

**Česká zemědělská univerzita v Praze**

Fakulta lesnická a dřevařská

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů



**Vliv vlhkosti na vybrané elastické ohybové  
charakteristiky bukového a smrkového dřeva**

Bakalářská práce

Autor: Pavlína Flamíková

Vedoucí práce: Ing. Adam Sikora, Ph.D.

2022

---

# ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta lesnická a dřevařská

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Pavλίna Flamíková

Dřevařství

Dřevařství

Název práce

**Vliv vlhkosti na vybrané elastické ohybové charakteristiky bukového a smrkového dřeva**

Název anglicky

**The effect of moisture on the selected elastic bending characteristics of beech and spruce wood**

---

### Cíle práce

Cílem bakalářské práce je posouzení vlivu vlhkosti dřeva v rozsahu od 0 do 30% na vybrané elastické ohybové charakteristiky bukového a smrkového dřeva. Vybrané ohybové charakteristiky budou zjišťovány pomocí čtyřbodového ohybu dle příslušné normy. Výsledkem práce bude posouzení změny elastických ohybových charakteristik s nárůstem vlhkosti v bukovém a smrkovém dřevě.

### Metodika

1. Literární rozbor problematiky vlivu vlhkosti dřeva na mechanické vlastnosti.
2. Navržení metodiky tvorby zkušebních těles a jejich testování.
3. Experimentální zjištění vlivu vlhkosti na vybrané elastické ohybové charakteristiky.
4. Statistické vyhodnocení a na základě zjištěných dat kvantifikace vlivu vlhkosti na sledované ohybové charakteristiky.
5. Práci čleňte do standardních kapitol – úvod, literární rozbor, cíl práce, materiál a metodika, výsledky, diskuze, závěr, použitá literatura a souhrn.

Harmonogram práce:

1. červenec – srpen 2020: Tvorba koncepčního přístupu k řešení práce
2. září – říjen 2020: Tvorba literární rešerše podle schválené koncepce řešení práce

3. listopad – prosinec 2020: Příprava materiálu a dalších nezbytných prvků před experimentálním měřením a tvorba metodiky práce.

4. leden – únor 2021: experimentální měření

5. březen 2021: Vyhodnocení měřených výsledků

6. duben 2021: Dokončení a odevzdání závěrečné práce



---

**Doporučený rozsah práce**

40 stran

**Klíčová slova**

buk, smrk, čtyřbodový ohyb, vlhkost, elastické vlastnosti

---

**Doporučené zdroje informací**

1. Kurjatko S, Čunderlík I, Dananajová J, Dibdiaková J, Dudas J, Gáborík J, et al. Wood quality parameters determining its end use. In: Makovíny Ivan, Šteller Štefan, editors. Technical University in Zvolen. Slovakia; 2010. 352 p [in Slovak].
2. Dubovský J, Babiak M, Čunderlík I. Textura, Štruktúra a užitkové vlastnosti dreva. In: Štefan Šteller, Rčková Dana, editors. Technical University in Zvolen. Slovakia; 2003. 107 p. [in Slovak].
3. Požgaj A, Chovanec D, Kurjatko S, Babiak M. Structure and properties of wood, 2nd ed., Příroda, Bratislava, Slovakia; 1997. 485 p [in Slovak].
4. M. Babiak, M. Gaff, A. Sikora, Š. Hysek Modulus of elasticity in three- and four-point bending of wood Compos. Struct., 204 (2018), pp. 454-465,
5. M. Gaff, M. Babiak, V. Vokatý, M. Gašparík, D. Ruman Bendability characteristics of hardwood lamellae in elastic region Compos Part B: Eng, 116 (2017), pp. 61-75,

---

**Předběžný termín obhajoby**

2020/21 LS – FLD

**Vedoucí práce**

Ing. Adam Sikora

**Garantující pracoviště**

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů

**Konzultant**

doc. Ing. Milan Gaff, PhD.

---

Elektronicky schváleno dne 8. 7. 2020

**Ing. Radek Rinn**

Vedoucí ústavu

---

Elektronicky schváleno dne 21. 10. 2020

**prof. Ing. Róbert Marušák, PhD.**

Děkan

V Praze dne 03. 04. 2022

---

### **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Vliv vlhkosti na vybrané elastické ohybové charakteristiky bukového a smrkového dřeva“ vypracovala samostatně pod vedením Ing. Adama Sikory, Ph.D. použila jen prameny, které uvádím v seznamu použitých zdrojů.

Jsem si vědoma, 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 3. 4. 2022

.....

Podpis autora

## **Poděkování**

Ráda bych poděkovala panu Ing. Adamovi Sikorovi, Ph.D., za odborné vedení, podnětné rady a také čas, který mi investoval, dále také fakultě FLD za zpřístupnění laboratoří, pro měření na této práci a za odbornou technickou pomoc a pomoc při měření Ing. Tomáši Holečkovi.

## Abstrakt

Vlhkost ovlivňuje velmi důležité vlastnosti dřeva, na příklad pružnost, pevnost nebo hustotu. Do značné míry i snižuje kvalitu těchto vlastností. Tato práce je zaměřena na smrkové a bukové dřevo a na to, jak jej vlhkost ovlivňuje. Smrkové dřevo je jedno z nejdostupnějších a nejvyužívanějších druhů dřeva v oblasti stavebnictví nebo nábytku. Dřevo bukové se ve velkém množství využívá při výrobě ohýbaného nábytku či aglomerovaných materiálů, z tohoto důvodu má na oba druhy vlhkost velký vliv, co se týče využití i případných modifikací. Vliv vlhkosti byl zkoumán při vlhkosti v absolutně suchém stavu (0 %), dále při 12% vlhkosti a v BNV. Vlhkosti v těchto tří relacích byly analyzovány v zatížení čtyřbodovým ohybem v tangenciálním směru se zaměřením na elastickou oblast. Práce řeší vliv vlhkosti na silově průhybový diagram při tomto typu namáhání. Konkrétně se práce zaměřuje na elastický potenciál a modul pružnosti. Modul pružnosti je vnitřní odpor proti vnějšímu zatížení v oblasti elastických deformací, čím větší je vnitřní odpor, tím větší napětí je potřebné ke vzniku deformace. Elastický potenciál je energie potřebná pro vznik deformací do bodu meze úměrnosti. V silově deformačním diagramu se elastický potenciál nachází pod jeho pružnou částí. Pro modul pružnosti i elastický potenciál se v praxi užívá jednotka MPa. Výsledky analýzy vypovídají o tom, že s rostoucí vlhkostí hodnoty obou sledovaných charakteristik klesaly. Podobný průběh poklesu byl zaznamenán u elastického potenciálu, u modulu pružnosti se průběh poklesu lišil především u vlhkostí 0 a 12 %.

### Klíčová slova

buk, smrk, čtyřbodový ohyb, vlhkost, elastické vlastnosti

## **Abstract**

The moisture affects fundamental properties of wood, such as elasticity, strength, and density. Moisture also dramatically reduces the quality of these properties. This work is focused on spruce and beech wood and the effect of moisture on it. Spruce wood is one of the most accessible and most used types of wood in construction and furniture production. Beech wood is widely used in the production of bentwood furniture or agglomerated materials; for this reason, moisture significantly impacts both types of wood in terms of use and following modifications. The effect of humidity was investigated in the absolutely dry state (0%), then at 12% moisture, and at the point of fiber saturation. A four-point bend analysed moisture at these three points in the tangential direction focusing on the elastic region. The work deals with the influence of moisture on the force-deflection diagram at this type of stress. Specifically, the work will focus on the elastic potential and modulus of elasticity. The modulus of elasticity is the internal resistance to external loads in the region of elastic deformations; the more significant the internal resistance, the bigger the stress required to induce deformation. The elastic potential is the energy needed to create deformations up to the point of proportionality. In the force-deformation diagram, the elastic potential is below the elastic part. The MPa unit is used for both the modulus of elasticity and the elastic potential. The analysis results show that the values of both monitored characteristics decreased with increasing moisture. A similar course of decline was recorded for the elastic potential. For the modulus of elasticity, the course of the decrease differed mainly at 0 and 12 % moisture.

## **Keywords**

Beech, spruce, four-point bend, moisture, elastic properties



## Obsah

Seznam tabulek.....	11
Seznam obrázků.....	12
Seznam grafů.....	13
Cíle práce .....	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
Úvod .....	15
1 Rozbor problematiky.....	17
1.1 Stavba dřeva .....	17
1.2 Struktura dřeva.....	17
1.4 Vliv struktury na mechanické vlastnosti .....	20
1.5 Voda ve dřevě .....	20
1.6 Vztah mezi vodou a dřevem .....	21
1.7 Vlhkost dřeva.....	23
1.7.1 Faktory ovlivňující vlhkost dřeva .....	25
<b>1.8 Metody zjišťování vlhkosti dřeva.....</b>	<b>26</b>
1.10 Fyzikální vlastnosti dřeva .....	27
1.11 Mechanické vlastnosti.....	27
Mechanické namáhání .....	28
2 Metodika .....	35
2.1 Příprava vzorků.....	35
2.2 Třídění vzorků .....	35
2.2 Klimatizování/sušení .....	36
2.3 Zkouška.....	37
3 Výsledky a diskuse .....	40
3.1 Elastický potenciál .....	40
3.2 Modul pružnosti.....	42
3.3 Analýza průhybů .....	43

3. 4 Analýza působících sil .....	44
4 Závěr .....	45
5 Použité zdroje .....	47

## **Seznam tabulek**

Tabulka 1 Průměry vybraných charakteristik bukového dřeva .....	40
Tabulka 2 Průměry vybraných charakteristik smrkového dřeva .....	40
Tabulka 3 Výsledky Duncanova testu pro elastický potenciál.....	41
Tabulka 4 Výsledky Duncanova testu pro modul pružnosti.....	42

## Seznam obrázků

Obrázek 1 Struktura buněčné stěny .....	18
Obrázek 2 Rovnovážná vlhkost dřeva .....	23
Obrázek 3 Porovnání MNBS a vlhkosti dřeva při 0 %vlhkosti .....	24
Obrázek 4 Čtyř a tříbodový ohyb .....	32
Obrázek 5 Označený vzorek pro provedení kontrolních měření .....	35
Obrázek 6 Popis rozměrů testovaných vzorků .....	36
Obrázek 7 Vzorky po dokončení sušícího procesu .....	36
Obrázek 8 Průběh zkoušky.....	37

## Seznam grafů

Graf 1 Silově průhybový diagram v ohybu .....	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
Graf 2 Napětově deformační diagram .....	34
Graf 3 Vliv vlhkosti na elastický potenciál .....	41
Graf 4 Vliv vlhkosti na modul pružnosti.....	42
Graf 5 Vliv nárůstu vlhkosti na průhyb v mezi úměrnosti a v průhybu lomu .....	44
Graf 6 Vliv nárůstu vlhkosti na sílu v mezi kluzu a ve směru průhybu.....	45

## Seznam zkratek a symbolů

BNV	bod nasycení vláken
MNBS	mez nasycení buněčných stěn
MH	mez hygroskopicity
ČSN	česká technická norma
EN	evropská norma
MPa	megapascal
mm	milimetr
°C	stupeň Celsia
kN	kilonewton
N	Newton
$Y_P$	průhyb lomu
$Y_E$	průhyb na mezi úměrnosti
$F_P$	síla ve směru průhybu
$F_E$	síla ne mezi kluzu
$\alpha$	hladina statistické významnosti
s	sekunda
mm <sup>2</sup>	milimetr čtvereční
OH	hydroxylová skupina
kg.m <sup>-3</sup>	kilogram na metr krychlový
MAX	maximum
MIN	minimum
$\varepsilon$	poměrná deformace
T	smykové napětí

## Úvod

Dřevo je vzhledem k jeho charakteristikám skvělý přírodní materiál s vícestranným využitím. Jeho využití je nejen ve dřevozpracujícím průmyslu velmi univerzální, navíc se jedná o obnovitelný zdroj. Dřevo jako materiál má své klady i zápory. Významnou vlastností dřeva je i jeho vlhkost, která má velký vliv na jeho mechanické vlastnosti.

Dřevo je vzhledem k jeho charakteristikám skvělý přírodní materiál s vícestranným využitím, využití nachází například ve stavebnictví, při výrobě nábytku, papíru apod. V našich podmínkách se pro konstrukční a nábytkářskou výrobu využívá dřevo smrku a buku, především pro jeho dobrou dostupnost a dobré mechanické vlastnosti. Proto je dobré znát chování elastických vlastností s narůstající vlhkostí. Kromě jeho přirozených a žádoucích vlastností jako jsou poměrně dobré pevnostní a elastické charakteristiky vzhledem k jeho hustotě, má dřevo i řadu nevýhod (Gaff a kol. 2019). Tyto nevýhody do jisté míry zapříčiňuje vliv vlhkosti na dřevo. S rostoucí vlhkostí dochází například ke snížení elastických vlastností, tato práce je konkrétně zaměřena na ovlivnění silově-průhybových diagramů při narůstající vlhkosti od 0 do 30 %. V návaznosti na to je řešena problematika změny elastického potenciálu a modulu pružnosti v třech vlhkostních relacích (0 %, 12 %, vlhkost při BNV).

ednotlivé analýzy byly provedeny na základě zkoušky ve čtyřbodovém ohybu. Pro charakteristiky modulu pružnosti je zpracováno již mnoho publikací, ze kterých vyplývá, že modul pružnosti klesá s rostoucí vlhkostí, podobně tomu je i v této práci. Naopak elastický potenciál je jednou z charakteristik, které se mnoho autorů příliš nevěnuje, přesto ze zdrojů prozatím dostupných je možné zjistit, že elastický potenciál má podobný charakter při nárůstu vlhkosti, jako modul pružnosti. Jeho spád je ale více strmý. Což dokládají i data z analýz této práce. Tato práce by mohla být prospěšná, pro další vyhodnocování těchto charakteristik například při základních nebo hraničních hodnotách vlhkosti.

## **Cíle práce**

Cílem práce je posoudit vliv vlhkosti ve vlhkostních relacích - 0, 12 a 30 %. Vliv bude posuzován u vybraných elastických charakteristik bukového a smrkového dřeva. Tyto vybrané charakteristiky budou zjišťovány na základě analýzy silově průhybových diagramů při čtyřbodovém ohybu. Zkouška bude provedena dle předpisů příslušné normy. Ve výsledcích bude pomocí několika analýz vyhodnocen vliv konkrétních ohybových charakteristik při vlhkostech 0-30 % u bukového a smrkového dřeva.



# 1 Rozbor problematiky

## 1.1 Stavba dřeva

Dřevo patří mezi obnovitelné přírodní materiály, jako materiál má mnoho výhod, které provází i nevýhody. To je v některých případech způsobeno například tím, že jde o anizotropní materiál. Anizotropie dřeva znamená, že jeho vlastnosti se liší podle geometrického směru dřeva, ze kterého je zrovna zkoumáme. (Unive 2011).

Tyto různé vlastnosti jsou způsobeny různým uspořádáním stavebních elementů dřeva, z nichž je složeno. Ty vytvářejí anatomickou strukturu dřeviny, která se označuje jako stavba dřeva. Stavba je u každé dřeviny charakteristická, tudíž podle ní můžeme na makroskopické i mikroskopické úrovni určit o jakou dřevinu se jedná (Friess a kol. 2008).

## 1.2 Struktura dřeva

Struktura dřeva je jedním z hlavních prvků, dle kterého rozdělujeme dřeviny na listnaté a jehličnaté, ty pak dále rozdělujeme podle dalších strukturálních znaků: (Požgaj a kol. 1997).

Listnaté dřeviny

- Kruhovitě pórovité
- Roztroušeně pórovité

Jehličnaté dřeviny

- S pryskyřičnými kanálky
- Bez pryskyřičných kanálků

Tyto znaky jsou viditelné i pouhým okem, spadají tedy do kategorie makroskopické hladiny, kterou doplňují hladiny submikroskopická a mikroskopická. Ty můžeme pozorovat pod mikroskopem. Mikroskopická hladina nám už říká více, nejen o přesném druhu dřeva, ale také o jeho mechanických, fyzikálních nebo chemických vlastnostech. Poznatky z této hladiny mohou být následně využity při práci s dřevním materiálem, nebo materiálem na jeho bázi. Již z předešlých výzkumů a testů víme, jak se které

materiály budou chovat, při určitých vlhkostních stupních, zatěžování a podobně (Požgaj a kol. 1997, Němec, 2005).

### **Makroskopická hladina:**

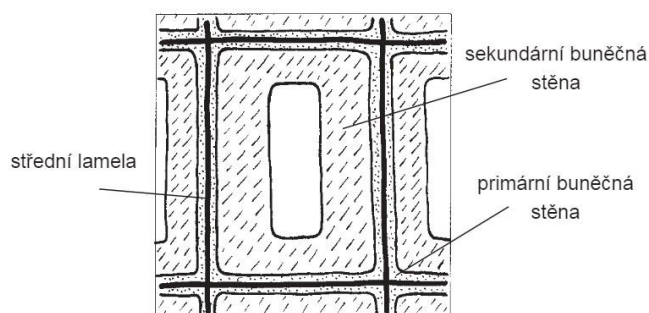
Znaky na této hladině můžeme určovat pouhým okem, případně s lupou. Tvoří na povrchu dřeva charakteristické kresby jednotlivých dřevin, které jsou dány jejich jedinečnými znaky. Mezi makroskopické znaky patří: letokruhy, dřeň, dřeňové paprsky a skvrny, dále cévy (listnaté dřeviny), pryskyřičné kanálky (jehličnaté dřeviny), jádro a běl (Vavřík, 2004).

### **Mikroskopická hladina**

Jednotlivé typy znaků této hladiny není možné pozorovat pouhým okem, k jejich pozorování je potřeba mikroskopu. Zkoumáme je na zhotovených preparátech, kde můžeme pozorovat různé soubory těchto anatomických znaků. I na této hladině posuzujeme všechny tři druhy řezů. Zkoumané prvky mikroskopické hladiny jsou: tracheje, tracheidy, parenchymatické buňky, sklerenchymatické buňky atd. (Vavřík, 2004).

### **Submikroskopická hladina**

Na úrovni této hladiny se zabýváme popisem stavby buněčných stěn. Stavba této stěny není jednolitá, ale je tvořena několika vrstvami (primární buněčná stěna, sekundární buněčná stěna, střední lamela). Mezi jednotlivými vrstvami jsou znatelné rozdíly nejen v jejich tloušťce. Rozdílné jsou především v rozdílném obsahu hlavních stavebních složek dřeva. Ve směru do sekundární buněčné stěny od střední lamely se například zvedá procentuální zastoupení celulózy a klesá zastoupení ligninu (Friess a kol. 2008).



Obrázek 1 Struktura buněčné stěny (Friess a kol. 2008)

### **1.3 Chemické složení dřeva**

Z chemického hlediska je dřevo organický materiál, který nejvíce ovlivňují tři dominantní složky. Dvě složky jsou látky molekulární (celulóza a hemicelulóza), třetí látkou je lignin, který je látkou amorfní (Adamíček 2022).

#### **Celulóza**

Tato látka vzniká z glukózy, která je produkována listy. Ve dřevě má největší procentuální zastoupení, které činí asi 50 % celé dřevní hmoty. Násobná řetězová struktura zapříčiňuje vláknitost celulózy, což dává dřevu dobré pevnostní vlastnosti ve směru těchto vláken. Tato pevnost dává dřevu možnost uspokojivě odolávat chemikáliím. Odolnost celulózy vůči chemikáliím je tak vysoká, že je možné ji štěpit pouze za pomoci některých kyselin (Adamíček 2022).

#### **Hemicelulózy**

Podobně jako celulóza vznikají z různých cukrů a je vláknité struktury. Jejich vlákna jsou ovšem znatelně kratší. Zkrácení vláken proti celulóze způsobuje nižší pevnost i odolnost k chemikáliím. Je možné je tedy štěpit i za pomoci některých zásad, ne pouze kyselin. Ze tří uvedených složek mají hemicelulózy nejmenší procentuální zastoupení, které se pohybuje v rozmezí od 22 do 28 %. Ve dřevě jsou hemicelulózy spjaty s celulózou, kterou obaluje (Bodig a Jayne 1993).

#### **Lignin**

Je to druhá nejvíce zastoupená složka v dřevní hmotě, tvoří kolem 26 – 35 % této hmoty. Tuto amorfní látku lze označit za přírodní tmel. Lignin se prolíná mezi vláknitými buňkami celulózy a hemicelulózy, a tak vyplňuje prázdné prostory. S vyšším množstvím ligninu je dřevo lépe tvárné, především po zahřátí, kterého se užívá především u ohýbaní. Kupříkladu buk je obzvláště bohatý na lignin, takže se hojně využívá pro výrobu ohýbaných dílců. Lignin je také velice málo chemicky odolný (Klonová, 2021).

#### **Ostatní látky**

K těmto látkám patří některé alkaloidy, pryskyřice a třísloviny. Tyto látky se nepodílí na stavbě dřevní hmoty. Vliv na vlastnosti materiálu mají značně

menší než například výše zmíněná celulóza nebo lignin. Tyto látky příznivě ovlivňují odolnost proti biotickým činitelům, ale mají i nepříznivé vlastnosti, jako například pryskyřice. Pryskyřice značně ztěžuje zpracování dřeva a velká ložiska pryskyřic se musí z dřeva vymanipulovat. (Adamíček 2022)

## **1.4 Vliv struktury na mechanické vlastnosti**

Strukturální stavba dřeva má znatelný vliv i na jeho mechanické vlastnosti, proto jsou u jednotlivých druhů odlišné i jejich schopnosti odolávat působícímu zatížení. Tyto schopnosti ovlivňuje například podíl jarního a letního dřeva, šířka letokruhů, obsah dřeňových paprsků nebo velikost běle a jádra. Letní dřevo plní především funkci mechanickou, zatímco jarní spíše funkci vodivou. Neliší se pouze funkcí, ale i hustotou. Hustota letního dřeva je i několikrát větší než hustota dřeva jarního, což má příznivý vliv na mechanické vlastnosti. Tento podíl souvisí dále i s šířkou jednotlivých letokruhů, který hodnotíme podle počtu letokruhů v 1 centimetru. Čím více letokruhů je v 1 centimetru, tím lepší vlastnosti dřevina má. Toto však neplatí v případě dřeňových paprsků, které ovlivňují pevnostní vlastnosti dřeva, konkrétně třeba pevnost ve smyku, štípatelnost. Při hodnocení dřeňových paprsků nás nezajímá pouze jejich celkový obsah ve dřevě, ale i jejich délka, tvar či velikost. Jejich vliv je také různý v jednotlivých směrech (Požgaj a kol. 1997).

## **1.5 Voda ve dřevě**

### **Vlastnosti vody**

Pro vztah vody a dřeva je dobré znát podstatné jevy vody. Jako jeden z jevů je vodní pára, kterou můžeme označovat za ideální plyn, pro který platí stavová rovnice.

Volná voda ve dřevě způsobuje praskání a další narušení materiálu z důvodu, že při zvyšování vnějšího zatížení dochází ke stlačení materiálu. Voda je ovšem nestlačitelná, a tak vznikají již zmíněná narušení struktury. Dále také její obsah v dřevní hmotě ovlivňuje umístění neutrální osy, což nám dále ovlivní rozložení napětí po výšce, či tvárnost dřeva. Posun neutrální osy při zatížení snižuje tahovou zónu, naopak tlakovou zvyšuje (Požgaj a kol. 1997).

## 1.6 Vztah mezi vodou a dřevem

Dřevo má schopnost přijímat a vylučovat z a do okolního prostředí vodu, a to v plynném i kapalném skupenství. Tato schopnost mu umožňuje změnit svoji vlhkost podle toho v jak vlhkém prostředí se nachází. Dřevo je schopné přijmout i jiné látky v obou skupenstvích než pouze vodu. Vzhledem k tomu, že je dřevo hygroskopický materiál, stále obsahuje alespoň minimální množství vody. Voda má také nezanedbatelný vliv na některé vlastnosti dřeva. Voda a s ní narůstající vlhkost dřeva přímo ovlivňuje například Hustotu (Heřmánková a kol. 2018).

Hustota udává hmotnost objemové jednotky dřeva, označuje se  $\rho$  a nejčastěji se označuje jednotkou  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Je to jedna z nejdůležitějších charakteristik, jelikož její vliv zasahuje do mechanických i fyzikálních vlastností. Pomocí hustoty je možné částečně odhadnout využití dřeva z hlediska jeho vlastností. Vzhledem k tomu, že je přímo ovlivněna vlhkostí je nutné u ní uvádět, při jaké vlhkosti byla stanovena. Nejčastější uváděnou hodnotou je hustota při vlhkosti 10 a 12 %. Hustota je veličina variabilního charakteru, krom vlhkosti ji ovlivňuje také druh dřeviny, šířka jednotlivých letokruhů, nebo věk stromu. Kurjatko (2006) ve své publikaci uvádí, že kolem dřeně je hustota dřevní substance jiná a ve směru kambia se zvyšuje (Bergman et al., 2010).

Voda ve dřevě ovlivňuje i další vlastnosti, krom mechanických a fyzikálních, jako například pružnost a pevnost, které se jejím vlivem zhoršují. Zhoršení těchto vlastností je pouze do bodu nasycení buněčných stěn vodou. Podle Ranta-Maunuse (2003) dosahují pevnostní vlastnosti v souvislosti s vlhkostí nejvyšších hodnot při 10% vlhkosti (Ranta-Maunuse 2003).

Do bodu nasycení buněčných stěn se také s rostoucí vlhkostí mění i rozměry dřeva. Po překročení této hranice se dále rozměry téměř nemění. Dále má vzrůstající vlhkost negativní vliv na odolnost proti škůdcům, houbám či plísním. (Heřmánková a kol. 2018).

Schopnost přijímat vodu označujeme jako hygroskopicitu. Díky ní může dřevo vodu nejen přijmout, ale také ji dále ukládat do intermicelárních prostor (Suchánková 2022).

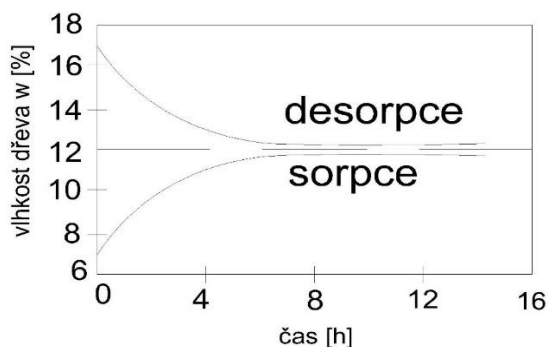
V případě, že je dřevo vystaveno po delší časový úsek vlhkosti v podobě vodní páry v prostředí, kde se relativní vlhkost blíží bodu nasycení vláken, dostane se do bodu meze hygroscopicity (dále MH). Tuto hodnotu užíváme pro určení vody vázané a volné, jelikož je jednodušší ji zjistit než u meze nasycení buněčných stěn (dále MNBS). Rozdíl mezi těmito mezemi je především v rozdílném prostředí, kterému je dřevo vystaveno. U MH jde o vodní páru, jak je již výše zmíněno a u MNBS je voda v kapalném skupenství (Horáček 1998).

Další důležitým bodem ve vztahu vody a dřeva je bod nasycení vláken (dále BNV). Jde o stav dřevní hmoty, v němž dřevo obsahuje pouze vodu vázanou. Hodnota BNV pro naše dřeviny je v rozmezí od 22 do 35 % s ohledem na dřevinu, druh stanovení vlhkosti a dalších vlivech. Nejčastěji rozlišujeme pět stupňů vlhkosti dřeva:

- Dlouho uložené ve vodě = mokré (nad 100 %)
- Čerstvě vytažené (50–100 %) – topol až 180 %
- Vzduchosuché (15 – 20 %)
- Pokojověsuché (8 – 10 %)
- V absolutně suchém stavu

Schopnost změnit svoji vlhkost dle vlhkosti prostředí, ve kterém se dřevo nachází dokládá, že jde o hygrokopický materiál. V případě, že umístíme například vzorek dřeva do místnosti s konstantní vlhkostí vzduchu, tak za určitou dobu dosáhne stavu vlhkostní rovnováhy (Siau 1995).

Tento stav můžeme znázornit pomocí grafu závislosti vlhkosti na čase. Tato závislost ukazuje, že vlivem sorpce a desorpce dosáhne dřevo za určitý čas vlhkostní rovnováhy. Pojem sorpce vyjadřuje stav vlhkostní rovnováhy, kterého docílíme navlhavostí materiálu. Opačná hodnota, tedy desorpce označuje vysychání materiálu (Venhodová 2011).



Obrázek 2 Rovnovážná vlhkost dřeva (Požgaj a kol. 1994)

## Nasákavost dřeva

Pórovitá stavba umožňuje dřevu nasávat vodu v kapalném skupenství. Nasákavost dřeva se tedy hojně využívá při určování maximálních vlhkostí, kterých je dřevo schopno dosáhnout. Maximální vlhkost je stav, kdy je dřevo zcela nasyceno vodou vázanou a zároveň obsahuje nejvyšší možné množství volné vody. Obsah volné vody je spjatý s množstvím pórů. Toto množství je nepřímo úměrné s hustotou vody. Veškeré póry nemusejí být vždy nutně vyplněny pouze vodou. Důvodem může být například ucpání cév, či přítomnost pryskyřic. K úplnému nasycení je potřebný delší časový úsek nasycování, jedná se až o řády týdnů v některých případech. Rychlost tohoto nasycení ovlivňuje více faktorů, mezi které patří například: druh dřeviny, teplota, počáteční procento vlhkosti nebo rozměry a tvar těles. Nasákavost se také liší v jednotlivých částech dřeva (jádro je méně nasáklivé než běl). Nasáknutí vody je možné urychlit pomocí zvýšené teploty. V souvislosti s hustotou je také dobré zmínit, že čím vyšší je hustota dřeva, tím menší je jeho nasákavost (Horáček 1998).

## 1.7 Vlhkost dřeva

Vlhkost dřeva označuje přítomnost kapaliny (vody) ve dřevě. Vlhkost jako veličinu rozdělujeme dále na vlhkost absolutní a relativní, obě tyto hodnoty se nejčastěji uvádí v %. Jednotlivé typy vlhkostí zjišťujeme pomocí následujících vtaů:

$$W_{abs} = \frac{m_w - m_0}{m_0} \cdot 100 = \frac{m_v}{m_0} \cdot 100[\%] \quad (1)$$

$$W_{rel} = \frac{m_w - m_0}{m_w} \cdot 100 = \frac{m_v}{m_w} \cdot 100[\%] \quad (2)$$

Kde:

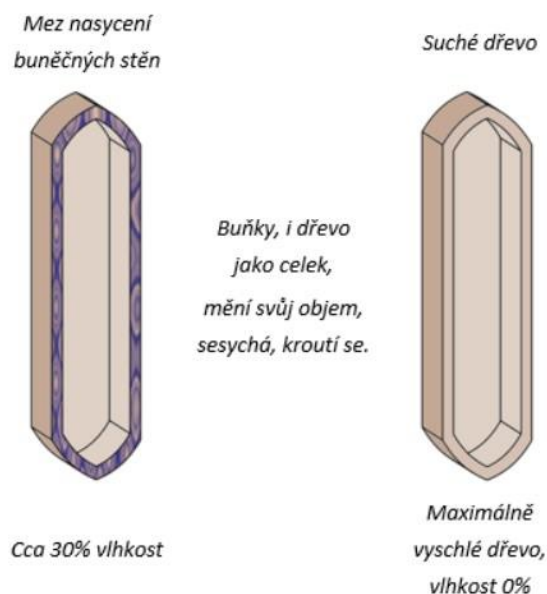
$m_w$  = hmotnost vlhkého dřeva

$m_0$  = hmotnost absolutně suchého dřeva

$m_v$  = hmotnost vody

Pro charakteristiky mechanické a fyzikální v oblasti zkoumání vlastností dřeva užíváme hodnoty absolutní vlhkosti. Hodnot relativních vlhkostí se nejvíce užívá při obchodu se dřevem. V tomto případě je potřebné znát procentuální zastoupení vody z celkové hmotnosti dřeva v nevysušeném stavu. Podle množství vody ve dřevě vztaženému k sušině rozdělujeme tři krajní hodnoty:

- Vlhkost suchého dřeva: dřevo neobsahující žádnou vodu.
- Vlhkost dřeva při nasycení buněčných stěn: buněčné stěny dřeva jsou zcela zaplněny vodou. Tuto vlhkost označujeme jako mez nasycení buněčných stěn (MNBS)
- Vlhkost nasycení dřeva: dřevo je maximálně nasyceno vodou. Tato vlhkost je označována jako maximální vlhkost dřeva ( $W_{max}$ )



Obrázek 3 Porovnání MNBS a vlhkosti dřeva při 0 %vlhkosti (Heřmánková a kol. 2018)



Podle umístění vody ve dřevě je voda dále rozdělována na vodu volnou, vázanou a chemicky vázanou (Babiak a Dubovský 2001).

### **1.7.1 Faktory ovlivňující vlhkost dřeva**

Vlhkost ve dřevě ovlivňuje mnoho faktorů. Mezi ty nejdůležitější faktory patří stavba dřeva a hustota, dále pak mechanické namáhání, nebo i teplota, při které k příjmu či výdeji vlhkosti dochází. Vlhkost se také liší od jednotlivých částí kmene stromu a je tedy nerovnoměrná. Nejmarkantnější rozdíly jsou mezi jádrem a bělí u jehličnatých dřevin, u listnatých dřevin je pak vlhkostní rozdíl mezi jádrem a bělí daleko méně podstatný. U listnatých dřevin je rozložení vlhkosti po kmeni daleko rovnoměrnější než v případě jehličnatých dřevin. Nejvyšších vlhkostních hodnot dosahuje dřevo v období zimy, během letních měsíců je vlhkost dřeva minimální. Kolísání vlhkosti může nastávat i během dne. Horáček v publikaci fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva I. uvádí, že u smrku byla měřena vlhkost třikrát během dne. V ranních hodinách byla vlhkost na 186 %, v poledne na 132 % a ve večerních hodinách na 105 %. Pro porovnání s jinou dřevinou uvádí i vlhkostní rozdíly u dubu. Dub měl v ranních hodinách 68 %, v poledne 72 % a večer 66 %. Z tohoto rozdílu je možné usuzovat, že kolísání vlhkosti je vícenásobně větší u jehličnanů než u listnáčů (Horáček 2008).

### **Chemicky vázaná voda**

Tento typ vody tvoří součást chemických sloučenin, ze dřeva je možné ji odstranit pouze spálením, nikoli sušením. Z fyzikálního nebo mechanického hlediska není významná, její obsah je pouze 1 – 2 % z celkové sušiny (Horáček 2008).

### **Voda vázaná**

Tato voda je označována jako voda hygroskopická a je vázána vodíkovými můstky na OH skupiny celulózy. Z hlediska mechanických a fyzikálních vlastností dřeva má rozhodující význam. Ve dřevě je obsažena při vlhkosti 0-30 % (Friess a kol. 2008).

### **Volná voda**

Z pohledu mechanických a fyzikálních vlastností není tak významná jako voda vázaná. Ve dřevě vyplňuje mezibuněčné prostory a lumeny. Bývá označována jako voda kapilární (Horáček 2008).

## **1.8 Metody zjišťování vlhkosti dřeva**

Způsobů, jakými se zjišťuje vlhkost dřeva je více, rozdělují se do dvou skupin podle toho, s jakou přesností je potřebné vlhkost zjišťovat. Rozdělujeme je teda na metody přímé a nepřímé (Fábryová a Božeková 2007).

### **Přímé metody:**

Z nejčastěji používaných přímých metod to jsou metody gravimetrická a destilační.

**Gravimetrická metoda** – Tuto metodu využíváme v naší práci, principem této metody je zvážení mokrého vzorku a následně je vzorek vysušen a zvážen znovu. Vysoušení probíhá v sušárnách, nebo v prostředí s nulovou vlhkostí, tohoto prostředí můžeme dosáhnout pomocí silikagelu, chloridu vápenatého a dalších látek. Postup a podmínky jsou určeny příslušnou normou ČSN. V našem případě postupujeme podle normy ČSN EN 408. Z těchto hmotností podle vzorců uvedených v kapitole „Vlhkost dřeva“ pro výpočet vlhkostí vypočítáme požadované vlhkosti. Pro kontrolu, zda je dřevo vysušené se mohou provést dvě kontrolní měření s rozestupem 2 hodin. V případě, že se hmotnost mezi jednotlivými měřeními nezmění o více než 1 %, je dřevo považováno za vysušené. Tato metoda je hojně využívána jak pro laboratorní, tak i pro praktické účely. Ovšem pro měření kontinuálních vlhkostí není příliš vhodná a využívá se v těchto případech metod nepřímých (Horáček 2008).

### **Nepřímé metody:**

Mezi tyto metody patří hygrometrická a elektrická metoda, ale také metoda zjišťování vlhkosti dřeva pomocí optických vlastností. Zjištění vlhkosti těmito metodami je poměrně rychlé a zabere v přepočtu pár minut. V praxi se využívá nejvíce při vlhkostech do 30 %, kdy je přesnost dostačující. Výhodou kapacitních vlhkoměrů, které sem patří je automatická kontrola vlhkosti nebo její regulace přímo ve výrobě (Požgaj a kol. 1997).

## **1.10 Fyzikální vlastnosti dřeva**

Fyzikální vlastnosti jsou takové vlastnosti, které lze posuzovat bez provedení mechanické zkoušky, při které by došlo k porušení strukturální stavby dřeva. Mezi tyto vlastnosti patří například hustota a další vlastnosti, které popisují vztah dřeva k teplu, záření, vodě, nebo ty které určují jeho vzhled (Friess a kol. 2008).

## **1.11 Mechanické vlastnosti**

Mechanické vlastnosti určují odolnost vůči působení vnějších sil. Mezi tyto vlastnosti patří pevnost, pružnost a také tvrdost dřeva. Projev těchto vlastností nastává v okamžiku, kdy je dřevo vlivem používání vystaveno nejrozličnějším typům namáhání. Mechanické vlastnosti se liší podle směru, ve kterém dochází k namáhání. Tyto rozdíly jsou způsobeny nehomogenitou dřeva. Na mechanické vlastnosti nemá vliv pouze samotná anatomická stavba, změny z velké části zapříčiňuje i vlhkost ve dřevě. Vliv má na tyto vlastnosti v tomto případě pouze voda vázaná (viz. Kapitola „faktory ovlivňující vlhkost dřeva“) (Fábryová a Božeková 2007).

Mechanické vlastnosti se zkoumají v podélném i příčném směru. Stanovují se na přístrojích, které jsou k tomu vytvořené a na zkušebních tělesech. Postup každé zkoušky mechanických vlastností, rozměry a tvar zkušebního tělesa je dán příslušnou normou. Naše normy určují, že mechanické zkoušky se obvykle provádí za 12% vlhkosti dřeva. Většina těchto zkoušek je destruktivního charakteru, dochází tedy k porušení integrity zkušebních těles. V tomto případě není následně umožněno testování tělesa po dokončení zkoušky opakovaně použít. Některé mechanické vlastnosti mohou být případně testovány i nedestruktivními metodami. Ty jsou povětšinou založeny na měření rychlosti šíření zvuku nebo záření dřevem. K dalším faktorům, které ovlivňují mechanické vlastnosti dřeva patří i teplota dřeva, nebo přítomnost vad (Fábryová a Božeková 2007, Friess a kol. 2008).

## Mechanické namáhání

Důsledkem mechanického namáhání jsou elastické, nebo plastické deformace. Z hlediska fyziky můžeme toto namáhání rozdělit na dalších několik typů (chemické, vlhkostní, mechanické). Při zpracování dřeva dochází ve většině případů ke kombinovanému namáhání. Nejčastější kombinací ve výrobě je namáhání tepelné, vlhkostní a mechanické současně (ohyb, lisování). V případě dřevěných nosných konstrukcí se kombinují namáhání chemické a vlhkostní, které dále ovlivňuje v tomto případě čas. Tato interakce ovlivňuje míru deformací nejvíce v namáhání na ohyb. Reakce dřeva v průběhu mechanického namáhání nesouvisí pouze se vzájemným propojením chemických složek, největším faktorem těchto reakcí je geometrie daného zkušebního tělesa. V podstatě máme tedy dvě hlavní složky, jež dopad mechanických namáhání ovlivní. První složku tvoří struktura a chemické složení tělesa, druhou složku pak jeho geometrie (Požgaj a kol. 1997).

## Napětí

Míru vnitřních sil, jež jsou výsledkem působení vnějšího mechanického zatížení, označujeme jako napětí ve dřevě. Jelikož je dřevo hygroskopický materiál, tak vnikáním vody do buněk dřeva, především do jeho buněčných stěn vzniká vlhkostní napětí. Toto napětí můžeme vzorcem:  $\sigma = \lim_{dS \rightarrow 0} \frac{dF}{dS}$ . Kde je výpočet provedený pomocí dvou diferenciálů – síly a plochy namáhaného průřezu. V případě rovnoměrného rozložení síly na plochu, můžeme napětí vyjádřit pomocí Hookova zákona:  $\sigma = \frac{F}{S} [MPa]$ .

Kde:  $\sigma$  = napětí (MPa)

F = síla (N)

S = plocha (mm<sup>2</sup>)

Hookův zákon jednoosé napjatosti se uplatňuje v lineární fázi diagramu napětí-deformace (Graf č. 2). Vybíral (2017) uvádí, že případně, že by tento zákon nebyl nijak omezen, pak poměrná deformace by se mohla rovnat jedné.

Ovšem ve skutečnosti, ale u většiny technických materiálů začínají vznikat plastické deformace dříve (Vybíral 2017).

V moment, kdy na plochu působí síla kolmo, je výsledkem normálové napětí. Když působící síla směřuje v rovině daného průřezu, bude výsledkem tangenciální (smykové) napětí, které označujeme  $\tau$  (Požgaj a kol. 1997).

### **Pružnost**

Při působení vnějšího zatížení na těleso dochází k deformacím, které rozdělujeme na elastické a plastické. Elastické deformace jsou pomíjející, u těchto deformací nedochází k trvalému poškození a zatížený materiál se po odstranění vnějšího zatížení vrací do původní podoby. Naopak u plastických deformací zůstávají deformace způsobené vnějším zatížením trvalé i po jeho odstranění. Konstrukční materiály považujeme za ideálně pružné materiály pouze v případě, že napětí nepřesahuje mez pružnosti. V případě pružných deformací se uplatňuje Hookův zákon. Podle nějž platí, že napětí materiálu  $\sigma$  je úměrné poměrné deformaci  $\varepsilon$  (Forest product, 1999).

### **Deformace**

Deformace můžeme popsat jako pružné, pružné v čase nebo plastické (trvalé). Pružné deformace nezpůsobují trvalé změny, v okamžiku ukončení působení mechanického zatížení se těleso zcela vrátí do původního tvaru. Deformace pružné v čase také nevytvoří trvalou deformaci, pouze je nutný určitý čas k návratu tělesa do původního tvaru. Trvalé deformace způsobují takové deformace, které přetrvávají i po ukončení zatěžování. Tyto deformace nastávají v moment, kdy je překročena mez úměrnosti (Horáček, 2008).

### **Plastičnost**

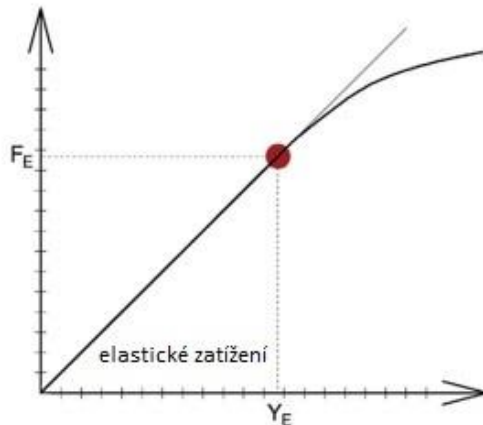
Plastičnost je schopnost dřeva změnit svůj tvar, aniž by došlo k zjevným porušením při působení vnější síly. Má tedy schopnost se plasticky deformovat až do bodu zlomu. Tvar, který při tomto způsobu zatížení nabude, je po ukončení zatížení trvalý.

## Elastické deformace

Vlivem působení zatížení vznikají deformace, které jsou v tomto případě pouze elastické. Tudíž se těleso po odstranění působící síly vrátí do původního tvaru. Tuto vlastnost označujeme jako elasticitu. Elasticita je ovlivněna druhem dřeva a jeho hustotou, dále pak teplotou a vlhkostí dřeva. Vysokou elasticitu má například dřevo buku, jasanu či modřínu (Horák 2022).

Hranice elastických deformací je překročena v moment, kdy dochází k překročení meze úměrnosti. Po překročení této meze se dostáváme do oblasti plastických deformací, kde už vznikají deformace, které přetrvávají i po ukončení zatížení (Horák 2022).

V oblasti elastických deformací se nachází i oblast elastického potenciálu. Elastický potenciál můžeme definovat jako plochu, která se nachází v místě pod pružnou částí silově deformačního diagramu. Jedná se o energii potřebnou pro vznik deformace do meze úměrnosti (Horák 2022).



Graf 1 Silově průhybový diagram v ohybu (Gaff a kol. 2017)

## Plastické deformace

Tato deformace se projevuje při krátkodobém zatížení až při překročení meze úměrnosti. V případě dlouhodobého zatížení se tyto plastické deformace rozvíjejí od počátečního momentu zatížení a dřevo se při tomto zatížení začne chovat jako viskózně-pružný materiál. Obecně se uvádí, že čím větší je

plastická deformace bez viditelného porušení struktury, tím větší plastičnost bude. Kvantifikovat plastičnost dřeva pouze na základě plastických deformací lze jediné orientačně. Na rozdíl od pružnosti dřeva není možné jednoduše popsat plastickou deformaci, jelikož vztah mezi plastickou deformací a napětím není lineární (Horáček 2008).

Vztah mezi napětím a deformací je lineární ve všech případech pouze po mez úměrnosti při krátkodobém zatížení. Po překročení této hranice, je průběh těchto závislostí značně nelineární a vznikají zde i deformace pružné v čase, nebo čistě plastické. Při trvalém konstantním namáhání dřeva se projevuje i tečení dřeva, což je děj, u kterého dochází k nárůstu deformací za konstantního zatížení. Do bodu meze úměrnosti se tečení dřeva v čase ustálí bez porušení, naopak při překročení této meze se tečení zastavuje až viditelným porušením, což je zlom (Horáček 2008).

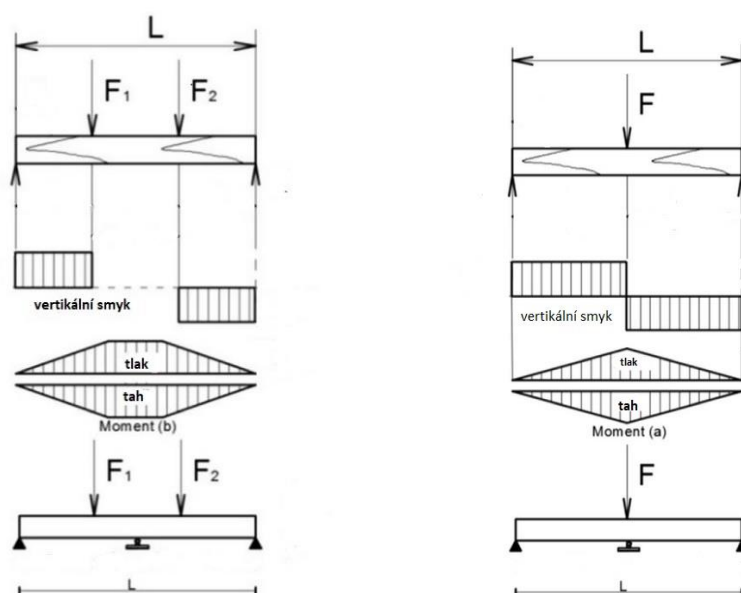
## **Ohyb**

Mezi nejdůležitější charakteristiky v oblasti mechanických vlastností dřeva patří modul pružnosti v ohybu, pevnost v ohybu a další. Rozdělujeme působení síly v ohybu podle toho, v jakém směru působí, což úzce souvisí s průběhem vláken. Působení síly v ohybu může být dynamické, nebo statické. Ohyb se řadí ke kombinovanému typu zatížení. To znamená, že se při něm vyskytují dvě a více druhů mechanického zatížení, působí zde smykové, tahové a tlakové napětí. Bodig a Jayne (1993) definují ohyb jako komplexní, složité namáhání. Při tomto typu zatížení je podstatné určit průhyb a také deformace, ke kterým dochází ve směru druhých dvou os, krom té, ve které působíme zatížením. Babiak a Dubovský (2001) uvádí, že v praxi se nejčastěji využívá zatížení ohybem s vlákny rovnoběžně k podélné ose tělesa a síla působí ve směru tangenciálním nebo radiálním (Babiak a Dubovský 2001).

Tyto vlastnosti v ohybu se zkoumají pomocí zkoušek v ohybu. Pro zkoušky v ohybu se užívá tří a čtyřbodového ohybu. U tříbodového ohybu působí ve směru zatížení pouze jednou zatěžovací hlavicí, působí tedy jedna síla. V důsledku toho vznikají výrazné smykové napětí ve zkušebních tělesech. Pro získání méně zkreslených hodnot tímto napětím, se užívá

čtyřbodového ohybu. U zkoušky čtyřbodovým ohybem se umístí testovací těleso v předem stanovených vzdálenostech danou normou na dvě podpěry. Síla na těleso působí prostřednictvím dvou trnů na zatěžovací hlavici, díky tomu je rozdělena na dvě síly stejné velikosti ve stanovené vzdálenosti od podpěr (Gaff a kol. 2017).

Ohybový moment je tak při čtyřbodovém ohybu rovnoměrněji rozložen po délce zkušebního tělesa. Nedochozí tedy k téměř žádnému smykovému napětí, jako v případě tříbodového ohybu. Pro porovnání obou zkušebních metod je v obrázku č.3 znázorněno rozložení sil, ohybový moment i průběh smykového momentu. Zkoušku v ohybu lze aplikovat ke stanovení modulu pružnosti, elastického a dalších významných charakteristik v oblasti elastických a plastických deformací (Gaff a kol. 2017).



Obrázek 4 Čtyř a tříbodový ohyb (Gaff a kol. 2017)

## Smyk

Dřevo má ve třech základních směrech různou smykovou pevnost, což je způsobeno anizotropií. Čistý jednosměrný smyk bez jiného napětí se v podstatě vůbec nevyskytuje, proto je dost obtížné stanovit jeho podmínky. Přesto má smyk významnou a mnohdy i rozhodující úlohu při zatíženích. U smykového zatížení se účastní i další napětí, proto je důležité na to brát ohled u jednotlivých případů. V praxi zjišťujeme smyk pomocí působení dvou sil, které způsobí posun dvou sousedících průřezů. U dřeva rozdělujeme tři typy

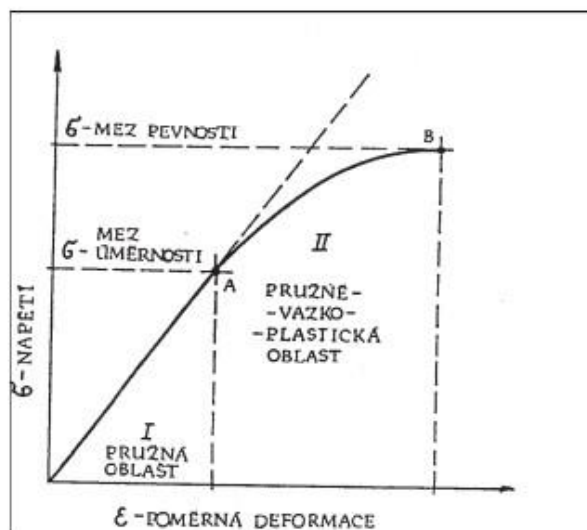


pevnosti ve smyku. 1. **smyková pevnost ve směru vláken** (tangenciální a radiální rovina). 2. **smyková pevnost napříč vláken** (tangenciální a radiální rovina). 3. **smyková (stříhová) pevnost** (napříč vláken v příčné rovině v radiálním a tangenciálním směru). Ve směru vláken má dřevo znatelně menší smykovou pevnost, rozdíly jsou také mezi listnáči a jehličnany, kdy má dřevo jehličnanů v průměru asi 1,5krát menší smykovou pevnost než dřevo listnáčů. Pevnost ve smyku u dřeva listnáčů při porovnání tangenciální a radiální roviny se liší v řádu 10 – 30 %, vyšší je v tangenciální rovině. U dřeva jehličnanů je smyková pevnost ve směru vláken s minimálními rozdíly (Horáček 2008).

### **Modul pružnosti**

Modul pružnosti chápeme jako vnitřní odpor proti vnějšímu zatížení v oblasti pružných deformací. Čím větší je vnitřní odpor, tím větším napětím musí působit pro vytvoření deformace. Jednotkou modulu pružnosti je Pa, pro zjednodušení práce při výpočtech se v praxi užívá MPa (Požgaj a kol. 1998).

Modul pružnosti se stanovuje pouze pomocí experimentů, jelikož pro valnou většinu materiálů stále neexistují odvozené teoretické rovnice. Nejčastěji jsou tyto parametry zjišťovány pomocí zkušebních strojů. Na těchto strojích se zjišťují současně s modulem pružnosti i další charakteristiky, jako deformace nebo působící síla v zatížení. Tyto závislosti mezi napětím a deformací v pravoúhlých souřadnicích se označuje jako pracovní diagram (Matovič 1993).



Graf 2 Obecný tvar pracovního diagramu napětí-deformace (Matovič 1993)

Znázorněný graf č.2 je v tlaku podél vláken. Je rozdělený do dvou oblastí. První oblast znázorňuje lineární nárůst deformací. Vznikají zde převážně pružné deformace, nebo deformace pružné v čase. Pod touto oblastí se nachází také oblast elastického potenciálu. Linearitu tato část ztrácí v okamžiku překročení meze úměrnosti. Druhá oblast diagramu je nelineární, dochází zde ke vzniku plastických deformací. Tato část narůstá až do překročení bodu meze pevnosti, kdy dojde ke zlomu testovacího tělesa. Modul pružnosti dřeva může být ovlivněn několika faktory, například teplota nebo vlhkost. Vlivem zvyšující se teploty je modul pružnosti negativně ovlivněn, tudíž se jeho hodnoty snižují. Vliv teploty na tyto mechanické vlastnosti se také mění s poklesem nebo nárůstem vlhkosti (EURO URBAN 2022, Matovič 1993).

### Vliv vlhkosti na modul pružnosti

Modul pružnosti v ohybu se vlivem sorpčního procesu zvětší, naopak tomu je v případě procesu desorpčního, kdy se modul pružnosti zmenší. U sorpčního procesu dřevo nabírá vlhkost v důsledku čehož i bobtná. Zatížíme-li v tento moment těleso na ohyb, tak se zvětší nejen modul pružnosti a průřez tělesem, ale i tuhost dřeva v ohybu. Během procesu desorpce nastává přesně opačný efekt. Při krátkodobém zatížení, kdy vlhkost na úrovni vázané vody stále vzrůstá, tak moduly pružnosti klesají (Babiak a kol. 2018).

## 2 Metodika

Tato práce je zaměřena na elastické ohybové vlastnosti bukového a smrkového dřeva. Z těchto vlastností je pozorován elastický potenciál a modul pružnosti. Ovlivnění vlhkostí u těchto vlastností je zkoumáno při třech stupních vlhkosti. Konkrétně se jedná o stupně vlhkosti v absolutně suchém stavu, při 12 % a přibližně v bodu nasycení vláken (BNV). Tyto vlastnosti jsou zpracovávány na základě čtyřbodové ohybové zkoušky, dle normy ČSN EN 408. Norma určuje přesné rozměry zkušebních těles (dále jen vzorky).

### 2.1 Příprava vzorků

V první fázi byly vybrány fošny bukového a smrkového dřeva. Při výběru jednotlivých fošen byla provedena kontrola kvality, tak aby vybrané fošny obsahovaly nízký počet nežádoucích vad. Tedy bez viditelných trhlin, suků či poškození biotickými činiteli. V další fázi už probíhalo rozmítání fošen pomocí kotoučové pily, na jednotlivé přířezy, které se dále frézovaly na tloušťkovací frézce do předem určených, standardizovaných rozměrů: 20 mm x 20 mm x 300 mm. Zhotoveno bylo přibližně 90 vzorků od obou druhů dřeva, které byly následně rozděleny do tří podskupin, pro jednotlivé stupně vlhkosti.

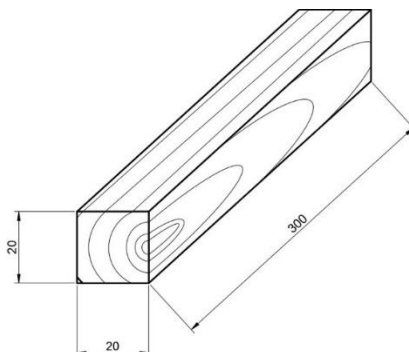


Obrázek 5 Označený vzorek pro provedení kontrolních měření

### 2.2 Třídění vzorků

Připravené vzorky byly jednotlivě vizuálně překontrolovány, zda neobsahují některé vady, které při kontrole fošen nebyly tak patrné. Dále byly

eliminovány nevyhovující vzorky s obsahem například: rozlišného rozestupu letokruhů, známek napadení biotických činitelů, trhlin či menších suků. Výběr vhodných vzorů je nutný z hlediska vypovídajících hodnot zkoušek a nezkrácení výsledků při jejich vyhodnocení.



Obrázek 6 Popis rozměrů testovaných vzorků (Zdroj: Vlastní)

## 2.2 Klimatizování/sušení

Vytřížené vzorky byly označeny podle druhu dřeva a sad s různým stupněm vlhkosti. Následně proběhlo rozdělení podle sady a rozmístěny do klimatizací/sušáren, vždy po jedné sadě od každého dřeva. Jednu skupinu do sušárny, kde se při teplotě  $103 \pm 2$  °C vzorky sušily na nulovou vlhkost, další skupinu do klimatizační komory, kde při nastavené teplotě 20 °C a vlhkosti 65 % probíhalo klimatizování na 12% vlhkost. Poslední skupina byla taktéž uložena do klimatizační komory s teplotou 20 °C, ale s nastavenou vlhkostí na 99 %, kde vzorky dosáhly přibližně bodu nasycení vláken.



Obrázek 7 Vzorky po dokončení sušícího procesu (Zdroj: Vlastní)

Po dokončení klimatizování/sušení bylo provedeno gravimetrické měření a všechny hodnoty zaznamenány do předem vytvořené tabulky. Poté následovala vlastní zkouška. Vzorky vysušené na nulovou vlhkost byly umístěny do bedny se silikagelem, aby nedošlo během zkoušky ostatních vzorků k navlhnutí z okolního prostředí.

### 2.3 Zkouška

Zkušební tělesa byla namáhána čtyřbodovým ohybem, který má vhodnější rozložení smykového napětí než ohyb třibodový. Pro zkoušku elastických vlastností v ohybu byl použit stroj TIRA test 2850 (50 kN), ke kterému náleží příslušný software TIRA test, do kterého byly průběžně zaznamenávány rozměry všech zkušebních vzorků (výška – h, šířka – b).



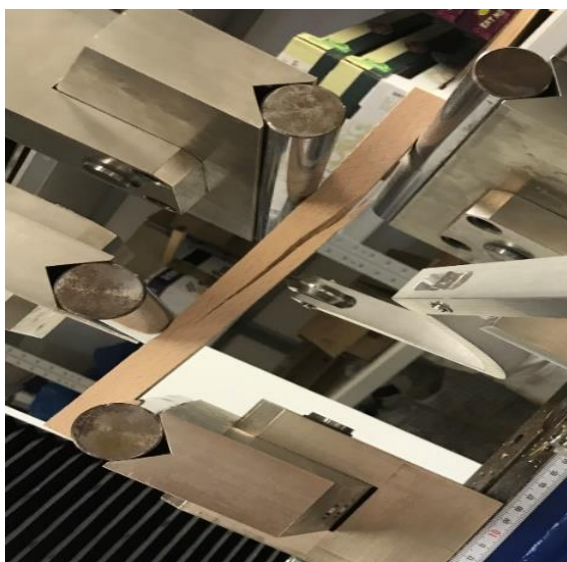
Postupně byly

*Obrázek 8 Průběh zkoušky (Zdroj: Vlastní)*

zkušební tělesa vzorky uloženy na dvě podpěry s rozstupem 240 mm. Do středu tělesa byl umístěn pružinový extenzometr. Poté došlo ke spuštění

zkoušky, kde docházelo k zatěžování vzorků pomocí zatěžovací hlavy se dvěma trny s rozstupem 120 mm. Působení zatížení probíhalo v souladu s použitou normou v rozmezí 60 – 90 s.

Při poklesu síly zatížení o více než 10 %, byla zkouška ukončena. Samotný postup byl založen na působící síle zatížení v tangenciálním směru.



Obrázek 9 Moment ukončení průběhu zkoušky lomem (Zdroj: Vlastní)

Po dokončení zkoušky byly vzorky druhé a třetí skupiny umístěny do sušárny, kde za výše zmíněných podmínek došlo k vysušení na nulovou vlhkost.



Obrázek 10 Zlomený vzorek po dokončení zkoušky (Zdroj: Vlastní)

Následně bylo opětovně provedeno gravimetrické měření jednotlivých vzorků a nové hodnoty byly zaznamenány do tabulky. Opětovná gravimetrická zkouška byl provedena pro získání hodnot k výpočtům skutečné vlhkosti dřeva. Výpočet vlhkosti byl proveden pomocí vzorce:

$$w_a = \frac{m_v}{m_0} \cdot 100 = \frac{m_w - m_0}{m_0} \cdot 100 [0/0]$$

Dále byl počítán modul pružnosti a elastický potenciál pro jednotlivé skupiny vzorků.

$$\text{Modul pružnosti: } MOE = \frac{11 \cdot F \cdot l_0^3}{64 \cdot b \cdot h^3 \cdot Y_E} [MPa]$$

Kde: F = síla (N)

$l_0$  = vzdálenost mezi podpěrami (mm)

b = šířka vzorku (mm)

h = tloušťka vzorku (mm)

$Y_E$  = průhyb na mezi úměrnosti (mm)

(Gaff et al., 2019)

$$\text{Elastický potenciál: } P_E = \frac{3 \cdot F \cdot Y_E}{2 \cdot b \cdot h \cdot l_0} [MPa]$$

Kde:

F = zatížení (N)

$Y_E$  = průhyb na mezi úměrnosti (mm)

b = šířka vzorku (mm)

h = tloušťka vzorku (mm)

$l_0$  = vzdálenost mezi podpěrami (mm)

(Gaff a kol. 2019)



### 3 Výsledky a diskuse

Výsledky uvedené v této kapitole jsou zpracovány v programu Statistica. Byly vytvořeny grafy vzájemných korelací elastického potenciálu, modulu pružnosti a vlhkosti ve třech relacích. Pro zjednodušení popisu těchto vlastností byla vytvořena tabulka č.1 a 2 průměrných hodnot z analýzy vlivu vlhkosti na zmíněné vlastnosti.

Tabulka 1 Průměry vybraných charakteristik bukového dřeva (Zdroj: Vlastní)

DŘEVINA	VLHKOST (%)	MODUL PRUŽNOSTI (MPa)	ELASTICKÝ POTENCIÁL (MPa)
BK	0	14826,82	174,45
	12	13938,93	70,99
	30	9631,11	13,69

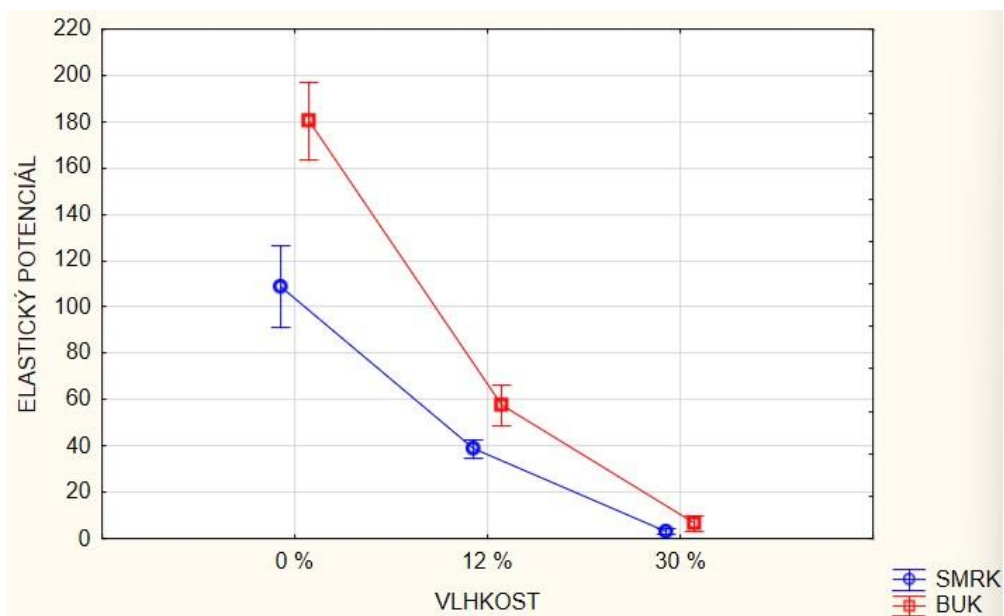
Tabulka 2 Průměry vybraných charakteristik smrkového dřeva (Zdroj: Vlastní)

DŘEVINA	VLHKOST (%)	MODUL PRUŽNOSTI (MPa)	ELASTICKÝ POTENCIÁL (MPa)
SM	0	11110,03	105,22
	12	9554,11	42,21
	30	7556,36	5,80

#### 3.1 Elastický potenciál

Průměrné hodnoty elastického potenciálu, které jsme získali analýzou jsou zaznamenán v tabulkách č. 1 a 2. Hodnoty jsou zde uvedeny ve třech vlhkošních relacích. Dále byla vyhotovena tabulka č. 3 s analýzou post-hoc a konkrétně Duncanův test. Testy ukazují, že mezi jednotlivými skupinami zkušebních souborů jsou statisticky významné rozdíly.





Graf 3 Vliv vlhkosti na elastický potenciál

Grafické znázornění hodnot elastického potenciálu v grafu č.3 jasně ukazuje pokles elastického potenciálu s nárůstem vlhkosti u obou druhů dřeva. Smrkové dřevo však nedosahuje tak vysokých hodnot jako dřevo buku. Při vlhkosti v absolutně suchém stavu je průměrná hodnota elastického potenciálu smrkového dřeva o 39 % nižší než u dřeva buku. Poklesy hodnoty elastického potenciálu mezi hodnotami v absolutně suchém stavu a při vlhkosti 12 % jsou u obou druhů dřev na stejné procentuální úrovni, činí 59 %. Pokles z 12% vlhkosti do BNV je poměrně větší, pro bukové dřevo tento pokles byl o 81 % a pro smrkové 86 %.

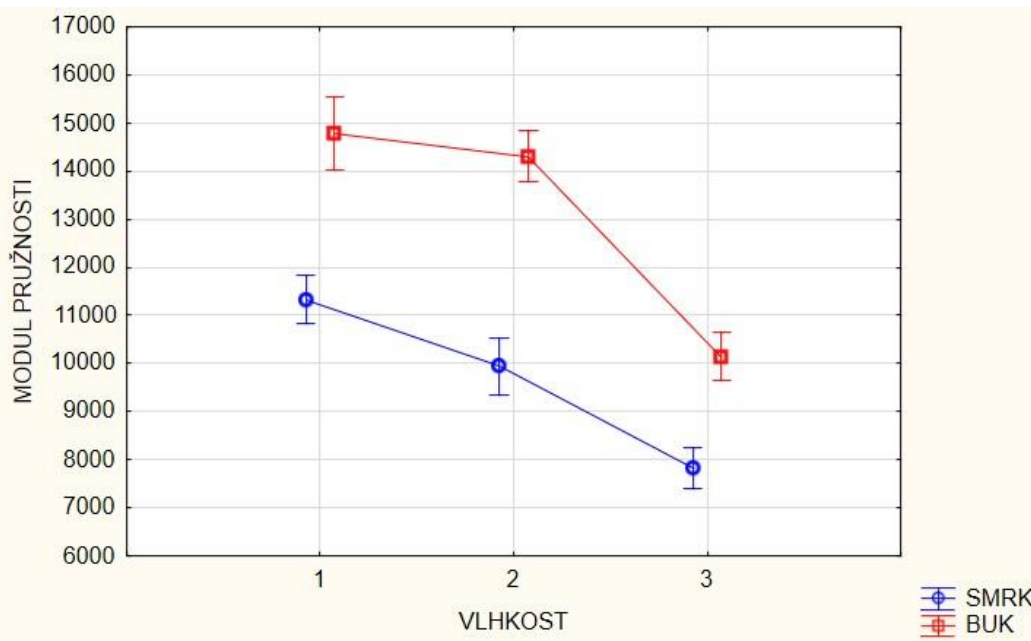
Tabulka 3 Výsledky Duncanova testu pro elastický potenciál

Wood Species	Moisture Content	{1} 108,92	{2} 38,663	{3} 3,0922	{4} 180,35	{5} 57,670	{6} 6,5551
1	1		0,000011	0,000004	0,000005	0,000009	0,000003
1	2	0,000011		0,000014	0,000003	0,011797	0,000029
1	3	0,000004	0,000014		0,000004	0,000003	0,646347
2	1	0,000005	0,000003	0,000004		0,000011	0,000004
2	2	0,000005	0,011797	0,000003	0,000011		0,000011
2	3	0,000003	0,000029	0,646347	0,000004	0,000011	

Pro hlubší statistickou analýzu je také zajímavý pohled na tabulku č. 3, kde jsou zaznamenány výsledky Duncanova testu. Na základě tohoto testu je možné vidět, že při vlhkosti v BNV (30 %) neexistuje statisticky významný rozdíl mezi soubory zkušebních těles bukového a smrkového dřeva.

### 3.2 Modul pružnosti

Průměrné hodnoty obou druhů dřev ve třech vlhkostních relacích jsou zaznamenány v tabulkách č. 1 a 2. Pro modul pružnosti byla také vyhotovena tabulka č. 4 pro hlubší statistické zhodnocení formou Duncanova testu.



Graf 4 Vliv vlhkosti na modul pružnosti

Z výsledků tohoto testu lze jednoznačně vyhodnotit, že mezi většinou testovaných souborů existují statisticky významné rozdíly. Avšak u dřeva buku lze pozorovat, že při vlhkosti 0 a 12 % žádné takovéto statistické rozdíly neexistují. Tuto skutečnost je taktéž možné pozorovat v grafu č.4 kde je pokles modulu pružnosti bukového dřeva o 6 %.

Tabulka 4 Výsledky Duncanova testu pro modul pružnosti

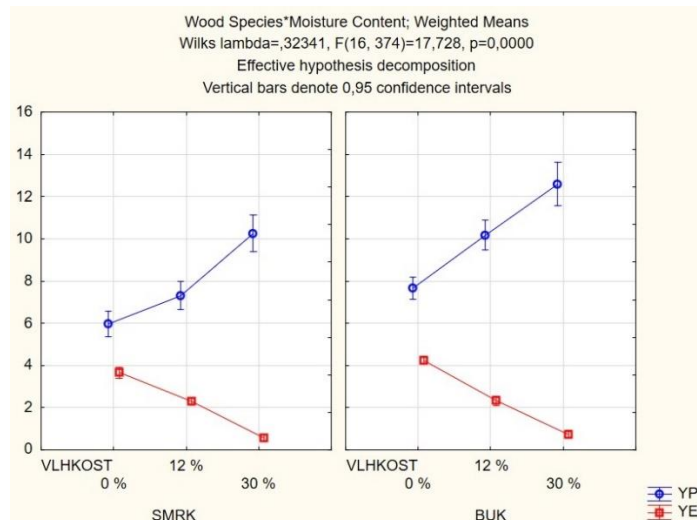
Wood Species	Moisture Content	{1} 11327,	{2} 9945,7	{3} 7830,6	{4} 14785,	{5} 14310,	{6} 10145,
1	1		0,000576	0,000003	0,000011	0,000009	0,002419
1	2	0,000576		0,000009	0,000004	0,000003	0,608945
1	3	0,000003	0,000009		0,000004	0,000004	0,000011
2	1	0,000011	0,000004	0,000004		0,222764	0,000003
2	2	0,000009	0,000003	0,000004	0,222764		0,000011
2	3	0,002419	0,608945	0,000011	0,000003	0,000011	

V grafu č. 4 je možné pozorovat, že modul pružnosti není tak výrazně ovlivněn nárůstem vlhkosti, jako elastický potenciál. Při porovnání hodnot bukového smrkového dřeva se jednotlivé poklesy liší. Jak už je výše zmíněno pokles hodnot modulu pružnosti u bukového dřeva v tomto případě činí 6 %, pokles v této oblasti u smrkového dřeva je více než dvojnásobný a činí 14 %. Oproti tomu pokles mezi 12 % vlhkostí a vlhkostí v BNV je menší u smrkového dřeva,

kdy jeho pokles je o 20 % a bukového ve stejné oblasti o 45 %. Už na první pohled je z grafu viditelné, že smrkové dřevo má kontinuálnější pokles modulu pružnosti s rostoucí vlhkostí než dřevo buku. Výsledky této analýzy byly porovnány s některými odbornými články. Holan a Merenda 2007 uvádí průměrnou hodnotu modulu pružnosti pro bukové dřevo při 12 % 12 960 MPa, dále Lokaj a Vavrušková 2008 uvádí taktéž průměrnou hodnotu modulu pružnosti při 12% vlhkosti 12 680 MPa. Průměrná hodnota této analýzy vyšla 13 938 MPa, což je výrazně vyšší hodnota. Modul pružnosti smrkového dřeva při 0 % vlhkosti byl porovnán s článkem Babiak a kol. (2018), kdy uvádí střední hodnotu při čtyřbodovém ohybu 13 087 MPa, tato hodnota se rámcově shoduje s hodnotami naší analýzy.

### 3.3 Analýza průhybů

V důsledku zvyšování vlhkosti se mění i maximální a minimální hodnoty jednotlivých průhybů v ohybovém zatížení dřeva. Maximální průhyb lomu ( $Y_P$ ) byl u bukového i smrkového dřeva zaznamenán při vlhkosti v BNV. Smrkové dřevo mělo maximální průhyb 13,22 mm a bukové 19,1 mm. Oproti tomu maximální hodnota průhybu na mezi úměrnosti ( $Y_E$ ) dosahuje maximálního průhybu v absolutně suchém stavu u obou testovaných souborů. Minima jsou tady nejnižší při vlhkosti v BNV. Průhyb  $Y_E$  v minimech činí dřeva smrku 1,32 mm a buku 0,86 mm. Výsledky těchto změn jsou graficky znázorněny v grafu č.5, z něhož vyplývá, že hodnota  $Y_P$  má s rostoucí vlhkostí tendenci narůstat. Tento nárůst je kontinuálnější u bukového než u smrkového dřeva. Přesně opačný trend je u průhybu  $Y_E$ . Hodnoty těchto průhybů jsou v obou skupinách podobné a pokles je rámcově stejný ve všech třech relacích vlhkosti. Tato korelace ukazuje, že v návaznosti na nárůst  $Y_P$ , klesá  $Y_E$ . Lze tedy říct, že jsou tyto průhyby k sobě zrcadlově otočené a jsou přímo ovlivňovány mírou vlhkosti ve dřevě.



Graf 5 Vliv nárůstu vlhkosti na průhyb v mezi úměrnosti a v průhybu lomu

### 3. 4 Analýza působících sil

Analyzovány byly síly na mezi kluzu ( $F_E$ ) a síla ve směru průhybu ( $F_P$ ), které vznikaly při zátěži v ohybu. Porovnání poklesu těchto dvou sil můžeme vyčíst z grafu č. 5. Obě tyto síly mají klesající průběh u obou druhů dřeva vzhledem k rostoucí vlhkosti. Kontinuálnější pokles síly je viditelný u síly  $F_E$ , která zároveň dosahuje znatelně nižších hodnot než síla  $F_P$ . Síla na mezi kluzu v rozmezí 0 – 12 % vlhkosti dosahuje u obou druhů dřev poměrně vyrovnaných hodnot. Maximální a minimální hodnoty sil  $F_P$  a  $F_E$ :

Hraniční hodnoty síly  $F_P$  (N):

BUK

- 0 %:MAX 8480/MIN 3300
- 12 %:MAX 6642/MIN 4449
- 30 %:MAX 4659/MIN 2853

SMRK

- 0 %:MAX 4599/MIN 2322
- 12 %:MAX 4128/MIN 1847
- 30 %:MAX 2646/MIN 1797

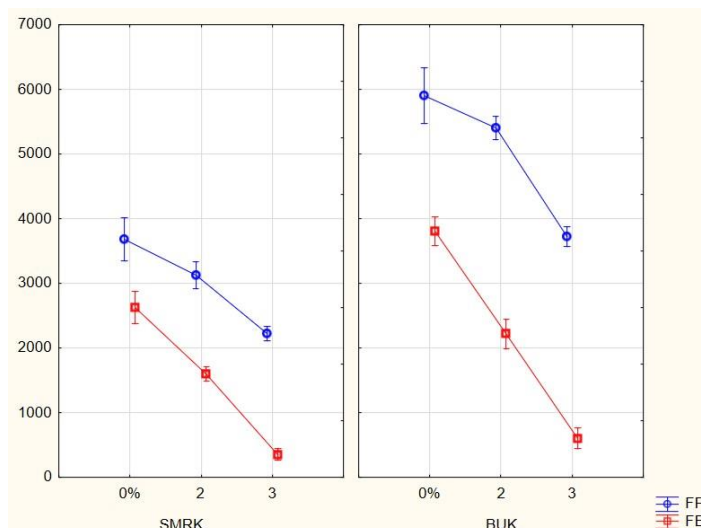
Hraniční hodnoty síly  $F_E$  (N):

BUK

- 0 %:MAX 4904/MIN 2512
- 12 %:MAX 3260/MIN 1791
- 30 %:MAX 1593/MIN 782

SMRK

- 0 %:MAX 3400/MIN 1973
- 12 %:MAX 2307/MIN 454
- 30 %:MAX 836/MIN 428



Graf 6 Vliv nárůstu vlhkosti na sílu v mezi kluzu a ve směru průhybu

## 4 Závěr

V této práci byl analyzován vliv vlhkosti na vybrané elastické charakteristiky pro dva druhy dřeva – smrkové a bukové. Konkrétně se jednalo o analýzu silově průhybových diagramů. Dále byl analyzován modul pružnosti a elastický potenciál. Veškeré tyto charakteristiky byly testovány při vlhkosti 0, 12 a 30 % vlhkosti. Pro vyhodnocení byla použita zkouška ve čtyřbodovém ohybu. Jednotlivé výsledky této analýzy byly mezi sebou vzájemně porovnány a z částí proběhlo porovnání i s jinými autory, kteří se této problematice věnovali. Dále proběhlo zpracování konečných výsledků do grafických podob a v jednotlivých podkapitolách výsledků popsány. Poté byla provedena analýza metodou post-hoc, konkrétně Duncanův test na hladině spolehlivosti  $\alpha = 0,05$ , kde je umožněno sledovat hlubší statistické analýzy. Výstupem těchto testů jsou tabulky č. 3 a 4. Tyto tabulky demonstrují hodnoty, u kterých existuje statistická významnost, nebo naopak vyzorovat ty hodnoty, u kterých tato statistická významnost neexistuje. Výstupy grafů jednotlivých charakteristik je podrobněji popsána v kapitole „Výsledky a diskuse“. V této kapitole jsou také popsány vlivy vlhkosti na průhyby  $Y_E$  a  $Y_P$  na síly  $F_E$  a  $F_P$ .

Vlivem nárůstu vlhkosti klesaly hodnoty jak modulu pružnosti, tak i elastického potenciálu. Tento klesající trend byl zaznamenán v několika odborných člancích různých autorů, především tedy u modulu pružnosti. Elastický

potenciál je oblast, které se prozatím mnoho autorů nevěnovalo, proto není mnoho dat k porovnání této charakteristiky. Zároveň je známo, že vlhkost snižuje kvalitu elastických vlastností s nárůstem vlhkosti ve dřevě.

Při vyhodnocování dat jsem došla k závěru, že v případě těchto elastických vlastností není vliv vlhkosti nad 12 % pozitivní. Rozdíly, které byly zaznamenány u hodnot modulu pružnosti v porovnání s jinými autory, mohou být způsobeny zkušebními metodami za kterých byl modul pružnosti stanovován. V případě, že byly stanoveny u zkoušky tříbodovým ohybem, kdy jsou konečné hodnoty výrazně ovlivněny smykovým napětím.

V našich podmínkách je smrkové i bukové dřevo hojně využíváno, největší využití nachází ve stavebnictví (převážně smrkové dřevo) a také v nábytkářském průmyslu z hlediska jeho dostupnosti a možnosti využití.

Z těchto důvodů je dobré znát změnu jeho vlastností s narůstající vlhkostí. Konkrétně tyto dva druhy dřeva nejsou příliš vhodné exteriéru, kde hodnoty vlhkostí kolísají a v určitých obdobích dosahují procentuálně vysokých vlhkostí.

Tato práce by mohla být přínosná v oblasti dalšího vyhodnocení těchto charakteristik.

## 5 Použité zdroje

- POŽGAJ, Alexander; CHOVANEC, Dušan; KURJATKO, Stanislav; BABIAK, Marián. Štruktúra a vlastnosti dreva. 2. vyd. Bratislava: Príroda, 1997. 488 s. ISBN 80-07-00600-1.
- HORÁČEK, P. Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva I. 2., přeprac. vyd. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2008. ISBN 978-80-7375-169-2. (rok 2008)
- NĚMEC, J. Dřevo – historický lexikon. Praha: Grada Publishing, 2005. 80 s. ISBN 80–247-1187-7.
- UNIVE, CHALMERS. Benefits of strengthening timber with fibre-reinforced polymers. 2011. PhD Thesis. CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY Gothenburg, Sweden, 2011
- MATOVIČ, A. Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva a materiálů na bázi dřeva. Brno: MZLU, 1993. 212 s
- FÁBRYOVÁ, Gabriela a Olga BOŽEKOVÁ. *Materiály pro 1. ročník SOU učebního oboru tesař: učební text pro střední odborná učiliště*. 2., upr. vyd., 1. vyd. v Sobotáles. Praha: Sobotáles, 1995. ISBN 80-85920-042.
- FRIESS, František, Jan REISNER a Aleš ZEIDLER. *Materiály I: pro UO Truhlář*. Praha: Informatorium, 2008. ISBN 978-807333-070-5.
- Vavřík, H., 2022. *Stavba dřeva – hlavní stránka*. [online] Ldf.mendelu.cz. [cit. 4. dubna 2022] Dostupné z: [https://ldf.mendelu.cz/unod/multimedia/stavba\\_dreva/index.htm](https://ldf.mendelu.cz/unod/multimedia/stavba_dreva/index.htm).
- Babiak, M., Gaff, M., Sikora, A. a Hýsek, Š., 2018. Modul pružnosti při tří- a čtyřbodovém ohýbání dřeva. *Composite Structures*, 204, str. 454-465
- BODIG J., JAYNE B. A., 1993. *Mechanics of Wood and Wood Composites*. Malabar: Krieger Publish.Comp., 712 s. ISBN 0–89464–777–6
- Truhlářství URBAN | Výroba nábytku a CNC obrábění dřeva. 2022. *Vlastnosti ohýbacího dřeva | EURO URBAN*. [online] [cit. 4. 4. 2022]. Dostupné z: <https://www.eurourban.cz/vlastnosti-ohybaciho-dreva>

- Gaff, M., Kačík, F., Sandberg, D., Babiak, M., Turčani, M., Niemz, P. a Hanzlík, P., 2019. Vliv chemických tepelné modifikaci evropských dub a smrk ztepilý na elastické vlastnosti. *Composite Structures*, 220, str. 529-538.
- Adamíček R. a., *Chemické složení dřeva – Složení a vlastnosti dřeva – Dřevo centrum*. [online] 2020 [cit. 1. dubna 2022]. Dřevo.celyden.cz. Dostupné z: <http://drevo.celyden.cz/sloen-a-vlastnosti-deva/chemicke-slozeni-dreva/index.html>
- Suchánková, Z., *Metodika průzkumu a diagnostické metody pro hodnocení stavu dřevěné konstrukce*. [online] 2014[cit. 4. února 2022]. Dspace.vutbr.cz. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/35372/final-thesis.pdf?sequence=12>
- Potměšil, 2012. *Jednofaktorová ANOVA* [online] home.zcu.cz. [cit. 5. ledna 2022]. Dostupné z: [http://home.zcu.cz/~potmesil/Skripta%20-%20Pravdepodobnost%20Statistika/Prst-Statist\\_BrisLitschmanova-Ostrava/14anova.pdf](http://home.zcu.cz/~potmesil/Skripta%20-%20Pravdepodobnost%20Statistika/Prst-Statist_BrisLitschmanova-Ostrava/14anova.pdf)
- Horák, P., 2022. *Střední odborné učiliště stavební, odborné učiliště a učiliště* [online] Slideplayer.cz [cit. 5. ledna 2022]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/3251895/>
- VENHODOVÁ, Ester. *Vlastnosti dřeva různého stáří s ohledem na tepelné namáhání*. Brno, 2011. 52 s., 68 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Ing. Jan Vaněrek, Ph.D.
- VYBÍRAL, B. *Mechanika pružného tělesa: Studijní text pro řešitele FO a ostatní zájemce o fyziku* [online]. [cit. 2022-03-22] Dostupné z: <http://fyzikalniolympiada.cz/texty/pruznost.pdf>
- Heřmánková, V., Anton, O. and Komárková, T., 2018. *Závislost fyzikálních a mechanických vlastností u konstrukčního smrkového Dřeva na vlhkost*. [online] TZB-info. [cit.7. dubna 2022]. Dostupné z: <https://m.tzb-info.cz/drevene-konstrukce/16872-zavislost-fyzikalnich-a-mechanickych-vlastnosti-konstrukcniho-smrkoveho-dreva-na-vlhkosti>



- Klonová, S., 2021. [online] *Vliv přídavku ligninu do lepidlových směsí termoreaktivních lepidel*. Dostupné z :  
[https://is.mendelu.cz/zp/portal\\_zp.pl?podrobnosti\\_zp=68273;zpet=pracoviste;prehled=vyhledavani;vzorek\\_zp=lignin;dohledat=Dohledat;kde=nazev;kde=autor;kde=klic\\_slova;stav\\_filtr=bez;typ=1;typ=2;typ=3;typ=5;typ=6;typ=8;typ=7;fakulta=14;fakulta=23;fakulta=220;fakulta=38;fakulta=2;fakulta=79;fakulta=60;obdobi=2022;obdobi=2021;obdobi=2020;obdobi=2019;obdobi=2018;obdobi=2017;obdobi=2016;obdobi=2015;obdobi=2014;obdobi=2013;jazyk=1;jazyk=3;jazyk=2;jazyk=29;jazyk=182;jazyk=22;jazyk=23;jazyk=4;jazyk=28;jazyk=-1;lang=cz](https://is.mendelu.cz/zp/portal_zp.pl?podrobnosti_zp=68273;zpet=pracoviste;prehled=vyhledavani;vzorek_zp=lignin;dohledat=Dohledat;kde=nazev;kde=autor;kde=klic_slova;stav_filtr=bez;typ=1;typ=2;typ=3;typ=5;typ=6;typ=8;typ=7;fakulta=14;fakulta=23;fakulta=220;fakulta=38;fakulta=2;fakulta=79;fakulta=60;obdobi=2022;obdobi=2021;obdobi=2020;obdobi=2019;obdobi=2018;obdobi=2017;obdobi=2016;obdobi=2015;obdobi=2014;obdobi=2013;jazyk=1;jazyk=3;jazyk=2;jazyk=29;jazyk=182;jazyk=22;jazyk=23;jazyk=4;jazyk=28;jazyk=-1;lang=cz)
- Babiak, M. and Dubovský, J., 2001. *Problémy z mechanických vlastností dřeva* . 1. vyd. Zvolen: Technická univerzita ve Zvoleně.
- Holan a Merenda, 2007. [online] 2007 [cit. 8. listopadu 2021].  
Acta.mendelu.cz. Dostupné z:  
<https://acta.mendelu.cz/pdfs/actu/2008/01/29.pdf>
- Lokaj a Vavrušková, 2008. *DESTRUKTIVNÍ TESTOVÁNÍ VYBRANÝCH DRUHŮ LISTNATÉHO ŘEZIVA MALÝCH KONSTRUKČNÍCH ROZMĚRŮ*. [online] Core.ac.uk [cit. 2. dubna 2022].. K dispozici na adrese:  
<https://core.ac.uk/download/pdf/8974011.pdf>
- FOREST PRODUCT, L. Wood handbook — Wood as an engineering material. Washington: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1999. 463 s.
- SIAU, J. F. 1995: Wood. Influence of moisture on physical properties, NY, Virginia Polytechnic Institute and State University, 227 pp.
- RANTA-MAUNUS, A. (2003) Effects of climate and climate variations on strength. Timber Engineering. Larsen, H.J., Eds, Wiley & Sons, ISBN 0-470-84469-8.
- KURJATKO, Stanislav, Jozef KÚDELA, a Rastislav LAGAŇA, eds. Wood Structure and Properties' 06. Arbora Publishers, 2006.