 2016). Ve srovnání s těmito dalšími pracemi vyšla v této práci u douglasky hustota nižší. Nejvíce se tabulkovým hodnotám blíží výsledky modřínu. Tabulka 3 porovnává výsledky hustoty modřínu a smrku s hodnotami dostupnými v literatuře.

Tabulka 3 Srovnání naměřených hodnot hustoty MD a SM s literaturou

Hustota ostatních měřených dřevin			
SM		MD	
Zdroj	ρ_{12} [kg.m ⁻³]	Zdroj	ρ_{12} [kg.m ⁻³]
Bucur 2006	400	Pánek, Trgala 2016	559
Kloiber, Kotlíková 2014	470	Požgaj 1997	500-600
Gandelová et al. 2014	450	Gandelová et al. 2014	590
Naměřená hodnota	443,19	Naměřená hodnota	590,53

Na grafu 1 můžeme vidět srovnání výsledků hustoty pro jednotlivé dřeviny.

Douglaska dosáhla znatelně vyšší hustoty než smrk, což se shoduje s literaturou. Potvrzuje to předpoklad, že by douglaska mohla v budoucnu představovat kvalitní částečnou náhradu za ubývající smrk (PAGAN 1999; REMEŠ et al. 2006; PODRÁZSKÝ 2016; KANTOR et al. 2001; KUBEČEK et al. 2014).



Graf 1 Hustoty jednotlivých dřevin v kg.m-3

5.2 Dynamický modul pružnosti

V tabulce 4 můžeme vidět srovnání MOEdu douglasky, smrku a modřínu. Nejvyšší hodnoty byly naměřeny pro modřín a nejnižší pro smrk.

Tabulka 4 Statistika výsledků MOEdu všech tří dřevin

MOEdu	DG	MD	SM
Průměr	10,9	11,1	9,6
Maximum	19	19,4	18,9
Minimum	4,6	4,5	4
Medián	10,9	11	9,4
Směrodatná odchylka	3,1	3,3	3,1
Variační koeficient [%]	28,5	30,2	32,6

Ve srovnání s dostupnou literaturou pro měření dynamického modulu pružnosti ultrazvukovou metodou vychází MOEdu douglasky spíše nižší, jak lze vidět v tabulce 5.

Tabulka 5 Srovnání výsledků MOEdu douglasky s hodnotami v literatuře

MOEdu douglaska tisolistá	
Zdroj	GPa
Niemz, Aguilera, 1995	11,29
Valášková, 2015	12,6
Naměřená hodnota	10,95

Jako doplňkové měření proběhlo v této práci měření rezonanční metodou. Tabulka 6 zobrazuje statistické vyhodnocení výsledků rezonanční metody. V případě rezonančního měření opět vyšly nejvyšší průměrné hodnoty pro modřín a nejnižší pro smrk. U všech dřevin vycházel MOEdvt větší než MOEdvl.

Tabulka 6 Statistika výsledků MOEdvl a MOEdvt všech tří dřevin

Výsledky MOEdvl a MOEdvt						
	Douglaska		Modřín		Smrk	
	MOEdvl	MOEdvt	MOEdvl	MOEdvt	MOEdvl	MOEdvt
Průměr [Gpa]	13	22	16,5	24,4	10,8	17,5
Medián [Gpa]	13,1	21,6	16,5	24,4	10,8	17,5
Maximum [Gpa]	17,1	30,5	17,2	33,5	13,4	22,9
Minimum [Gpa]	8,1	16,6	15,8	13,8	9,1	12,1
Směrodatná odchylka [Gpa]	2,1	3,1	0,5	4,5	1,4	2,3
Variační koeficient [%]	16,1	14,2	3,3	18,3	12,7	13,3

5.3 Statický modul pružnosti

Průměrná hodnota MOEs douglasky vyšla 10,95 GPa. Hodnota je nižší, než uvádí literatura (tabulka 7).

Tabulka 7 Průměrné hodnoty MOEs douglasky ve srovnání s literaturou

Statically modul pružnosti douglasky	
Zdroj	GPa
Alden 1997	12,3
Dřevarašská technická příručka 1970	11,5
Wagenführ 2000	11,3-13,2
Valášková 2015	12,6
Naměřená hodnota	10,95

Ze všech tří testovaných dřevin vychází douglaska s nejnižším MOEs. Nepotvrdil se předpoklad, že bude douglaska v případě MOEs dosahovat vyšších hodnot než smrk. MOEs vyšší u douglasky, než u smrku zmiňuje například Zeidler et al. (ZEIDLER et al. 2017). Nejvyšších výsledků opět dosáhl modřín (tabulka 8). Měření MOEs u MD a SM dosáhlo velice podobných výsledků ve srovnání s výsledky v dostupné literatuře (tabulka 9).

Tabulka 8 Statistika výsledků MOEs všech tří dřevin

MOEs	DG	MD	SM
Průměr	10,9	12,7	11,2
Maximum	20,5	23,7	19
Minimum	3,5	3,9	4,3
Medián	11,9	12,7	10,6
Směrodatná odchylka	4,1	4,7	3,4
Variační koeficient [%]	38,1	37,4	31,3

Tabulka 9 Průměrné hodnoty MOEs pro smrk a modřín ve srovnání s literaturou

MOEs ostatních měřených dřevin ve srovnání s literaturou			
SM		MD	
Zdroj	Gpa	Zdroj	GPa
Bergstedt, Lyck 2007	11	Bergstedt, Lyck 2007	12,8
Holeček et al. 2017	8,9	Naměřená hodnota	12,69
Naměřená hodnota	11,17		

5.4 Pevnost v ohybu

Průměrná hodnota pevnosti v ohybu pro douglasku vyšla 79,5 MPa. Ve srovnání s průměrnou hodnotou, kterou uvádí Alden (ALDEN 1997), která vychází 90,3 MPa tedy vychází spíše nižší. Ve srovnání s prací Valáškové (VALÁŠKOVÁ 2015), která uvádí pevnost v ohybu průměrně 92,1 MP, u douglasky měřené v České republice, vychází pevnost naměřená v této práci také nižší. Wagenführ uvádí pevnost v ohybu pro douglasku 66,7 – 80 MPa (WAGENFÜHR 2000). Srovnání lze vidět v tabulce 10.

Tabulka 10 Srovnání naměřených hodnot pevnosti v ohybu douglasky s literaturou

Pevnost v ohybu douglasky tisolisté	
Zdroj	MPa
Alden 1997	90,3
Dřevařská technická příručka 1970	79
Wagenführ 2000	66,7-80
Valášková 2015	92,1
Naměřená hodnota	79,5

Tabulka 11 Statistika výsledků pevnosti v ohybu všech tří dřevin

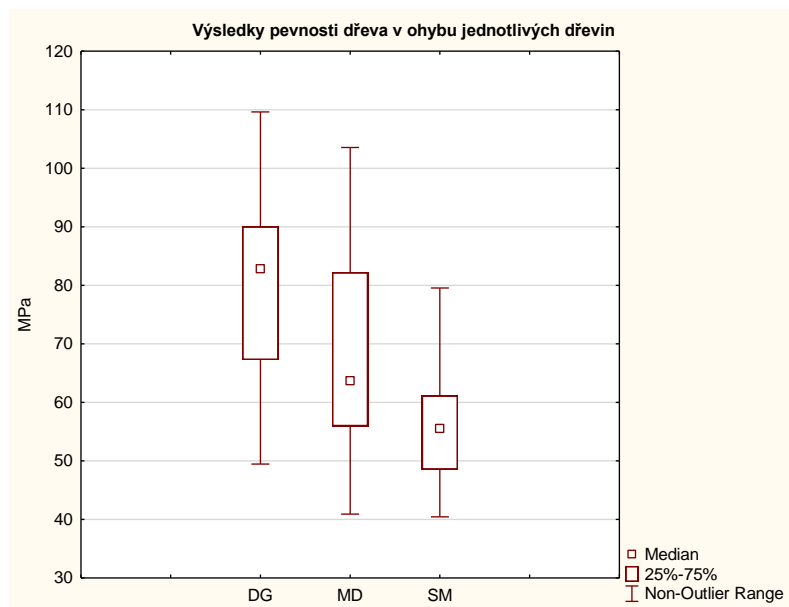
Pevnost v ohybu	DG	MD	SM
Průměr	79,5	67,5	56,4
Maximum	100,6	103,5	79,5
Minimum	49,5	40,9	40,4
Medián	82,8	63,7	55,6
Směrodatná odchylka	13,4	15,9	9,9
Variační koeficient [%]	16,8	23,5	17,6

Tabulka 12 Srovnání naměřených hodnot pevnosti v ohybu MD a SM s literaturou

Pevnost v ohybu ostatních měřených dřevin			
SM		MD	
Zdroj	MPa	Zdroj	MPa
Ugolev 1986	80	Ugolev 1986	112
Berková 2016	75,6	Bergstedt, Lyck 2007	90
Naměřená hodnota	56,4	Naměřená hodnota	67,5

Průměrné hodnoty meze pevnosti v ohybu vychází pro smrk 56,40 MPa a pro modřín 67,54 MPa. Ugolev uvádí pro smrk při 12% vlhkosti mez pevnosti 80 MPa (UGOLEV

1986). Modřín dosáhl nižší výsledné pevnosti v ohybu ve srovnání s literaturou. Dále Ugolev uvádí pro modřín při 12% vlhkosti hodnotu 112 MPa (UGOLEV 1986), Remeš uvádí modřín jako dřevo s vyšší pevností v ohybu než douglaska. Výsledky této práce toto tvrzení nepotvrdily (REMEŠ & ZEIDLER 2014). Douglaska svou průměrnou pevností převyšovala průměrný výsledek modřínu o 12 MPa. Grafické srovnání výsledků dřevin je v grafu 2.



Graf 2 Výsledky pevnosti v ohybu jednotlivých dřevin

5.5 Vzájemná závislost a vyhodnocení měřených charakteristik

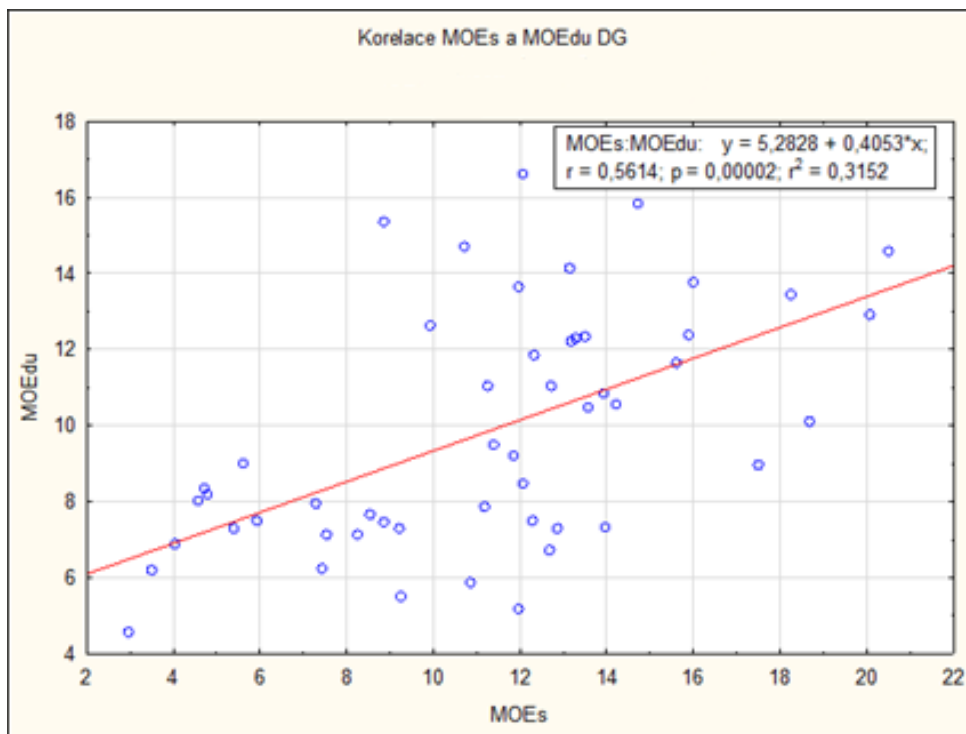
Navzdory výsledkům jiných prací (BAAR et al. 2015; HASSAN et al. 2013) vycházel MOEdu douglasky nižší než MOEs pro všechny tři dřeviny. V případě douglasky se jednalo o zanedbatelnou hodnotu 0,01 GPa, ale v případě smrku už o 1,62 GPa a modřínu 1,53 GPa. Průměrně tedy vycházely MOEdu o 9,5 % nižší než MOEs. Naproti tomu výsledky zjištěné rezonanční metodou vycházely vždy větší například v případě MOEdvl u douglasky o 2,35 GPa. V této práci lze srovnat výsledky jednotlivých modulů podle velikosti takto: $MOEdu < MOEs < MOEdvt$. Například Baar došel k tomuto srovnání: $MOEs < MOEdvt < MOEdu$ (BAAR et al. 2015). V této práci byla rezonanční metoda pouze jako doplňková a lišila se počtem testovaných vzorků.

Z tohoto důvodu nelze spolehlivě zhodnotit vzájemnou závislost MOEs a MOEd na modulech pružnosti zjištěných rezonanční metodou.

Byla potvrzena závislost MOEs na pevnosti v ohybu u douglasky, ačkoliv výsledný korelační koeficient 0,55 nebyl příliš vysoký. V případě závislosti MOEs na ohybové pevnosti vycházela z testovaných dřevin douglaska nejlépe.

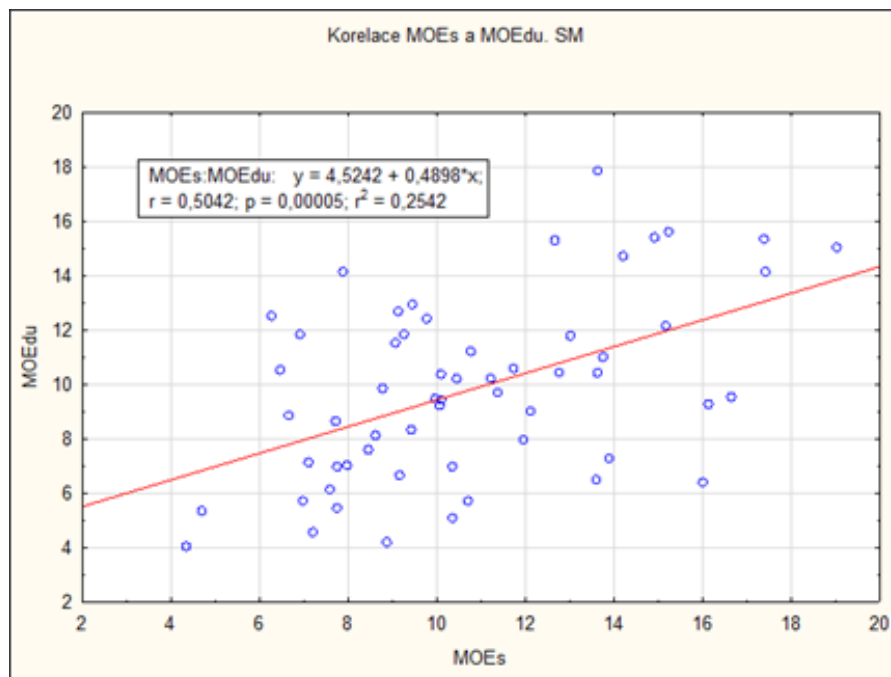
Závislost MOEdu na pevnosti v ohybu u douglasky vycházelo ještě nižší 0,44. V případě modřínu vyšla závislost ještě nižší. Naopak smrk vycházel o něco lépe s mírou závislosti 0,50.

Míru závislosti MOEs a MOEdu u douglasky zobrazuje graf 3.



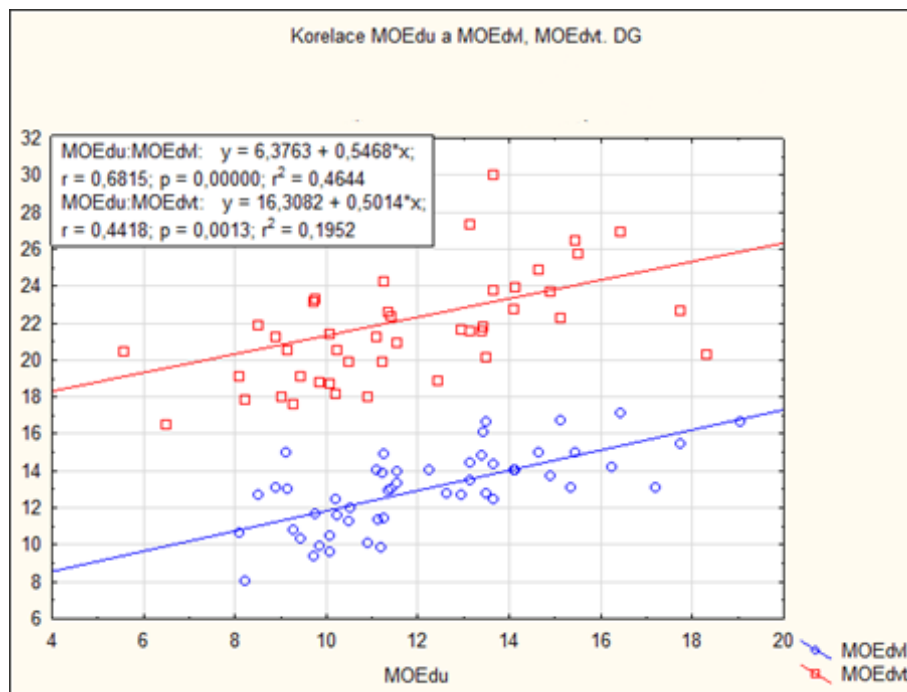
Graf 3 Korelace MOEs a MOEdu DG

Korelace MOEs a MOEdu vycházela velice podobně pro smrk. Je zobrazena v grafu 4.



Graf 4 Korelace MOEs a MOEdu SM

Závislost MOEdu a MOEdvl vycházela pro douglasku poměrně vysoká s korelačním koeficientem 0,68 (graf 5). Větších hodnot dosahovala tato závislost pouze u smrku, a to jen nepatrně, 0,69. V případě závislosti MOEdu a MOEdvt u douglasky vycházela závislost nižší, 0,44. Obecně lze říct, že mezi těmito metodami měření existuje středně silná závislost.



Graf 5 Korelace MOEdu a MOEdvl, MOEdvt DG

Pro určení míry závislosti mezi jednotlivými MOE byla provedena korelační analýza. Jednotlivé hodnoty koeficientů jsou zobrazeny v tabulce 13.

Tabulka 13 Korelační koeficienty pro závislost MOEdu na ostatní měřených modulech

Vzájemná závislost MOEdu na ostatních měřených modulech			
Douglaska tisolistá	MOEs	MOEdvl	MOEdvt
Korelační koeficient r	0,71	0,68	0,44

Z výsledků je patrné, že nejvyšší závislost je mezi MOEs a MOEdu. Tento výsledek ukazuje, že existuje silná závislost mezi těmito hodnotami, díky které můžeme říct, že má metoda MOEdu vysoký potenciál a dá se považovat za spolehlivou metodu měření MOEd. Díky závislosti MOEdu a MOEs lze s vysokou přesností odhadnout MOEs na základě výsledků MOEdu. Vysoká hodnota koeficientu udává, že s rostoucím MOEdu roste i MOEs. Podle Valáškové by mohlo docházet ke snížení této závislosti, pokud jsou v tělese skryté vady. Tyto vady mají vliv při měření MOEdu metodou UZ, protože ovlivní průchod vlny, ale pokud se nachází mimo ohybovou zónu, nemusí ovlivnit měření pevnosti v ohybu a MOEs (VALÁŠKOVÁ 2015). Lze tedy tvrdit, že při vyšší kvalitě vzorků bude pravděpodobně korelace MOEs a MOEdu narůstat.

Stejně tak vycházely závislosti silné i pro rezonanční metodu, ačkoliv byly spíše nižších hodnot. Lagaňa a Rohanová uvádějí vyšší korelaci rezonanční metody s MOEs než ultrazvukové metody s MOEs. Rozdíly ovšem nebyly nikterak výrazné (LAGAŇA & ROHANOVA 2014). Silné závislosti mezi statickým a dynamickým modulem pružnosti, měřeným rezonanční a UZ metodou uvádí i Hassan et al., a také uvádějí vyšší korelaci s rezonanční metodou (HASSAN et al. 2013).

Při srovnání MOEdvl a MOEdvt vycházel MOEdvt průměrně o 39 % vyšší. Tento výsledek se shoduje s výsledky jiných autorů, kteří uvádějí výsledky až dvakrát větší pro MOEdvt (HOLEČEK et al. 2017). Stejně tak se shoduje rozdíl mezi MOEs a MOEdvt. MOEdvt vycházel průměrně až o 45 % vyšší. Srovnání hodnot MOEdvl a MOEdvt zobrazuje tabulka 14.

Tabulka 14 Porovnání průměrných hodnot MOEdvl a MOEdvt

Výsledky MOEdvl a MOEdvt						
	Douglaska		Modřín		Smrk	
	MOEdvl	MOEdvt	MOEdvl	MOEdvt	MOEdvl	MOEdvt
Průměr [Gpa]	13	22	16,5	24,4	10,8	17,5

V tabulce 15 lze vidět shrnutí srovnání jednotlivých dřevin v oblasti hustoty, pevnosti v ohybu a modulů pružnosti. Douglaska dosáhla vyšších výsledků než smrk ve všech měřených vlastnostech až na MOEs. Modřín měl lepší výsledky než douglaska vždy až na pevnost v ohybu. Lze tedy předpokládat, že douglaska nebude dosahovat takových kvalit jako modřín, ale svými vlastnostmi určitě předčí smrk.

Tabulka 15 Výsledky hustoty pevnosti v ohybu a jednotlivých modulů pružnosti pro všechny dřeviny

Dřevina	P [kg.m ⁻³]	Pevnost v ohybu [MPa]	MOEs [GPa]	MOEdvl [GPa]	MOEdvt [GPa]	MOEdu [GPa]
DG	526,71	78,90	10,95	13,03	22,11	10,96
MD	590,53	67,54	12,69	13,65	24,37	11,07
SM	443,19	56,40	11,17	10,82	17,51	9,64

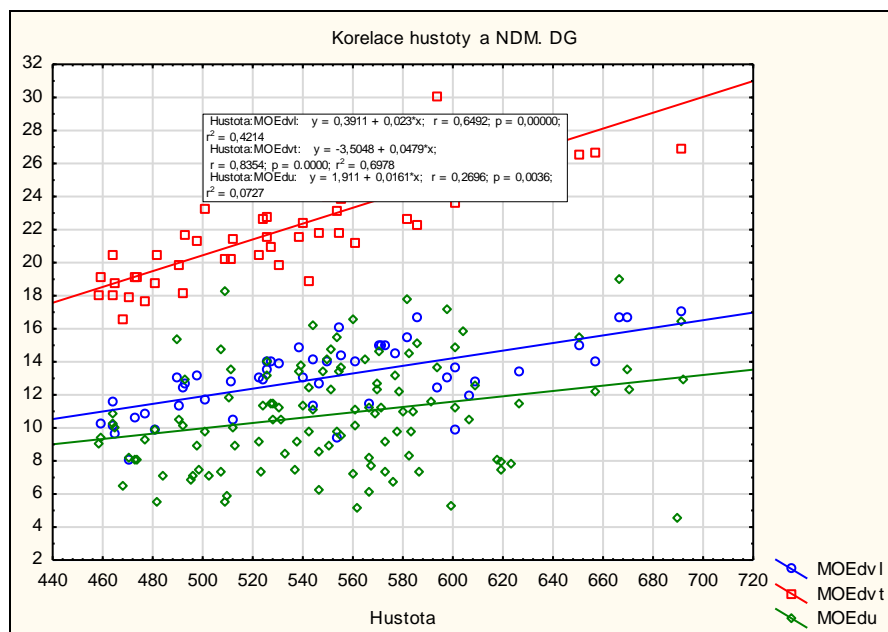
5.6 Vliv hustoty na ostatní měřené veličiny

Z tabulky 16 je vidět, že MOEs nebyl při výpočtech tolik závislý na hustotě, jak bylo očekáváno. Výsledek korelačního koeficientu 0,44 lze považovat za středně silnou závislost. Vliv hustoty na MOEdu vyšel pouze 0,28. Tento výsledek se shoduje s ostatními výsledky jiných autorů (BUCUR 2006; MISHIRO 1996). Důvodem pro tuto nízkou závislost by mohlo být, že vliv hustoty dřeva bývá potlačen vlivem stavby tělesa, především množstvím vad, rozložením letokruhů a dalších anatomických elementů (BUCUR 2006).

Tabulka 16 Vliv hustoty na měřené MOEs a MOEd

Vliv hustoty na měřené veličiny				
Měřená veličina	MOEs	MOEdu	MOEdvl	MOEdvt
Korelační koeficient r	0,44	0,28	0,65	0,84

Mnohem lépe vycházela v korelaci s hustotou akusticko-rezonanční metoda, nejvíce při měření kolmo na vlákna s korelačním koeficientem 0,84, podél vláken pak 0,65. Podobně dobré výsledky vykazují i MD 0,73 a SM 0,74, pro MOEdvt, pro MOEdvl MD 0,45 a SM 0,46. Grafické znázornění korelace hustoty a NDM pro DG je zobrazeno v grafu 6.



Graf 6 Korelace jednotlivých NDM a hustotě pro DG

5.7 Porovnání rychlostí vlny ve dřevě u UZ a rezonanční metody

Baar uvádí, že rychlost měřená ultrazvukem je v průměru o 6 % větší než u rezonanční metody (BAAR et al. 2012). Výsledky zjištěné v této práci nevykazují až takový rozdíl v rychlostech, ale stejně jako v práci Baara vykazují obě rychlosti silnou korelační závislost. V této práci vyšla závislost s korelačním koeficientem 0,71. Hassan také potvrzuje vyšší rychlost při měření UZ oproti rezonanční metodě (HASSAN 2013). Výsledky porovnání jsou zobrazeny v tabulce 17.

Tabulka 17 Průměrné hodnoty rychlosti vlny pro UZ a rezonanční metodu a jejich korelace

Srovnání rychlostí vlny pro Ultrazvuk a podélnou rezonanční metodu				
Průměry obou rychlostí	UZ	4726,9	Korelace rychlostí	0,71
	AK	4749,9		

5.8 Vliv pozice ve kmeni

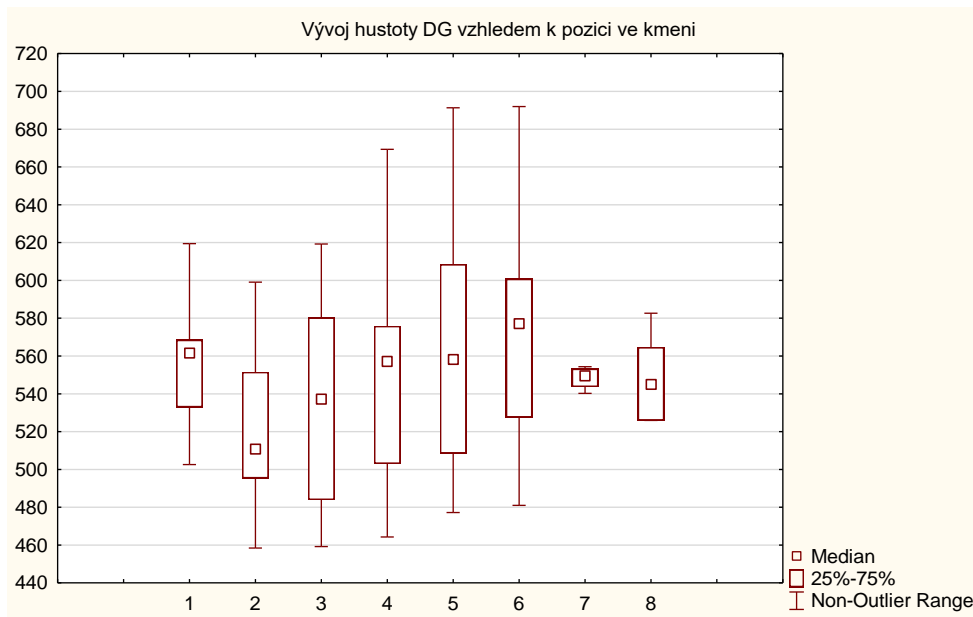
Podle očekávání měla pozice ve kmeni výrazný vliv na výsledky měření. Tabulka 18 zobrazuje závislost na pozici ve kmeni pro MOEdu, rychlost průchodu vlny ve dřevě v případě měření UZ a pevnosti v ohybu. Levý sloupec zobrazuje čísla jedna až osm, tedy vzdálenost vzorku od dřeně. U všech tří měření docházelo k nárůstu hodnot

směrem od dřene ke kůře. Zejména v případě měření MOEdu byl zjištěn značný vliv pozice ve kmeni.

Tabulka 18 Vývoj MOEdu rychlosti vlny a pevnosti v ohybu vzhledem k pozici ve kmeni

Srovnání vzhledem k pozici ve kmeni			
	MOEdu	Rychlost vlny	Ohyb
1	8,49	4093,40	60,75
2	9,51	4355,47	60,03
3	10,46	4436,21	67,58
4	11,90	4718,03	69,88
5	12,62	4641,23	92,93
6	12,76	4727,14	89,79
7	14,22	5068,03	76,55
8	14,01	5056,35	76,55

Závislost na pozici ve kmeni je do velké míry ovlivněna hustotou dřeva, která se podle předpokladů směrem od dřene ke kůře zvyšuje. Tento trend potvrzují i další autoři. (GARTNER et al. 2002; REMEŠ & ZEIDLER 2014) Graf 7 zobrazuje vývoj hustoty douglasky vzhledem k pozici ve kmeni.



Graf 7 Vývoj hustoty DG vzhledem k pozici ve kmeni

5.6 Vliv světových stran

Nebyl zjištěn významný vliv světových stran. Rozdíl v průměrné hustotě všech dřevin mezi dřevem z jižní a severní strany byl pouhých $0,3 \text{ kg.m}^{-3}$. Rozdíly v rychlostech vlny a modulech pružnosti byly zanedbatelné (tabulka 19).

Tabulka 19 Průměrné hodnoty hustoty, MOEs, MOEdu a rychlosti vlny vzhledem ke světové straně

Porovnání hodnot S a J světové strany			
	MOEs	MOEdu	Rychlost vlny
Jednotky	GPa	GPa	m.s ⁻¹
S	11,44	10,69	4482
J	11,84	10,41	4388
Rozdíl	0,4	0,28	94

6 Závěr

Cílem této práce bylo stanovit na vybraných tělesech douglasky tisolisté (*Pseudotsuga Menziesii*) dynamický modul pružnosti pomocí nedestruktivních metod, a pomocí destruktivního zkoušení statický modul pružnosti v ohybu a pevnost v ohybu. Na základě výsledků a vzájemné závislosti měřených veličin byl následně posouzen potenciál nedestruktivního měření při stanovování pevnostních a pružnostních charakteristik dřeva douglasky.

Dále byl vyhodnocen vliv dalších faktorů, především hustoty a pozice ve kmeni. Jako doplňková metoda byla použita rezonanční metoda měření, a také byl posouzen vliv světových stran na hodnocené vlastnosti dřeva.

Měření dynamického modulu pružnosti UZ metodou vykazovalo silnou závislost na statickém modulu pružnosti v ohybu. Tato závislost potvrzuje spolehlivost nedestruktivního měření a jeho dobrý potenciál pro stanovení pevnostních a pružnostních charakteristik.

Vliv hustoty na měřené vlastnosti nebyl podle očekávání zásadní. Na rychlost průchodu vlny neměla hustota téměř žádný vliv. Vztah hustoty a měření využívajících akustických vlastností dřeva vyžaduje další výzkum. Pozice vzorku ve kmeni, tedy jeho vzdálenost od dřeně, měla výrazný vliv na výsledky měření dynamického modulu pružnosti UZ metodou. Vliv světových stran nebyl prokázán. Výsledky rezonanční metody měření nevykazovaly tak silnou závislost, jako metoda UZ. Metoda měření UZ tedy vychází jako spolehlivější. Rezonanční metoda byla také mnohem více ovlivněna hustotou. Výsledky obou nedestruktivních metod měření, UZ i rezonanční byly ve shodě s výsledky v literatuře.

Ve srovnání s ostatními měřenými dřevinami, smrkem ztepilým a modřínem opadavým, vychází hodnoty douglasky dle předpokladů. Nedosahovala takových kvalit jako modřín, ale výsledky byly podstatně lepší než výsledky smrku. Douglaska se jeví jako možná částečná náhrada smrku a dřevina s vysokým potenciálem pro dřevařský průmysl.

7. Použitá literatura

ALDEN, H. A. *Softwoods of North America*. Madison: U. S. Department of Agriculture, 1997. 151 s.

BAAR, J.; TIPPNER, J.; GRYC, V. The influence of wood density on longitudinal wave velocity determined by the ultrasound method in comparison to the resonance longitudinal method. *Eur. J. Wood Prod.* 2012, vol. 70, s. 767-769. DOI 10.1007/s00107-011-0550-2.

BAAR, J.; TIPPNER, J.; RADEMACHER, P. Prediction of mechanical properties-modulus of rupture and modulus of elasticity-of five tropical species by nondestructive methods. *Ciencia y tecnología*. 2015, vol. 17, no. 2, s. 239-252. DOI 10.4067/S0718-221X2015005000023.

BEALL, F. C. Overview of the use of ultrasonic technologies in research on wood properties. *Wood Science and Technology*. 2002, vol. 36, s. 197-212. DOI 10.1007/800226-002-0138-4.

BEALL, F. C.; WILCOX, W. W. Relationship of acoustic emission during radial compression to mass loss from decay. *Forest Products Journal*. 1987, vol. 37, no. 4, s. 38-42.

BERAN, F.; ŠINDELÁŘ, J. Outlooks of some exotic species in the forest management of the Czech republic. *Lesnictví-UZPI*. 1997, vol. 42, no. 8, s. 337-355. ISSN 0024-1105.

BLAŠČÁK, V. Zkušenosti s pěstováním douglasky tisolisté na LS Vodňany. *Lesu zdar*. 2003, no. 12.

BORMANN, B. T. *Douglas-fir an American wood*. Washington D.C.: USDA Forest Service. 1984, 7 s.

BUCUR, V. *Acoustics of Wood*. 2. vyd. Berlin: Springer Verlag, 2006. 393 s. ISBN 978-3-540-26123-0.

BUČAR, D. G.; BUČAR, B. Strength grading of structural timber using the single mode transverse damped vibration method. *Wood Research*. 2011, vol. 56, no. 1, s. 67-76.

ČSN 49 0108. *Drevo: Zisťovanie hustoty*. Praha: Úřad pro normalizaci a měření, 1993. 8 s.

ČSN 49 0115. *Drevo. Zisťovanie medze pevnosti v statickom ohybe*. Praha: Úřad pro normalizaci a měření, 1979. 8 s.

DOLEJSKÝ, V. Pěstování douglasky tisolisté v podmínkách ŠLP ML Křtiny MENDELU. In *Douglaska, dřevina roku 2014: Sborník z konference: Zámek Křtiny, 2. – 3. 9. 2014*. Brno: Česká lesnická společnost. 2014, s. 9-12. ISBN 978-80-02-02537-5.

DUNLOP, J. I. Testing of Poles by Acoustic Resonance. *Wood Science and Technology*. 1983, vol. 17, s. 31-38.

FALK, R. H.; PATTON-MALLORY, M.; MCDONALD, K. A. Nondestructive testing of wood products and structures: state-of-the-art and research needs. In DOE REIS, H. (ed.). *Nondestructive testing and evaluation for manufacturing and construction: Proceedings of conference, August 9-12 1988*. Champaign, IL. New York: Hemisphere Publishing Corp., 1990, s. 137-147.

FEIO, A. O. *Inspection and Diagnosis of Historical Timber Structures: NDT Correlations and Structural Behaviour*. Ph. D. thesis. Guimaraes, 2005. 208 s.

FERRON, J. L.; DOUGLAS, F. Douglas-fir in France: history, recent economic development, overviews for the future. In *Opportunities and risks for Douglas fir in a changing climate*. Freiburg: Berichte Freiburger Forstliche Forschung, 2010, 85: XI.

FOREST SERVICE US DEPARTMENT OF AGRICULTURE. *Wood Handbook: Wood as an Engineering Material*. WI: Madison, 1999. 508 s. ISBN 978-1-59124-170-6.

GALLIGAN, W. L.; SNODGRASS, D.V.; CROW, G.W. *Machine stress rating: practical concerns for lumber producers*. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1977.

GANDELOVÁ, L.; HORÁČEK, P.; ŠLEZINGEROVÁ, J. *Nauka o dřevě*. 3. nezměněné vyd. Brno: Mendelova univerzita, 2014. 176 s. ISBN 978-80-7375-312-2.

GARTNER, G.L.; NORTH, E.M.; JOHNSON, G.R.; SINGLETON, R. Effects of live crown on vertical patterns of wood density and growth in Douglas-fir. *Canadian Journal of Forest Research*. 2002, vol. 32, no. 3, s. 439-447.

GIAGLI, K.; TIMKO, L.; GRYC, V.; VAVRIK, H. Is the Quality of the Non-native Douglas-fir Wood Produced in the Czech Forests Comparable to Native Softwoods? *Web of Science*. 2019, vol. 14, no. 2, s. 2931-2945. DOI 10.15376/biores.14.2.2931-2945.

HASSAN, K. T. S. *Nondestructive Evaluation of Wood, Disertační práce*. Brno, 2013. 110 s.

HASSAN, K. T. S.; HORÁČEK, P.; TIPPNER, J. Evaluation of stiffness and strength of Scots pine wood using resonance frequency and ultrasonic techniques. *BioRes*. 2013, vol. 13, no. 9, s. 1634-1645.

HOLEČEK, T.; GAŠPARÍK, M.; LAGAŇA, R.; BORŮVKA, V.; OBERHOFNEROVÁ, E. Measuring the Modulus of Elasticity of Thermally Treated Spruce Wood using the Ultrasound and Resonance Methods. *BioResources*. 2017, vol. 12, no. 1, s. 819-838.

HORÁČEK, P.; TIMKO, L. Stavba a vlastnosti dřeva douglasky tisolisté (*Pseudotsuga menziesii* /Mirb/Franco). In *Douglaska, dřevina roku 2014*. Sborník z konference: Zámek Křtiny, 2. – 3. 9. 2014. Brno: Česká lesnická společnost. 2014, s. 118-126. ISBN 978-80-02-02537-5.

CHVOJKA, J. *Vybrané fyzikální vlastnosti dřeva douglasky z lokalit v České republice, Diplomová práce*. Praha, 2016. 73 s.

ILIC, J. Dynamic MOE of 55 species using small wood beams. *Holz als Roh und Werkstoff*. 2003, vol. 61, s. 167-172. DOI 10.1007/800107-003-0367-8.

KANTOR, P.; KNOTT, R.; MARTINIK, A. Production capacity of Douglas Fir (*Pseudotsuga menziesii* [Mirb.] Franco) in a mixed stand. *Web of Science*. 2001, vol. 20, s. 5-14. ISSN 1335-342X.

KASAL, B.; LEAR, G.; & TANNERT, T. Stress Waves: In Situ Assessment of Structural Timber. *Springer Netherlands*. 2011, s. 5-24.

KLOIBER, M. *Nedestruktivní zjišťování vlastností dřeva, Disertační práce*. Brno, 2007. 208 s.

KOLEKTIV AUTORŮ. *Dřevařská technická příručka*. 1. vyd. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1970. 748 s.

KOLLMANN, F. F. P.; CÔTÉ, W. A. *Principles of Wood Science and Technology: Solid wood*. Berlin: Springer Verlag, 1968. 592 s.

KUBEČEK, J.; ŠTEFANČÍK, I.; PODRÁZSKÝ, V.; LONGAUER, R. Výsledky výzkumu douglasky tisolisté (*Pseudotsuga menziesii*/Mirb./Franco) v České republice a na Slovensku – přehled. *Lesnický časopis – Forestry Journal*. 2014, vol. 60, s. 116-124. DOI 10.2478/forj-2014-0012.

LAGAÑA, R.; ROHANOVÁ, A. Predikcia modulu pružnosti v ohybe akustickými charakteristikami. *Acta facultatis xylogologiae Zvolen*. 2014, vol. 56, no. 1, s. 5-12.

LIU, Y.; GONG, M.; LI, L.; CHUI, Y. H. Width effect on the modulus of elasticity of hardwood lumber measured by non-destructive evaluation techniques. *Constr. Build. Mater*. 2014, vol. 50, s. 276-280. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2013.09.029.

Matovič, A. *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva a materiálů na bázi dřeva*. Brno: Vysoká škola zemědělská, 1993. 212 s. ISBN: 80-7157-086-9

MAUER, O.; RUDOŠ, J.; SYCHRA, D. Růst a stabilita douglasky tisolisté (*Pseudotsuga menziesii* /Mirb/Franco) na zemědělských půdách. In: *Sborník*

z konference „Douglaska, dřevina roku 2014“. Brno: Česká lesnická společnost. 2014, s. 82-92. ISBN 978-80-02-02537-5.

MISHIRO, A. Effect of density on ultrasound velocity in wood. *Mokuzai Gakkaishi*. 1996, vol. 42, no. 9, s. 887-894.

PAGAN, J. *Lesnická dendrologia*. Zvolen: Lesnická univerzita ve Zvolene, 1999. 378 s. ISBN: 80-228-0821-0.

PODRÁZSKÝ, V. Potential substitution of norway spruce by the Douglas-fir in the Czech republic. *Web of Science*. 2016, s. 99-104. ISBN 978-80-7417-112-3.

PODRÁZSKÝ, V.; MARTINÍK, A.; MATĚJKA, K.; VIEWEGH, J. Effects of Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* [Mirb.] Franco) on understory layer species diversity in managed forests. *J. For. Sci.* 2014, vol. 60, s. 263–271.

PODRÁZSKÝ V.; REMEŠ J.; LIAO, CH.Y. Vliv douglasky tisolisté (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb./Franco) na stav humusových forem lesních půd – srovnání se smrkem ztepilým. *Zprávy lesnického výzkumu*. 2002c, vol. 46, s. 86-89.

POŽGAJ, A.; CHOVANEC, D.; KURJATKO, S.; BABIAK, M. *Štruktúra a vlastnosti dreva*. 2. vyd. Bratislava: Príroda, 1997. 488 s. ISBN 80-07-00960-4.

REMEŠ, J.; PODRÁZSKÝ, V.; HART, V. Růst a produkce nejstaršího porostu douglasky tisolisté (*Pseudotsuga menziesii*/ Mirb/Franco) na území ŠLP Kostelec nad Černými lesy. In *Sborník referátů Douglaska a jedle obrovská – opomíjené giganti*. Praha: ČZU, 2006, s. 65-69.

REMEŠ, J.; ZEIDLER, A. Production potential and wood quality of Douglas fir from selected sites in the Czech republic. *Wood Research*. 2014, vol. 59, no. 3, s. 509-520.

ROSS, R. J.; PELLERIN, R. F. *Nondestructive Evaluation of Wood*. Madison: Forest Products Society, 2002. 210 s.

ROSS, R. J.; PELLERIN, R. F. *Nondestructive Testing for Assessing Wood Members in Structures: A Review*. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1994. 40 s.

SAID, M. N. *Moisture Measurement Guide for Building Envelope Applications: Research Report*. Canada: Institute for Research in Construction, National Research Council, 2004. 34 s.

SENALIK, C. A.; SCHUENEMAN, G.; ROSS, R. J. *Ultrasonic-Based Nondestructive Evaluation Methods for Wood*. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2014. 31 s.

SCHWARZER, M. *Vliv variability stavby rezonančního dřeva na jeho akustické vlastnosti, Diplomová práce*. Brno, 2014. 84 s.

SLODIČÁK, M.; MAUER, O.; PODRÁZSKÝ, V.; ŠIMERDA, V. Představení projektu „Pěstební postupy při zavádění douglasky do porostních směsí v podmínkách ČR“ (NAZV QI112A172). In NOVÁK, J.; SLODIČÁK, M.; NOVÁK, F. *Douglaska tisolistá-Příměstské lesy: Sborník přednášek odborného semináře s venkovními ukázkami*. Opočno: VÚLHM, 2013, s. 4-6. ISBN 978-80-7417-068-3.

ŠKORPÍK, P.; KONRAD, H.; GEBUREK, T.; SCHUH, M.; VASOLD, D.; EBERHARDT, M.; SCHUELER, S. Solid Wood Properties Assessed by Non-Destructive Measurements of Standing European Larch (*Larix decidua* Mill.): Environmental Effects on Variation within and among Trees and Forest Stands. *Forests*. 2018, vol. 276, no. 9, s. 1-13. DOI 10.3390/f9050276.

ŠKVOR, Z. *Elektroakustika a akustika*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 2012. 574 s. ISBN 978-80-01-05034-7.

UGOLEV, V.L. *Drevesinovedenje s osnovami lesnovo tovarovenija*. Moskva, 1986. 365 s.

VAFI, A.; FARSHAD, M.; AHMADIEH, A. Determination of modulus of elasticity of wood from vibrating reed measurements. *Fibre Sci. Technol.* 1976, vol. 9, no. 1, s. 1-10. DOI 10.1016/0015-0568(76)90019-1.

VALÁŠKOVÁ, R. *Posouzení pružnostních a pevnostních vlastností neupraveného a termicky upraveného dřeva douglasky, Bakalářská práce*. Praha, 2015. 75 s.

VEJPUSTKOVÁ, M.; ČIHÁK, T. Climate response of Douglas fir reveals recently increased sensitivity to drought stress in central Europe. *Forests*. 2019, vol. 97, no. 10, s. 1-17. DOI 10.3390/f10020097.

VĚTVIČKA, V. *Evropské stromy*. 1. vyd. Praha: Aventinum, 1999. 216 s. ISBN 80-7151-104-8.

WAGENFÜHR, R. *Holzatlas*. Leipzig: Fachbuchverlag, 2000. 707 s. ISBN 978-3446213906.

ZÁRUBA, V.; ZÁRUBA, J. Zkušenosti se zpracováním dřeva douglasky. In *Douglaska, dřevina roku 2014*. Sborník z konference: Zámek Křtiny, 2. – 3. 9. 2014. Brno: Česká lesnická společnost. 2014, s. 133-140. ISBN 978-80-02-02537-5.

ZEIDLER, A. *Přínos perspektivních introdukovaných dřevin z hlediska vlastností dřeva, Habilitační práce*. Praha, 2013. 187 s.

ZEIDLER, A.; BORŮVKA, V.; SCHÖNFELDER, O. Comparison of Wood Quality of Douglas Fir and Spruce from Afforested Agricultural Land and Permanent Forest Land in the Czech Republic. *Forests*. 2017, vol. 13, no. 9, s. 1-12. DOI 10.3390/f9010013.

ZEIDLER, A.; ŠEDIVKA, P. Influence of selected factors on wood density variability in grand fir (*Abies grandis*/Douglas/Lindl.). *Wood Research*. 2015, vol. 60, no. 1, s. 33-44.

ZHANG, H. J.; CUI, Y. Y.; WANG, C. Z.; SU, J. Determining modulus of elasticity of structural lumber with vibration methods. *Key Eng. Mat.* 2009, s. 407-408, 521-527. DOI 10.4028/www.scientific.net/KEM.407-408.521.

7.1 Seznam internetových zdrojů

FAKOPP Ultrasonic timer user's guide [online]. [cit. 28. 4. 2020]. Dostupné z WWW: <<https://www.fakopp.com/en/product/ultrasonic/>>.

KERLES, M. Zázračný "hudební" smrk mizí z českých lesů. *Silvarium.cz* [online]. 2007-18-01 [cit. 27-04-2020]. Dostupné z WWW:< <http://www.silvarium.cz/zpravy-z-oboru-lesnictvi-a-drevarstvi/zazracny-hudebni-smrk-mizi-z-ceskych-lesu-lidove-noviny>>.

KUKLÍK, P.; HASNÍKOVÁ, H. Metody pro zjišťování spolehlivosti historických dřevěných konstrukcí. *TZB-info* [online]. 2013-18-03 [cit. 27-04-2020]. Dostupné z WWW:< <https://stavba.tzb-info.cz/drevene-konstrukce/9669-metody-pro-zjistovani-spolehlivosti-historickych-drevenych-konstrukci>>.

MÖLLEROVÁ, J. Po kom se jmenuje douglaska. *Lesnická práce: časopis pro lesnickou vědu a praxi* [online]. 2012 [cit. 27-04-2020]. Dostupné z WWW:< <http://www.lesprace.cz/casopis-lesnicka-prace-archiv/rocnik-91-2012/lesnicka-prace-c-5-12/po-kom-se-jmenuje-douglaska>>.

URL 1 - <https://stavba.tzb-info.cz/drevene-konstrukce/9669-metody-pro-zjistovani-spolehlivosti-historickych-drevenych-konstrukci> (27.4.2020)

URL 2 - <https://westernconifers.files.wordpress.com/2013/05/map-douglas-fir.jpg> (27.4.2020)