

**ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE**  
**FAKULTA LESNICKÁ A DŘEVAŘSKÁ**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**2020**

**BcA. Sabina Kočová**

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE  
FAKULTA LESNICKÁ A DŘEVAŘSKÁ

**VLIV GEOMETRICKÝCH PARAMETRŮ OHÝBÁNÍ NA  
HODNOTY KOEFICIENTU OHÝBATELNOSTI**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

Studijní program:	Dřevařské inženýrství
Pracoviště (katedra/ústav):	Katedra zpracování dřeva a biomateriálů
Vedoucí diplomové práce:	doc. Ing. Milan Gaff, PhD.

Praha 2020

**BcA. Sabina Kočová**

# ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta lesnická a dřevařská

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

BcA. Sabina Kočová

Dřevařské inženýrství

Dřevařské inženýrství

Název práce

**Vliv geometrických parametrů ohýbaní na hodnoty koeficientu ohybatelnosti**

Název anglicky

**Influence of geometric parameters of bending on bending coefficient values**

---

### Cíle práce

Cílem práce je zjistit vliv geometrických parametrů (tloušťka tělese „h“, vzdálenost podpěr „l<sub>0</sub>“) a jejich interakci na hodnoty charakteristik ohybatelnosti bukového dřeva, teda na hodnoty koeficientů ohybatelnosti.

Cíl práce je možné rozdělit do dvou základních bodů:

1. Ze-sumarizovat poznatky o vplyvu vybraných faktorů na charakteristiky ohybatelnosti
2. Druhá část práce je zaměřená na experimentální ověření získaných poznatků a jejich rozšíření vykonaným a vyhodnocení testů.

### Metodika

1. Úvod.
2. Analýza problematiky.
3. Experimentální část.
4. Měření.
5. Vyhodnocení.
6. Přínosy a doporučení.
7. Závěr.

**Doporučený rozsah práce**

80

**Klíčová slova**

Koeficient ohybatelnosti , skladba materiálu, vrstvitý materiál

**Doporučené zdroje informací**

- Campilho. R. D. S. G., De Moura. M. F. S. F., Barreto. A. M. J. P., Morais. J. J. L., & Domingues. J. J. M. S. Experimental and numerical evaluation of composite repairs on wood beams damaged by cross-graining. *Construction and Building Materials*. 2010. 24(4). 531-537.
- Gaff. M., Gašparík. M., Boruvka. V., Haviarová. E., Stress simulation in layered wood-based materials under mechanical loading. *Materials and Design*. 87 (2015) 1065-1071
- Požgaj. A., Chovanec. D., Kurjatko. S., and Babiak. M., Štruktúra a Vlastnosti Dreva [Structure and Properties of Wood]. *Príroda a. s., Bratislava, Slovakia*. 1997.
- Uysal. B., and Kurt. S. Combustion properties of laminated veneer lumbers bonded with PVAc. PF adhesives and impregnated with some chemicals. *DoguşUniversitesiDergisi*. 2006. 7(1). 112-126.
- Welzbacher. C. R., Wehsener. J., Rapp. A. O., and Haller. P. Thermo-mechanical densification combined with thermal modification of Norway spruce (*Picea abies* Karst) in industrial scale – Dimensional stability and durability aspects. *Holz als Roh- und Werkstoff*. 2008. 66(1). 39-49. DOI: 10.1007/s00107-007-0198-0
29. Gaff, M., Vokatý, V., Babiak, M., BAL, B. (2016). "Coefficient of wood bendability as a function of selected factors", *Construction and Building Materials* 126:632-640, October 2016 DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.09.085

**Předběžný termín obhajoby**

2019/20 LS – FLD

**Vedoucí práce**

doc. Ing. Milan Gaff, PhD.

**Garantující pracoviště**

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů

**Konzultant**

prof. RNDr. Marian Babiak, CSc., dr.hc

Elektronicky schváleno dne 27. 2. 2020

**Ing. Radek Rinn**

Vedoucí ústavu

Elektronicky schváleno dne 3. 3. 2020

**prof. Ing. Róbert Marušák, PhD.**

Děkan

V Praze dne 09. 05. 2020

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „Vliv geometrických parametrů ohýbání na hodnoty koeficientu ohýbatelnosti“ vypracovala samostatně pod vedením doc. Ing. Milana Gaffa Ph.D. a použila jen prameny, které uvádím v seznamu použitých zdrojů.

Jsem si vědoma, že odevzdáním diplomové 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 10. 5. 2020

.....  
BcA. Sabina Kočová

## **Poděkování**

Ráda bych moc poděkovala svému vedoucímu mé diplomové práce doc. Ing. Milanovi Gaffovi PhD. za velkou ochotu a pomoc při zpracování této práce. Dále bych chtěla poděkovat Ing. Petrovi Paulovi a Ing. Adamovi Sikorovi za nápomocné konzultace mé práce. Na závěr bych chtěla poděkovat své rodině za obrovskou podporu a trpělivost při mém studiu a vypracování této práce.

## Abstrakt

Tvárnění dřeva ohýbáním je často používanou technologií v nábytkářském průmyslu. Vhodnost dřeva k ohýbání můžeme hodnotit na základě různých kritérií, nejpodstatnější z nich je ohýbatelnost. Ohýbatelnost dřeva může být definována nejmenším dosažitelným poloměrem ohybu pro ohnutý materiál (Gaff a kol., 2016). Ohýbatelnost je závislá na tloušťce materiálu, tato vlastnost dřeva je vyjadřována jako poměr jeho tloušťky a nejmenšího dosaženého poloměru ohybu. Teoretické vyjádření možnosti ohýbatelnosti dřeva je nedostatečně studováno, tato práce se zaměřuje na aplikaci různých definic koeficientu ohýbatelnosti a na sledování vlivu vybraných geometrických parametrů ohýbání jako je tloušťka tělesa ( $h$ ), vzdálenost podpěr ( $l_0$ ) na jeho výslednou hodnotu. V experimentální části práce jsou definovány koeficienty ohýbatelnosti dřeva u buku lesního (*Fagus silvatica L.*) o tloušťkách materiálu (5, 10, 15, 20, 25 mm).

Z výsledků práce vyplývá, že tloušťka materiálu má významný vliv na hodnoty koeficientu ohýbatelnosti. Vzdálenost podpěr při zkoušení v interakci s tloušťkou zkoušeného materiálu také významně působí na hodnoty koeficientu ohýbatelnosti.

**Klíčová slova:** koeficient ohýbatelnosti, třibodový ohyb, buk, ohýbání dřeva, geometrické parametry ohybu

## **Abstract**

Bending wood is a frequently used technology in the furniture industry. We can evaluate the suitability of wood for bending on the basis of various criteria, the most important of which is bendability. The bendability of wood can be defined by the smallest acceptable radius of the curve for the bent material (Gaff et al., 2016). Bendability depends on the thickness of the material, this property of wood is marked as the value of thickness and the smallest expected bending radius. Theoretical expression of wood bending possibilities is insufficiently studied, this work focuses on the application of various definitions of bendability and on monitoring the influence of selected geometric bending parameters such as thickness ( $h$ ), distance of supports ( $l_0$ ) on its final value. In the experimental parts of the work, the coefficients of wood bending in beech (*Fagus sylvatica L.*) with material thicknesses (5, 10, 15, 20, 25 mm) are defined.

From the results of the work can be found that it is possible to use a material that affects the value of the bending factor. The distance of the supports during testing in interaction with the thickness of the examined material is a significant advantage on the value of the coefficient of bending.

**Keywords:** bending coefficient, three-point bending, beech, wood bending, geometric bending parameters



# Obsah

<b>ÚVOD</b>	<b>16</b>
<b>1 CÍL PRÁCE</b>	<b>18</b>
<b>2 OHÝBANÝ NÁBYTEK</b>	<b>19</b>
2.1 VÝROBKY Z OHÝBANÉHO DŘEVA	20
<b>3 TVAROVÁNÍ DŘEVA – OHÝBÁNÍ</b>	<b>21</b>
3.1 VLASTNÍ OHÝBÁNÍ	21
3.1.1 <i>Plastifikace</i>	21
3.1.2 <i>Ohýbání</i>	23
3.1.3 <i>Tvarová stabilizace</i>	27
3.1.4 <i>Klimatizace</i>	28
<b>4 OHÝBATELNOST DŘEVA - CHARAKTERISTIKY</b>	<b>29</b>
4.1 PROCES OHÝBÁNÍ	29
4.2 KOEFICIENT OHÝBATELNOSTI A MINIMÁLNÍ POLOMĚR OHYBU	31
<b>5 DŘEVO JAKO KONSTRUKČNÍ MATERIÁL A JEHO VLASTNOSTI</b>	<b>34</b>
5.1 BUK LESNÍ	34
5.2 VYBRANÉ FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI	35
5.2.1 <i>Vlhkostní vlastnosti</i>	35
5.2.2 <i>Hustota</i>	37
5.2.3 <i>Tepelné vlastnosti</i>	39
5.2.4 <i>Elektro-fyzikální vlastnosti</i>	39
5.2.5 <i>Akustické vlastnosti dřeva</i>	39
5.2.6 <i>Povrchové a optické vlastnosti</i>	39
5.3 MECHANICKÉ VLASTNOSTI	39
5.3.1 <i>Mechanické namáhání</i>	40
5.3.2 <i>Napětí</i>	41
5.3.3 <i>Deformace</i>	42
5.3.4 <i>Pružnost dřeva</i>	43
5.3.5 <i>Mez úměrnosti</i>	46
5.3.6 <i>Mez pevnosti</i>	47
5.3.7 <i>Pevnost dřeva</i>	47
<b>6 METODIKA EXPERIMENTÁLNÍCH PRACÍ</b>	<b>50</b>
6.1 VÝROBA A PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ	50
6.2 KLIMATIZACE VZORKŮ	51
6.3 OHYBOVÁ ZKOUŠKA	52
6.4 SUŠENÍ VZORKŮ	54
6.5 VÝPOČET DANÝCH CHARAKTERISTIK	55
6.5.1 <i>Modul pružnosti</i>	55
6.5.2 <i>Mez pevnosti v ohybu</i>	56
6.5.3 <i>Mez úměrnosti</i>	57
6.5.4 <i>Minimální poloměr ohybu</i>	57
6.5.5 <i>Koeficient ohýbatelnosti</i>	59
<b>7 VYHODNOCENÍ A VÝSLEDKY</b>	<b>60</b>
7.1 MODUL PRUŽNOSTI	61
7.2 SÍLA NA MEZI PEVNOSTI	62
7.3 SÍLA NA MEZI ÚMĚRNOSTI	64
7.4 PROCENTNÍ POMĚR SIL $F_E/F_P - P_F$	65

7.5	PRŮHYB NA MEZI PEVNOSTI	66
7.6	PRŮHYB NA MEZI ÚMĚRNOSTI	67
7.7	PROCENTNÍ POMĚR SIL $Y_E/Y_P - P_Y$	68
7.8	KOEFICIENT OHÝBATELNOSTI	69
7.9	MINIMÁLNÍ POLOMĚR OHYBU	71
<b>8</b>	<b>DISKUZE</b>	<b>73</b>
8.1	MODUL PRUŽNOSTI	73
8.2	SÍLA NA MEZI PEVNOSTI	73
8.3	SÍLA NA MEZI ÚMĚRNOSTI	74
8.4	PROCENTNÍ POMĚR SIL $F_E/F_P - P_F$	74
8.5	PRŮHYB NA MEZI PEVNOSTI	74
8.6	PRŮHYB NA MEZI ÚMĚRNOSTI	74
8.7	PROCENTNÍ POMĚR SIL $Y_E/Y_P - P_Y$	75
8.8	MINIMÁLNÍ POLOMĚR OHYBU A KOEFICIENT OHÝBATELNOSTI	75
<b>9</b>	<b>ZÁVĚR</b>	<b>77</b>
<b>10</b>	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY</b>	<b>80</b>
<b>11</b>	<b>SEZNAM PŘÍLOH</b>	<b>84</b>
PŘÍLOHA 1	MODUL PRUŽNOSTI	85
PŘÍLOHA 2	SÍLA NA MEZI PEVNOSTI	87
PŘÍLOHA 3	SÍLA NA MEZI ÚMĚRNOSTI	89
PŘÍLOHA 4	PROCENTNÍ POMĚR SIL $P_F$	91
PŘÍLOHA 5	PRŮHYB NA MEZI PEVNOSTI	93
PŘÍLOHA 6	PRŮHYB NA MEZI ÚMĚRNOSTI	95
PŘÍLOHA 7	PROCENTNÍ POMĚR PRŮHYBU $P_Y$	97
PŘÍLOHA 8	KOEFICIENT OHÝBATELNOSTI	99
PŘÍLOHA 9	MINIMÁLNÍ POLOMĚR OHYBU	102

## Seznam tabulek

Tab. 1 Mechanické a fyzikální vlastnosti buku (Sarvaš a kol., 2010; Wagenführ, 1974) ..	
.....	35
Tab. 2 Hustota buku dle různých autorů.....	38
Tab. 3 Mez pevnosti v ohybu (Ugolev,1986) .....	49
Tab. 4 Schéma zkušebních vzorků (autor).....	50
Tab. 5 Modul pružnosti.....	61
Tab. 6 Síla na mezi pevnosti .....	63
Tab. 7 Síla na mezi úměrnosti .....	64
Tab. 8 Procentní poměr sil $P_F = F_E/F_P$ .....	65
Tab. 9 Průhyb na mezi pevnosti – $Y_P$ .....	66
Tab. 10 Průhyb na mezi úměrnosti $Y_E$ .....	67
Tab. 11 Procentní poměr sil $Y_E/Y_P - P_Y$ .....	68
Tab. 12 $K_{ohC}$ .....	69
Tab. 13 $K_{ohB}$ .....	70
Tab. 14 Průměrné hodnoty $R_{minC}$ a $R_{minB}$ .....	71
Tab. 15 - Porovnání účinků tloušťky vzorku pomocí Duncanova testu na hodnoty Modulu pružnosti .....	85
Tab. 16 Porovnání účinků vzdálenosti podpěr pomocí Duncanova testu na hodnoty Modulu pružnosti.....	85
Tab. 17 Porovnání účinků interakce tloušťky a vzdálenosti podpěr pomocí Duncanova testu na MOE .....	86
Tab. 18 Porovnání účinků tloušťky vzorku pomocí Duncanova testu na hodnoty $F_P$ ....	87
Tab. 19 Porovnání účinků vzdálenosti podpěr pomocí Duncanova testu na hodnoty $F_p$ ...	
.....	87
Tab. 20 Porovnání účinků interakce tloušťky a vzdálenosti podpěr pomocí Duncanova testu na $F_p$ .....	88
Tab. 21 - Porovnání účinků tloušťky vzorku pomocí Duncanova testu na hodnoty $F_E$ .	89
Tab. 22 - Porovnání účinků tloušťky vzorku pomocí Duncanova testu na hodnoty $F_E$ .	89
Tab. 23 - Porovnání účinků interakce vzdálenosti podpěr a tloušťky vzorků pomocí Duncanova testu na hodnoty $F_E$ .....	90
Tab. 24 - Porovnání účinků tloušťky vzorku pomocí Duncanova testu na hodnoty $P_F$ .	91

Tab. 25 - Porovnání účinků vzdálenosti podpěr pomocí Duncanova testu na hodnoty PF .....	91
Tab. 26 - Porovnání účinků interakce vzdálenosti podpěr a tloušťky vzorků pomocí Duncanova testu na hodnoty PF .....	92
Tab. 27 - Porovnání účinků tloušťky vzorku pomocí Duncanova testu na hodnoty YP	93
Tab. 28 - Porovnání účinků vzdálenosti podpěr pomocí Duncanova testu na hodnoty YP .....	93
Tab. 29 - Porovnání účinků interakce vzdálenosti podpěr a tloušťky vzorků pomocí Duncanova testu na hodnoty YP.....	94
Tab. 30 - Porovnání účinků tloušťky vzorku pomocí Duncanova testu na hodnoty YE	95
Tab. 31 - Porovnání účinků vzdálenosti podpěr pomocí Duncanova testu na hodnoty YE .....	95
Tab. 32 - Porovnání účinků interakce vzdálenosti podpěr a tloušťky vzorků pomocí Duncanova testu na hodnoty YE .....	96
Tab. 33 - Porovnání účinků tloušťky vzorku pomocí Duncanova testu na hodnoty PY	97
Tab. 34 - Porovnání účinků vzdálenosti podpěr pomocí Duncanova testu na hodnoty PY .....	97
Tab. 35 - Porovnání účinků interakce vzdálenosti podpěr a tloušťky vzorků pomocí Duncanova testu na hodnoty PY.....	98
Tab. 36 - Porovnání účinků tloušťky vzorku pomocí Duncanova testu na hodnoty KohC a KohB .....	99
Tab. 37 - Porovnání účinků vzdálenosti podpěr pomocí Duncanova testu na hodnoty KohC a KohB.....	100
Tab. 38 - Porovnání účinků interakce tloušťky materiálu a vzdálenosti podpěr pomocí Duncanova testu na hodnoty KohC a KohB .....	101
Tab. 39 - Porovnání účinků tloušťky vzorku pomocí Duncanova testu na hodnoty RminC a RminB .....	102
Tab. 40 - Porovnání účinků vzdálenosti podpěr pomocí Duncanova testu na hodnoty RminC a RminB.....	103
Tab. 41 - Porovnání účinků interakce tloušťky materiálu a vzdálenosti podpěr pomocí Duncanova testu na hodnoty RminC a RminB .....	104

## Seznam ilustrací

Obr. 1 Technologické operace ohýbání (Trávník, 2008).....	21
Obr. 2 Deformační diagram, neplastifikovaného dřeva a plastifikovaného dřeva (Zemiar, 2009) .....	22
Obr. 3 Ohýbání v lise (Zemiar, 2009).....	23
Obr. 4 Průběh napětí a deformace v tahu a tlaku u pařeného buku (Trebula, 1989) .....	24
Obr. 5 Napětí a deformace při ohýbání dřeva (Zemiar, 2009) .....	25
Obr. 6 Schéma ručního ohýbání, 1 – tvárnice, 2 – pásnice, 3 – hranolek.....	26
Obr. 7 Prostorové ohýbání (Zemiar, 2009).....	26
Obr. 8 Navíjecí ohýbačka (Zemiar, 2009) Obr. 9 Ramenová ohýbačka (Zemiar, 2009) .....	27
Obr. 10 Deformace ohýbaného prvku (Babiak a kol., 2018).....	30
Obr. 11 Průběh 3-bodového ohybu (Babiak a kol., 2018).....	31
Obr. 12 Roviny pružné symetrie dřeva a diagram anizotropie modulu pružnosti (Požgaj, 1997) .....	41
Obr. 13 Změna tvaru tělesa při normálovém napětí v tahu dle Požgaje (1997) .....	42
Obr. 14 Pracovní diagram dle (Požgaj a kol.,1997).....	43
Obr. 15 Graf znázorňující závislost modulu pružnosti na hustotě a vlhkosti dřeva (Požgaj a kol., 1997) .....	44
Obr. 16 Ohyb dle (Požgaj a kol.,1997) .....	45
Obr. 17 Silově průhybový diagram – namáhání ohybem, mez úměrnosti a pevnosti (Svoboda a kol., 2017) .....	46
Obr. 18 Zatížení dřeva v ohybu a – kolmo na vlákna v radiálním směru, b – kolmo na osu tělesa, c – podél vláken (Požgaj a kol., 1997).....	48
Obr. 19 Rozložení napětí po výšce tělesa (Požgaj a kol.,1997).....	49
Obr. 20 Značení vzorků (autor) .....	51
Obr. 21 Klimatizace (autor) .....	52
Obr. 22 Schéma zkušebního zařízení dle EN 310 (EN 310) .....	53
Obr. 23 Křivka zatížení v oblasti pružné deformace .....	56
Obr. 24 Geometrie ohybu (autor) .....	57
Obr. 25 Ohybový moment .....	58
Obr. 26 Účinek interakce tloušťky materiálu a vzdálenosti podpěr na hodnoty modulu pružnosti E (MPa).....	62

Obr. 27 Účinek interakce tloušťky materiálu a vzdálenosti podpěr na hodnoty $F_P$ (N) .	63
Obr. 28 Účinek interakce tloušťky materiálu a vzdálenosti podpěr na hodnoty $F_E$ (N)	65
Obr. 29 Účinek interakce tloušťky materiálu a vzdálenosti podpěr na hodnoty $P_F = F_E/F_P$ (C) (%) .....	66
Obr. 30 Účinek interakce tloušťky materiálu a vzdálenosti podpěr na hodnoty $Y_P$ (mm) .....	67
Obr. 31 Účinek interakce tloušťky materiálu a vzdálenosti podpěr na hodnoty $Y_E$ (mm) .....	68
Obr. 32 Účinek interakce tloušťky materiálu a vzdálenosti podpěr na hodnoty $P_Y$ (%)	69
Obr. 33 Účinek interakce tloušťky materiálu a vzdálenosti podpěr na hodnoty $K_{ohC}$ a $K_{ohB}$ .....	71
Obr. 34 Účinek interakce tloušťky materiálu a vzdálenosti podpěr na hodnoty $R_{minC}$ a $R_{minB}$ .....	72

## Seznam zkratek a značek

%	procenta
°C	stupeň Celsia, odvozená jednotka teploty v soustavě SI
BK	buk lesní
BNV	bod nasycení vláken
ČSN	česká technická norma
E	modul pružnosti
EN	evropská norma
FE	mez úměrnosti
FP	mez pevnosti
$K_{oh}$	koeficient ohýbatelnosti
LOP	mez úměrnosti
mm	milimetr, odvozená jednotka délky v soustavě SI
MOE	modul pružnosti
MOR	pevnost v ohybu
$R_{min}$	minimální poloměr ohybu
s	sekunda, základní jednotka času v soustavě SI
tl	tloušťka
VC	variační koeficient
Y	průhyb
MH	mez hygroskopicity

## Úvod

Historie ohýbání dřeva sahá až do starověkého Egypta, kde se pomocí ohybu dřeva vyráběly lodě. Technologie ohýbání se dále rozvíjela hlavně v oblasti výroby nábytku. Ohýbaný nábytek můžeme najít již v 17. století. Prvky ohýbaného dřeva jsou zde patrné hlavně u sedacího nábytku, kde můžeme vidět zdobená ohýbaná opěradla židlí. Tento typ židlí pochází z Anglie a říkalo se jim židle Windsorské. Velký rozvoj ohýbaného nábytku nastává v době Biedermeieru, kdy přichází se svými experimenty technologie ohýbání dřeva Michael Thonet. Počátek jeho experimentů je roku 1830 a věnuje se jim až do zahájení průmyslové výroby roku 1857–1860. Thonet při ohýbání masivních hranolků začal využívat ocelovou pásnici, která výrazně zvýší možnosti ohybu dřeva. Toto období je pro další vývoj ohýbaného nábytku zcela zásadní, a to z pohledu konstrukčního, typologického tak i technologického hlediska. Výroba ohýbaného nábytku je i v dnešní době velmi aktuální a z pohledu designu je ohýbaný nábytek velmi žádaný. Oblé tvary nábytku dodávají vzhled jedinečnosti a pohodlnosti (Britannica, 2015; Hlásková, 2015; Uhlíř, 1997).

Ohybu dřeva je možno dosáhnout několika technologiemi ohýbání. Mezi základní technologie ohybu patří volný ohyb neplastifikovaného či plastifikovaného dřeva a ohýbání pomocí pásnice (Hulinský, 2016). Zvláštní technologií ohybu je například využití termomechanicky modifikovaného dřeva Cold-bend wood od firmy Pure Timber. Zásadní vliv na zvolení správné technologie má požadovaný poloměr ohybu. Volným ohybem dosahujeme pouze velkých poloměrů ohybu, poloměr ohybu je snížen plastifikací a při ohybu pomocí pásnice je možno dosáhnout i malých poloměrů ohybu. Při ohýbání dřeva Cold-bend wood je dosahováno malých poloměrů ohybu bez dalšího působení tepla (Dalheim, 2017).

Velikost ohybu je hodnocena pomocí koeficientu ohýbatelnosti. Ten udává minimální poloměr ohybu, kterého je možno docílit ohýbáním vzhledem k tloušťce ohýbaného materiálu. Hodnoty  $K_{oh}$  jsou ovlivňovány i geometrickými parametry při ohýbání. Mezi geometrické parametry, které ovlivňují výsledný ohyb patří například vzdálenost podpěr a místo působící síly. Ohýbatelnost dále také ovlivňuje druh dřeviny, vlhkost a hustota dřeva, působící síla (Sikora a kol., 2019, Gaff a kol., 2015).

Tato práce se zabývá zkoumáním hodnoty koeficientu ohýbatelnosti a jeho ovlivněním geometrií ohybu. V experimentální části práce je popisováno určení koeficientu



ohýbatelnosti na 210 vzorcích z bukového dřeva, které byly namáhány třibodovým ohybem, testování probíhalo na stroji UTS TIRA. Při testování byla nastavena vzdálenost podpěr desetinásobek a dvacetinásobek tloušťky vzorku. Následně byly naměřené hodnoty koeficientu porovnávány a bylo zkoumáno, jaký vliv na koeficient ohýbatelnosti má geometrie ohybu.

## 1 Cíl práce

Využívání technologie ohýbání je velmi častá metoda tvarování materiálu. Teoretické zpracování procesu ohýbání je nedostatečně studováno. Cílem této práce je zjistit vliv geometrických parametrů jako je tloušťka tělesa ( $h$ ) a vzdálenost podpěr ( $l_0$ ) a jejich interakci na hodnoty charakteristik ohýbatelnosti masivního dřeva a na jejich případné využití při tvorbě nových technologií. Příslušné znalosti by mohly přinést další technické, technologické a ekonomické výhody ve výrobě nábytku z ohýbaného dřeva a bude také brán zřetel na efektivnější využití přírodních zdrojů.

Sledovanými charakteristikami ohýbatelnosti budou koeficient ohýbatelnosti „ $K_{oh}$ “, síla na mez pevnosti „ $F_p$ “, síla na mez úměrnosti „ $F_e$ “, průhyb na mez pevnosti „ $Y_p$ “, průhyb na mez úměrnosti „ $Y_e$ “, modul pružnosti „ $MOE$ “, pevnost v ohybu „ $MOR$ “, mez úměrnosti „ $LOP$ “. Hodnocení vlivu vybraných faktorů na koeficient ohýbatelnosti, bude zjišťováno na základě zkoušky tříbodovým ohybem. Pro výzkum bylo zvoleno dřevo buku lesního (*Fagus sylvatica, L.*). Na identifikaci a kvalifikaci výsledků bude použita norma ČSN EN 310 (1993). Získané výsledky budou získány ze silové průhybového diagramu pomocí softwaru MATESS s následným statistickým zhodnocením pomocí softwaru Statistica 12.

## 2 Ohýbaný nábytek

Historie ohýbaného nábytku sahá až do starověku, konkrétně do starověkého Egypta. Ve starověku se teorie ohýbání dřeva uplatňovala hlavně při stavbě člunů a lodí. Prvotní technologie spočívala v pracném vyhlubování celých kmenů, byla zde snaha tuto technologii zjednodušit a tak se lidé snažili vyrobit lodě pomocí ohýbaných dřevěných desek. Tento jednoduchý postup při výrobě lodí se v omezené míře využívá dodnes, postup je ovšem velmi omezený, neboť jsme při ohýbání limitováni tloušťkou ohýbaných desek a můžeme ohýbat pouze o malých poloměrech ohybu. Dalším úskalím tohoto ohybu je, že ohýbané dřevo je fixováno pomocí spojovacích prostředků, dosahuje se tedy pouze přechodné tvarové změny (Sandberg, 2011).

Technologie ohýbání dřeva nebyla dlouho vůbec zkoumána. Kolem roku 1710 se v Anglii začaly objevovat tzv. Windsdorské židle. Ohýbané prvky na těchto židlích byly znatelné především na opěradlech. V této době se začínají zkoumat způsoby změkčování dřeva. Mezi nejznámější osobnosti zabývající se technologií ohýbání dřeva z této doby patří například Jean Josef Chapuis (Navi a Sandberg, 2011).

K dalšímu vývoji výroby ohýbaného nábytku vedl hlavně rozvoj průmyslu a výrobní techniky. Vyhledávaly se hlavně způsoby, jak dřevo snadněji ohýbat a hlavně, jak by bylo možné dosáhnout trvalé změny tvaru dřeva po uhnutí a jeho udržení tvaru. První zmínky o zkoumání těchto faktorů můžeme najít v odborné literatuře na počátku 19. století z Anglie, Francie, Rakouska a Ameriky. V této době se vyskytují zmínky o měkčení dřeva v horké vodě či ve vodní páře a zkoušejí se experimenty s ohýbáním dřeva nahříváním nad ohněm. Mezi nejvýznamnější jména této doby patří americký truhlář Samuel Gragg, který vyráběl židle windsdorského stylu v Bostonu a je považován za předchůdce Michaela Thoneta. Díky svému zkoumání výroby ohýbaného nábytku a využití napařování ohýbaného dřeva získal roku 1808 patent Spojených států na výrobu „elastických židlí“ (Evans, 1997, Evans, 2005).

Velký rozvoj ohýbaného nábytku se opět vrací až v době Biedermeieru, kdy přichází se svými experimenty při ohýbání dřeva truhlářský mistr z Boppardu na Rýně Michael Thonet. Thonet se svými experimenty začíná roku 1830 a až do zahájení průmyslové výroby v letech 1857–1860 je toto období pro vývoj a rozvoj ohýbaného nábytku zcela zásadní, a to z pohledu konstrukčního, typologického, tak i technologického. První Thonetovy židle byly vyráběny ze svazku dých, které byly namáčeny v kliču. Tato

technologie ohybu ovšem nedovolovala prostorový ohyb. Tyto židle, které vznikaly ve 40. letech 19. století, nesou název židle Boppardské. Thonet tedy nebyl úplně spokojen s docílenými tvary, proto ve zkoumání technologie pokračoval dále. Mezi lety 1843–1847 Thonet pracuje na židlích Liechteinských, kde je již vidět prostorový ohyb, kterého je docíleno šroubovitým či vrtákovým stáčením ohýbaných dílců. Závažnou vadou tohoto způsobu výroby bylo, že židle nemohly být vystaveny vlivu vlhkosti, neboť ta způsobovala rozlepení jednotlivých pásů dřeva. Tyto důvody a například i nutnost zjednodušit výrobní postupy vedly Thoneta k experimentům, jejichž výsledkem bylo ohýbání masivního dřeva. Po delším zkoumání a vylepšování technologického postupu ohýbání Thonet vynalezl způsob, který znamenal naprostý převrat v technice ohýbání dřeva, a to byla myšlenka využití pásnice při ohýbání. Tento způsob ohýbání masivního dřeva se stal zdrojem všech dalších úspěchů v oblasti ohýbání dřeva, jelikož díky němu je možno ohýbat i poměrně silná masivní dřeva v libovolných směrech ohybu a umožňuje ohýbání i s menšími poloměry ohybu. Thonet roku 1841 získává patent na tuto metodu ohýbání dřeva. Byl tedy položen základ k vybudování průmyslového ohýbání dřeva (Uhlíř, 2011; Uhlíř, 2005; Karasová, 2012).

První velká továrna na výrobu ohýbaného nábytku byla vybudována v Koryčanech na Moravě roku 1856, brzy na to byla roku 1862 vybudována další velká továrna v Bystřici pod Hostýnem, která do dnes patří mezi největší továrny na výrobu ohýbaného nábytku. Věhlasná je tato továrna hlavně díky značce Ton, která právě zde sídlí (Uhlíř, 2011).

## 2.1 Výrobky z ohýbaného dřeva

Důležité zastoupení mezi ohýbanými výrobky najdeme hlavně v nábytkářském průmyslu u sedacího nábytku, kde se vyskytují například ohnutá sedadla, opěradla či nohy. Ohýbaný nábytek ovšem má své zastoupení i ve výrobě stolů, postelí. Při hodnocení technických charakteristik nábytku se posuzuje především pevnost, celková stabilita, funkčnost, trvanlivost a celková kvalita zpracování každého kusu.

Ohýbané dřevo není využíváno jen v nábytkářském průmyslu, ale najde uplatnění i ve stavebnictví, kde je využíváno hlavně na stavbu zastřešení pro obytné stavby, kde díky ohnutým dřevěným prvkům krovů dosahujeme velkých rozponů (Svoboda a kol., 2017).

### 3 Tvarování dřeva – ohýbání

Za účelem získání požadovaných tvarů výrobků ze dřeva je nutné dřevo tvarovat. Tvářením dřeva rozumíme jeho tvarování, které se uskutečňuje působením vnějších sil a nedochází k odebrání materiálu. Tvářením dřeva je možno dosáhnout těmito technologiemi: ohýbáním, lamelováním a lisováním.

Ohýbání je technologická metoda tvářením dřeva, která je nejčastěji založena na plastifikaci dřeva a schopnosti udržení nového získaného tvaru po vysušení. Tato metoda je využívána hlavně při výrobě nábytku a to konkrétně nábytku sedacího. Cílem ohýbání je získání ohnutého zakřiveného tvaru z rovinného dílce a zajištění jeho tvarové stability (Hlásková, 2015).

Rozeznáváme 3 základní druhy ohýbání – volný ohyb neplastifikovaného dřeva, volný ohyb plastifikovaného dřeva a ohýbání pomocí pásnice (Trávník, 2008).

#### 3.1 Vlastní ohýbání

Ohýbání dřeva je technologický proces, který se skládá z těchto částí – plastifikace, samotné ohýbání, tvarová stabilizace a klimatizace.



Obr. 1 Technologické operace ohýbání (Trávník, 2008)

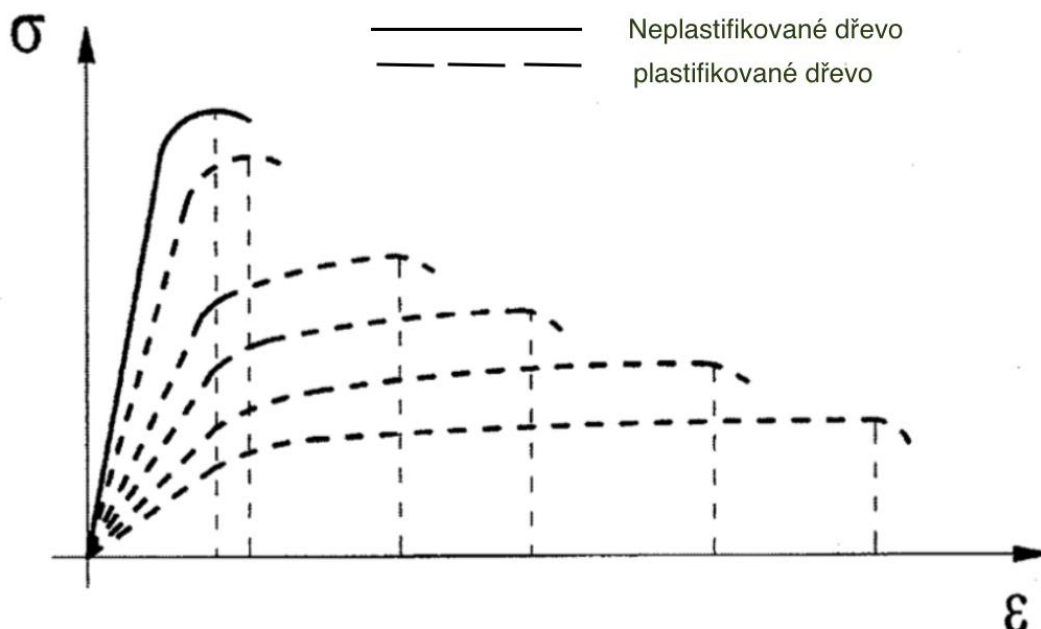
##### 3.1.1 Plastifikace

Plastifikace dřeva je prováděna před samotným ohýbáním dřeva. Neplastifikované dřevo je pevné, ale málo pružné. Plastifikace je fyzikálně-chemický proces, během kterého se zvyšuje plastičnost dřeva. Cílem plastifikace je dočasná změna fyzikálních a mechanických vlastností. Plastifikace je využívána například i při výrobě dýh a zhuštěného dřeva.

Zvýšení tvárnosti dřeva, tedy zvýšení plastické deformace je nejčastěji za pomoci zvýšení jeho teploty a vlhkosti. Během procesu plastifikace dochází k zvýšení teploty a vlhkost je udržována kolem MH. Během plastifikace klesá modul pružnosti dřeva, je snižována pružná deformace, vnitřní napětí a naopak dochází ke zvýšení plastické

deformace. Základní cíl plastifikace je graficky znázorněn na Obr. 2. (Gandelová, Šlezingerová, 2005).

V deformačním diagramu je vidět závislost napětí na deformacích, je zde zohledněn i rozdíl pro plastifikované a neplastifikované dřevo.



Obr. 2 Deformační diagram, neplastifikovaného dřeva a plastifikovaného dřeva (Zemiar, 2009)

Plastifikace může být prováděna hydrotermickou úpravou, termovzdušnou úpravou nebo chemickou úpravou dřeva či elektromagneticky (Zemiar, 2009).

### 3.1.1.1 Hydrotermická úprava dřeva

Principem hydrotermické úpravy je vzájemné působení vody a tepla na dřevo. Cílem hydrotermické úpravy je změna vlastností dřeva pro jeho lepší tvarování. Tyto způsobené změny mohou být dočasného i trvalého charakteru. Pro ohýbání dřeva jsou důležité změny dočasné, mezi tyto dočasné změny patří právě změna fyzikálně-mechanických vlastností dřeva. Změny trvalé jsou například změna barvy, uvolnění vnitřních pnutí a chemické změny ve dřevě (Dejmal, 1995).

Plastifikace hydrotermickou úpravou dřeva probíhá pařením nebo vařením. Působícím médiem je sytá vodní pára při atmosférickém nebo zvýšeném tlaku vzduchu u paření a u vaření je působícím médiem horká voda. Voda nebo pára působí při vysokých teplotách v rozmezí 150–250 °C. Plastifikace vařením či pařením patří mezi starší

technologické postupy, právě tato technologie byla poprvé použita i pro průmyslovou výrobu ohýbaného nábytku (Dejmal, 1995).

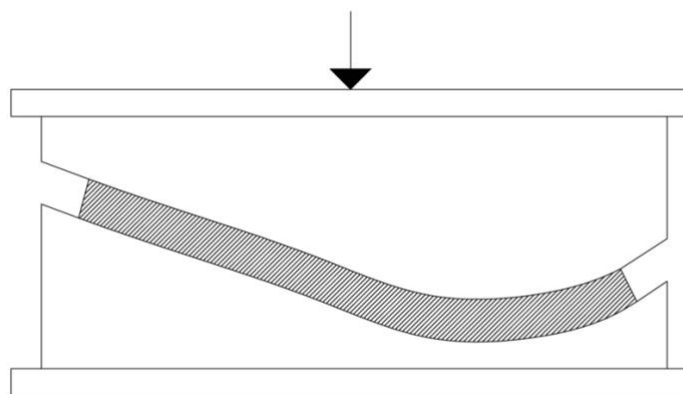
### 3.1.2 Ohýbání

Metody ohýbání jsou závislé na požadovaném tvaru ohýbaného materiálu, na způsobu plastifikace a na kvalitě ohybu. Metody ohýbání dělíme na ohýbání podle formy a na ohýbání podle formy s použitím pásnice.

#### 3.1.2.1 Volný ohyb neplastifikovaného dřeva

Volný ohyb má omezené uplatnění z důvodu malé roztažnosti dřeva. Nejčastěji volné ohýbání probíhá v lisech, které mají tvarované formy, které určí tvar ohýbaného dílce – patrici a matrici (Zemiar, 2009).

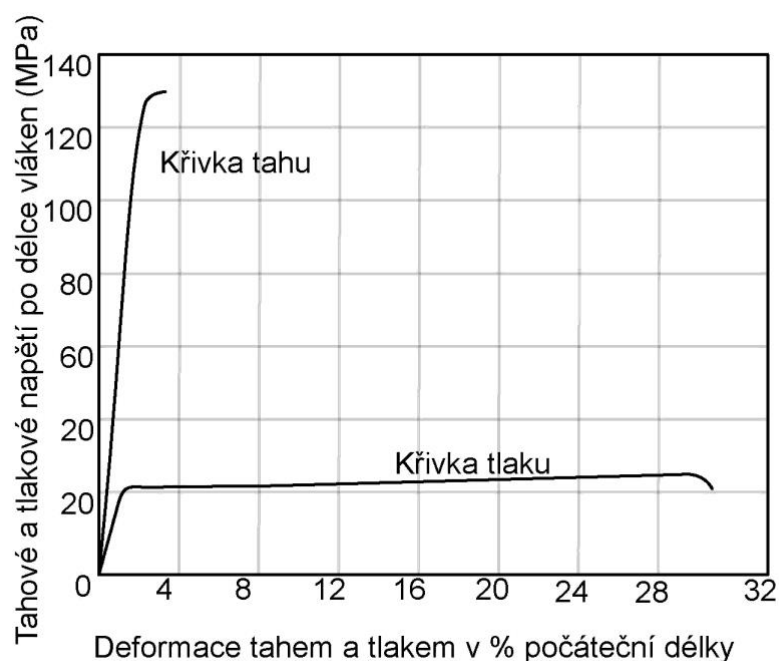
Při ohýbání neplastifikovaného dílce dřeva se vlákna na vnější straně ohybu prodlužují a vlákna nacházející se na vnitřní straně se stlačují, vytváří se tedy napětí tahové na vnější straně a napětí tlakové na straně vnitřní. Neutrální osa se nachází uprostřed – v této vrstvě se napětí eliminuje, ovšem pouze do určité meze. Při zvyšování ohybové síly se zvětšuje i působící tahové a tlakové napětí, které působí na dílec. Neplastifikované dřevo však není schopno se deformovat, prodloužit či zkrátit v dostatečné míře. Pro dřevo je typické, že se při zatížení dlouho neznatelně deformuje a náhle dojde k jeho porušení (Drápela, 1980).



Obr. 3 Ohýbání v lise (Zemiar, 2009)

### 3.1.2.2 Volný ohyb plastifikovaného dřeva

Plastifikace zvyšuje ohýbatelnost dřeva, ovšem ohýbáním dřeva bez pásnice lze získat velmi mírné ohyby s velkým poloměrem. Plastifikované dřevo má mnohem nižší pevnost v tlaku než pevnost dřeva v tahu v oblasti plastických deformací. Plastifikací docílíme posunutí neutrální osy z poloviny asi do dvou třetin ohýbaného hranolku směrem k vnější tahové straně. Modul pružnosti v tlaku je snížen více než modul pružnosti v tahu s vlákny, právě tím je dosaženo toho, že se neutrální osa posouvá směrem k vnější tahové straně ohybu. Dřevo je schopno větších deformací v tlaku než v tahu. Maximální přípustná deformace v tahu je u dřeva 1–2 %, zatímco deformace v tlaku dosahuje až 15–25 % (pro plastifikovaný buk a dub je tahová deformace dokonce v rozmezí 30–33 %). Tím pádem vnitřní vrstvy v ohybu musí být co nejvíce namáhány na tlak, a tím bude na vnější vrstvy působit co nejmenší namáhání na tah. Neutrální osa se posouvá z důvodu rozdílné vlhkosti, která působí na snížení pevnosti a pružnosti dřeva při jednotlivých způsobech namáhání (Drápela, 1980; Hlásková, 2015).



Obr. 4 Průběh napětí a deformace v tahu a tlaku u pařeného buku (Trebula, 1989)

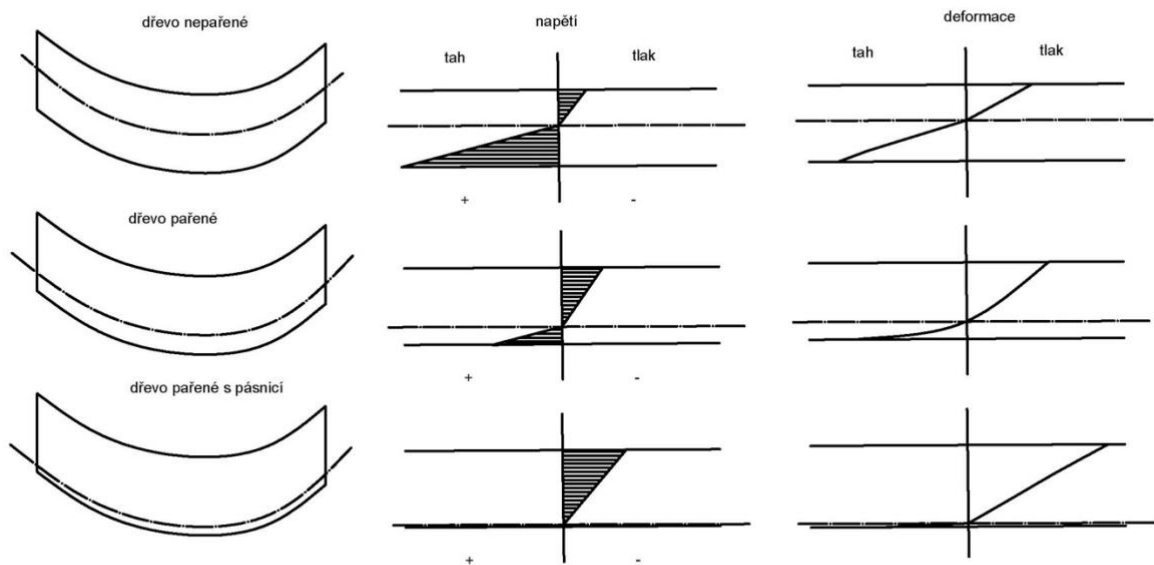
### 3.1.2.3 Ohýbání pomocí pásnice

Tento způsob ohýbání je vynálezem známého Michaela Thoneta. Michael Thonet vynalezl propracovanou technologii ohýbání dřeva, která je používána dodnes. Ohýbáním plastifikovaného dřeva za pomoci pásnice je možno docílit menších poloměrů zaoblení.



Pásnice je ocelový pás, který má na konci pevné zarážky, které brání prodlužování vrstev dřeva v tahové části a následně zamezují i praskání hranolku. Pro výrobu pásnice se používá ocel a to díky svým mechanickým vlastnostem – 20x vyšší modul pružnosti, než u dřeva.

Upevní-li se pásnice s koncovými zarážkami na vnější stranu ohýbaného hranolku, dochází k minimálnímu prodloužení vrstev dřeva na straně tahové a zároveň je možno docílit co největšího zkrácení vrstev na straně tlakové. Neutrální osa hranolku se díky pásnici posouvá až na samý okraj tahové vrstvy. Dosahujeme tak maximálních hodnot tlakových deformací (Zemiar, 2009).



Obr. 5 Napětí a deformace při ohýbání dřeva (Zemiar, 2009)

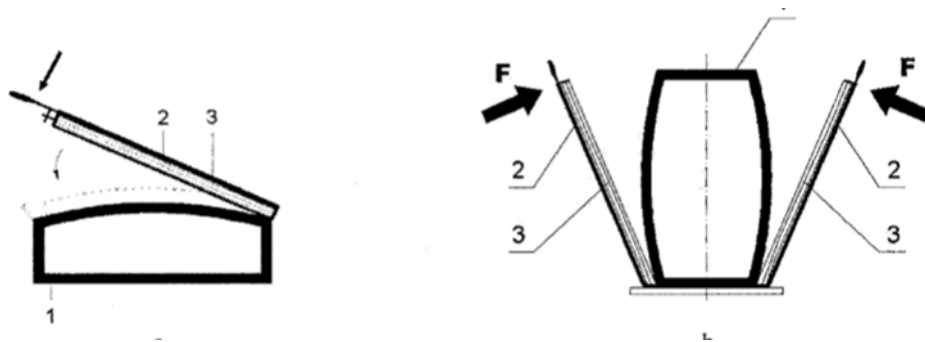
Ohýbání podle formy – může být buď ohýbání ruční nebo strojní, je zde možné volné prodloužení vrstev, které jsou namáhány na tah.

Ohýbání podle formy s použitím pásnice – také může být ruční nebo strojní, ovšem zde není možné volné prodloužení vrstev namáhaných na tah.

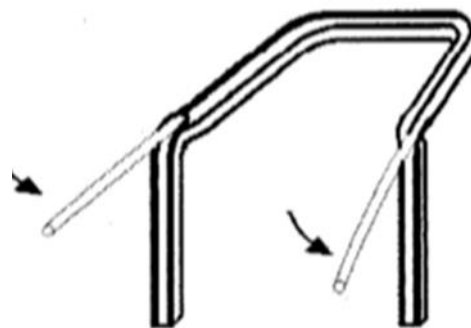
### 3.1.2.4 Ruční ohýbání

Ruční ohýbání patří mezi velmi fyzicky náročné práce. Náročnost je dána jednak charakterem dřeva a také podmínkami, ve kterých ohýbání probíhá. Ruční ohýbání se využívá u ohýbání dílců do jednoduchých tvarů s velkým poloměrem ohybu – příkladem mohou být například nohy u židlí a u dílců, které jsou prostorově tvarované, k ohybu se vždy používá pásnice.

Ohýbání jednoduchých tvarů s velkým poloměrem ohybu probíhá na formách, které mohou být vyhřívány či ne. Těmto formám se také říká tvárnice. Schéma ručního ohýbání pomocí tvárnice a pásnice je vidět na Obr. 6.



Obr. 6 Schéma ručního ohýbání, 1 – tvárnice, 2 – pásnice, 3 – hranolek



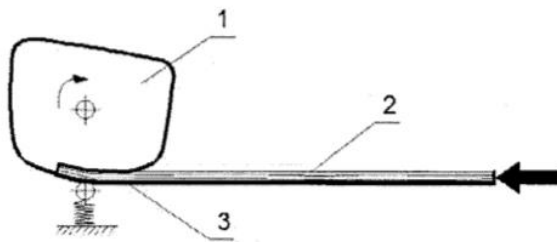
Obr. 7 Prostorové ohýbání (Zemiar, 2009)

Prostorové ohýbání také využívá formu, ke které je ohýbaný hranolek s pásnicí po ohnutí zafixován v jedné rovině a následně se ohýbá v rovině druhé. Důležité je, aby pásnice vždy byla na vnější straně ohybu v každé rovině (Zemiar, 2009; Hlásková, 2015).

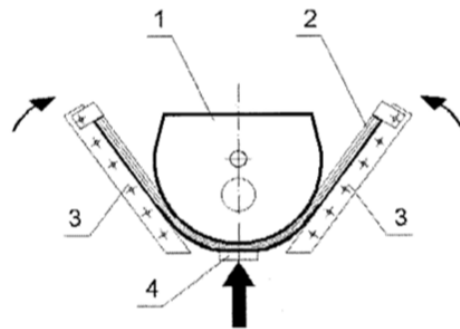
### 3.1.2.5 Strojní ohýbání

Strojní ohýbání zvyšuje produktivitu práce a snižuje zmetkovitost, výhodou také je, že odpadá fyzická námaha. Pomocí strojního ohýbání je možno ohýbat hranolky s použitím

pásnice, ale i bez ní. Stroje pro ohýbání jsou voleny dle tvaru a druhu ohybu. Pro otevřené ohyby jsou využívány ramenné ohýbačky či tvarové lisy. Ohýbání na ramenných ohýbacích strojích umožňuje zároveň ohýbat několik vedle sebe uložených hranolků. Pro uzavřené ohyby jsou využívány navíjecí ohýbačky.



Obr. 8 Navíjecí ohýbačka (Zemiar, 2009)



Obr. 9 Ramenná ohýbačka (Zemiar, 2009)

Pro všechny tyto druhy ohýbání platí, že ohnutý materiál má tendenci vracet se do původního tvaru, proto je nutná jeho tvarová stabilizace (Zemiar, 2009; Hlásková, 2015).

### 3.1.2.6 Pomůcky pro ohýbání

- Formy neboli tvárnice jsou konstruovány jako prvek, který je tvarován dle požadovaného ohybu. Na tvárnici je ohýbaný napařený hranolek přitlačován (nebo navíjen) a díky nim je ohýbán na požadovaný tvar.
- Pásnice – jedná se o tenký ocelový pás o tloušťce 0,75–0,8 mm, který je napínán na vnější stranu ohybu.
- Svorky a spony – tyto pomůcky jsou využívány k fixaci vytvořeného ohybu. Spony bývají vyrobeny z ocele. Svěrky slouží k přidržování konce hranolku k tvárnici (Hlásková, 2015).

### 3.1.3 Tvarová stabilizace

Docílené ohyby je nutné stabilizovat, aby jejich tvar zůstal zachován. Je zapotřebí odstranit dočasné změny mechanických vlastností materiálu, které vznikly plastifikací. Toho se docílí právě stabilizací – sušením ohybů. Nejčastěji je ke stabilizaci využíváno teplovzdušné sušení. Ohyb je stabilizován sušením a přitom je jeho povrch z části chráněn pásnicí a zároveň i tvárnicí. Sušení probíhá v kanálových nebo komorových sušárnách, dílce jsou zde ukládány na paletách nebo vozících.

Sušení ovlivňuje druh dřeviny, vlhkost, složitost ohybu a příčný průřez, dále také záleží na technologických faktorech jako je teplota vzduchu, relativní vlhkost vzduchu a rychlost proudění vzduchu.

Stabilizace je závislá na způsobu plastifikace, složitosti ohybu, tloušťky ohýbaného materiálu, druhu dřeviny a metodě ohýbání. Ohyby jsou vysušovány na 12–15 %, tvarové stabilizace se docílí při vysušení na  $8 \pm 2$  % (Trávník, 2008).

#### **3.1.4 Klimatizace**

Při sušení ohybů i s pásnicí nelze dosáhnout stejné vlhkosti v celém průřezu hranolku, jsou zde vlhkostní rozdíly – vlhkostní spád. Je nutné tedy hranolky klimatizovat. Klimatizace hranolků vyrovnává tyto rozdíly, které vznikly během sušení. Jednotlivé hranolky jsou uloženy v místnostech, kde je regulována teplota, která je kolem 20 °C a relativní vlhkost vzduchu se pohybuje kolem 55–60 %, tyto podmínky jsou vhodné na vyrovnání vlhkosti v hranolku na  $8 \pm 2$  %. Klimatizace je proces, který trvá přibližně 6 až 20 dnů (Trávník, 2007).

## 4 Ohýbatelnost dřeva - charakteristiky

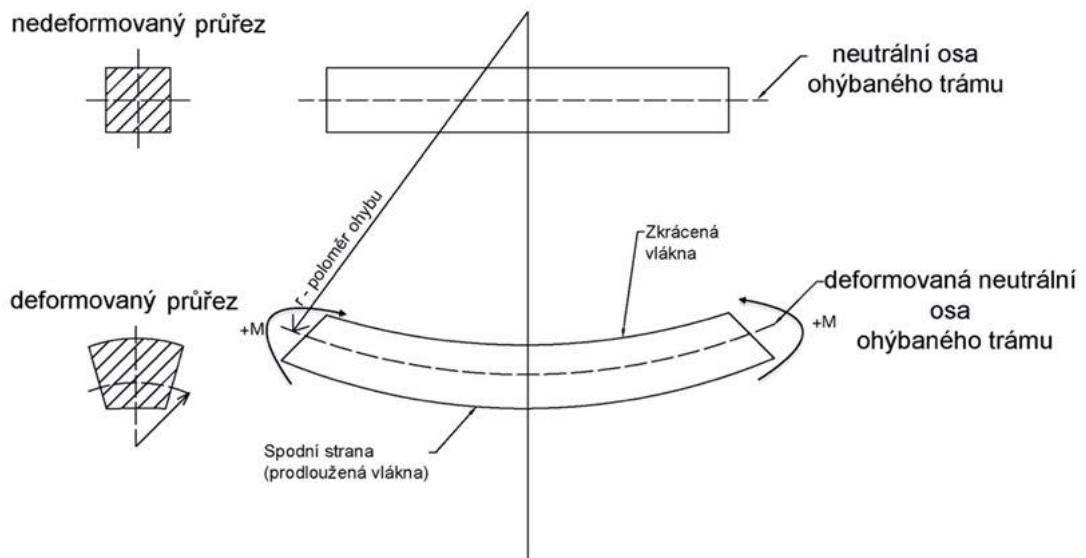
Ohýbatelnost dřeva je vlastnost dřeva, která vyjadřuje schopnost materiálu měnit svůj tvar při působení ohybového momentu, vyjadřuje tedy potenciál dřeva v ohybu, lze ji klasifikovat jako pozitivní i negativní charakteristiku. Její klasifikace závisí na zamýšleném použití daného materiálu. U dřeva určeného k ohýbání například pro výrobu nábytku je tato vlastnost pozitivní, zatímco v případě dřeva pro využití jako stavebního materiálu může mít tato vlastnost negativní vliv na trvanlivost a stabilitu konstrukce. Tato vlastnost dřeva posuzuje různé druhy napjatosti, jde tedy o speciální druh silového namáhání (Gaff a kol., 2018; Hýsek a kol., 2018).

V závislosti na použití materiálu lze pro její vyjádření využít různé charakteristiky ohýbatelnosti. Mezi důležité charakteristiky patří průhyb na mezi úměrnosti –  $Y_E$ ), úroveň maximálního plastického průhybu - průhyb na mezi pevnosti –  $Y_P$ , a poměr mezi průhybem na mezi úměrnosti a průhybem na mezi pevnosti ( $Y_E:Y_P$ ). Také se zohledňuje síla na mez úměrnosti –  $F_E$  a síla na mez pevnosti –  $F_P$ . Jelikož je ohýbatelnost dřeva velmi závislá na tloušťce materiálu, nejčastěji se pro vyjádření této charakteristiky využívá poměr tloušťky materiálu k nejmenšímu dosažitelnému poloměru ohybu –  $K_{oh}$ , neboli koeficient ohýbatelnosti (Svoboda a kol., 2019; Gaff a kol., 2015b).

Každá z těchto charakteristik má své výhody a zdůrazňuje konkrétní účel budoucího použití materiálu (Gaff a kol., 2018).

### 4.1 Proces ohýbání

Je-li dřevo napnuto v ohybu, způsobuje zde ohybový moment deformaci a dochází ke změně tvaru, viz Obr. 10. Kromě tahového a tlakového napětí se zde vyskytuje také napětí smykové. Deformace je výsledkem působení napětí smykového i normálového v průřezu ohýbaného dřeva. Je-li dřevo zatěžováno svislými silami, vznikají v průřezu příčné posuvné síly  $F_t$  a ohybový moment  $M$ , viz Obr. 11. Normálové napětí, které vzniká v průřezu ohýbaného dřeva, je způsobeno právě ohybovým momentem. Smykové napětí ve vertikálním směru vzniká v důsledku působení posouvajících vnitřních sil v ohýbaném průřezu. Dále vzniká smykové napětí v horizontálním směru, které je vyvoláno na základě působení normálového napětí na průřezu, které se snaží posunout jednotlivé vrstvy vláken. Ve vzdorujícím materiálu pak dochází ke stavu napjatosti. Při hlubším zkoumání vlivu smykového napětí na hodnoty ohybových charakteristik se využívá rovnice (1) (Babiak a kol., 2018; Gaff a kol., 2015; Hýsek a kol., 2018).



Obr. 10 Deformace ohýbaného prvku (Babiak a kol., 2018)

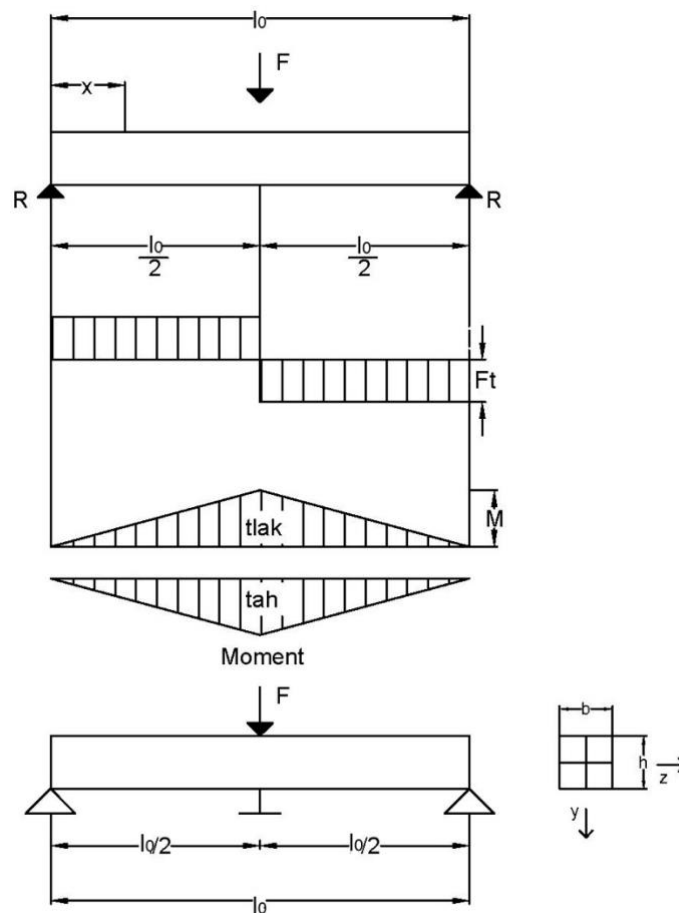
$$F_t = \frac{dM}{dx} \quad (1)$$

Kde:

$F_t$  – příčná smyková posuvná síla,

$dM$  – změna ohybového momentu,

$dx$  – změna vzdálenosti  $x$ .



Obr. 11 Průběh 3-bodového ohybu (Babiak a kol., 2018)

Míru ohýbatelnosti je možné chápat jako nejmenší poloměr křivky, do které je možné těleso ohnout, aniž by došlo k jeho porušení. Zkoušení ohýbatelnosti dřeva je zkoušeno pomocí vyměnitelných šablon, na kterých je zkoušené dřevo ohýbáno, poloměr šablon je postupně snižován, dokud nedojde k porušení celistvosti dřeva – dojde k rozštípnutí či zlomu. Ohýbatelnost je možné zvyšovat plastifikací, pozitivní vliv na ohýbatelnost mají také dlouhá vlákna, která mají minimální odklon od podélné osy, rovnoměrná stavba letokruhů a vlhkost dřeva do MH. Ohýbatelnost je také kvalifikována pomocí koeficientu ohýbatelnosti (Gaff a kol., 2016; Gandelová, 2002).

#### 4.2 Koeficient ohýbatelnosti a minimální poloměr ohybu

Koeficient ohýbatelnosti je kvantitativní bezrozměrná charakteristika, která je vyjádřena poměrem tloušťky ( $h$ ) ohýbaného materiálu k minimálnímu poloměru ohybu ( $R_{\min}$ ). Limit pro většinu dřevin je  $h:r = 1:35 - 1:45$ .

$$k_{oh} = \frac{h}{R_{min}} \quad (2)$$

V současné době jsou známy dvě rovnice, ze kterých se počítá koeficient ohýbatelnosti (Gaff a kol., 2016). Rovnice 3 vychází z geometrie ohybu a rovnice 4 vychází ze základní rovnice ohybu.

$$K_{ohB} = \frac{h}{R_{minB}} = \frac{h}{\frac{l_0^2}{8*y_{max}} - \frac{y_{max}}{2} - \frac{h}{2}} \quad (3)$$

$$K_{ohC} = \frac{h}{R_{minC}} = \frac{h}{\frac{l_0^2}{12*y_{max}}} \quad (4)$$

Výpočet koeficientu ohýbatelnosti vychází ze znalosti minimálního poloměru ohybu  $R_{min}$ , který lze vypočítat pomocí tohoto vzorce:

$$R_{min} = \frac{l_0^2}{8Y} + \frac{Y}{2} \quad (5)$$

Kde:

$R_{min}$  – minimální poloměr ohybu v mm,

$l_0$  – vzdálenost podpěr v mm,

$Y$  – maximální průhyb zkušební tělesa v části čistého ohybu v mm.

Minimální poloměr ohybu má stejně jako koeficient ohýbatelnosti rovnici pro  $R_{minB}$  a  $R_{minC}$ .

$$R_{minB} = \frac{l_0^2}{8*y_{max}} + \frac{y_{max}}{2} - \frac{h}{2} \quad (6)$$

$$R_{minC} = \frac{l_0^2}{12*y_{max}} \quad (7)$$

Koeficient ohýbatelnosti u jednotlivých druhů ohýbání:

- ohýbání nezměkčeného dřeva bez pásnice se pohybuje v rozsahu 0,003–0,1,
- ohýbání změkčeného dřeva bez pásnice se pohybuje v rozsahu do 0,15,
- ohýbání změkčeného dřeva s pásnicí může být až do 1,0.



S rostoucí tloušťkou ohýbaného materiálu se snižuje hodnota koeficientu ohýbatelnosti. Síla, kterou je nutno vyvinout pro docílení ohybu naopak stoupá (Gaff a kol., 2016).

## 5 Dřevo jako konstrukční materiál a jeho vlastnosti

Dřevo patří díky svým specifickým vlastnostem mezi nejvíce používaný materiál na výrobu nábytku, nosných konstrukcí či běžných užitkových výrobků. Jedná se o přírodní obnovitelný materiál. Mezi přednosti dřeva jako materiálu patří jeho příjemný estetický vzhled, vysoká pevnost při relativně malé hustotě a snadná opracovatelnost. Dále dřevo nabízí dobré tepelně-izolační vlastnosti a odolává chemikáliím. Právě pro tyto vlastnosti je dřevo využíváno v několika odvětvích – výroba nábytku, ve stavebnictví, výroba dých, hraček, hudebních nástrojů. Ne všechny jeho vlastnosti jsou přívětivé, jelikož dřevo patří mezi heterogenní materiál, v důsledku měnících se podmínek se mění i jeho vlastnosti. Za jeho nepříznivé vlastnosti pokládáme fakt, že se jedná o hygroskopický materiál. Na základě hygroskopicity dřevo mění vlhkost dle okolního prostředí, důsledkem hygroskopicity dřevo mění svůj rozměr i některé jeho fyzikálně-mechanické vlastnosti. Tyto nedostatky se odstraňují vhodnou modifikací dřeva. Dřevo také patří mezi anizotropní materiál, musí se tedy brát zřetel na to, že jeho vlastnosti jsou různé v jednotlivých směrech. Zpracovává se především dřevo z kmene stromů (Šlezingerová, 2005; Aydin a kol., 2004).

### 5.1 Buk lesní

Buk lesní latinsky (*Fagus sylvatica*) patří mezi bukovité. Roste v lesích na vápnatých nezamokřených půdách po celé Evropě v nadmořských výškách 300–1 000 m n. m. V České Republice se buku nejlépe daří ve výškách okolo 500–800 m n. m. Buk dorůstá výšky 30–40 metrů a průměr kmene se při této výšce pohybuje okolo 1,5 m. Koruna buku je vejcovitého tvaru, který může být až široce rozvětvený s větvemi, které rostou pod ostrým úhlem ke kmeni. Kůra buku je hladká a má světle šedou barvu (Stromy, 2008).

Buk patří mezi roztroušeně pórovité dřeviny s relativně dobře viditelnými letokruhy a dřeňovými paprsky. Dřevo buku je bezjádrové s častým výskytem nepravého jádra u starších stromů. Běl na okraji kmene má vyšší vlhkost než okolní dřevo a u čerstvého dřeva je běl žlutobílé barvy, později má barvu až narůžovělou. Celkem je barva bukového dřeva světle hnědá až narůžovělá (Gandelová, 2002).

Bukové dřevo je průmyslově velmi využívané díky svým pozitivním vlastnostem. Buk je díky svým vlastnostem nejvíce využívaný na výrobu ohýbaného nábytku. Také se využívá na výrobu dých. Vyrábí se z něho krájené dýhy, ale i dýhy loupané na výrobu

překližovaných desek (Böhm a kol., 2012). Dále je také bukové dřevo využíváno v pilářském průmyslu na výrobu prken a fošen.

Shrnutí mechanických a fyzikálních vlastností dřeva buku jsou vidět v tab. 1. Hodnoty jsou uváděny při vlhkosti dřeva 12 %.

### Vlastnosti bukového dřeva

Základní vlastnosti dřeva jsou určeny především jeho anatomickou a chemickou stavbou. Dřevo je anizotropní, pórovitý, hygroskopický a nehomogenní materiál. Z těchto jeho základních charakteristik vyplývají i jeho fyzikální a mechanické vlastnosti (Gandelová, 2002).

Tab. 1 Mechanické a fyzikální vlastnosti buku (Sarvaš a kol., 2010; Wagenführ, 1974)

Vlastnost	Rovnoběžně s vlákny	Kolmo na vlákna
Hustota [Kg/m <sup>3</sup> ]	720	720
Pevnost v tlaku [Mpa]	62	
Pevnost v tahu [Mpa]	135	10,7
Pevnost v ohybu [Mpa]	123	
Pevnost ve smyku [Mpa]	8	
Modul pružnosti v ohybu [Mpa]	16 000	
Houževnatost [J/cm <sup>2</sup> ]		8,04
Tvrdost podle Brinella [Mpa]	72	34
Sesychání [%]	0,3	5,8

Vlastnosti dřeva dělíme na vlastnosti fyzikální a vlastnosti mechanické.

## 5.2 Vybrané fyzikální vlastnosti

Tyto vlastnosti se zjišťují bez porušení dřeva a jeho chemického složení. Velký podíl na fyzikálních vlastnostech dřeva je fakt, že patří mezi anizotropní materiál – jeho vlastnosti jsou tedy různé v závislosti na tom, v jakém směru dané vlastnosti zkoumáme (Matovič, 1993).

### 5.2.1 Vlhkostní vlastnosti

Dřevo jako hygroskopický materiál přijímá či odevzdává vodu z okolí. Voda je důležitou součástí stavby dřeva, tato voda obsažena ve dřevě se podílí i na změnách vlastností dřeva. Změny vlastností dřeva jsou často negativního charakteru. Dřevo na základě změny obsahu vody může měnit svou hustotu, nastávají i rozměrové změny,

mění se jeho odolnost vůči dřevokazným houbám a hmyzu. Změny se týkají i fyzikálních a mechanických vlastností (Perelygin, 1965; Gandelová, 2012).

Vlhkostí dřeva chápeme jako množství vody, které se nachází ve dřevě. Je vyjadřována jako poměr hmotnosti vody k hmotnosti absolutně suchého dřeva, mluvíme-li o absolutní vlhkosti. V případě, že mluvíme o vlhkosti relativní, vyjadřujeme ji jako poměr hmotnosti vody a hmotnosti mokrého dřeva. Vlhkost ve dřevě je vyjadřována v %.

Absolutní vlhkost je počítána dle rovnice (8) (Perelygin, 1965; Gandelová, 2012).

$$w_{abs} = \frac{m_w - m_0}{m_0} * 100 = \frac{m_v}{m_0} * 100 [\%] \quad (8)$$

Kde:

$w_{abs}$  – absolutní vlhkost (%),

$m_w$  – hmotnost vlhkého dřeva (kg.g),

$m_0$  – hmotnost absolutně suchého dřeva (kg.g),

$m_v$  – hmotnost vody (kg.g).

Relativní vlhkost je počítána dle rovnice (5).

$$w_{rel} = \frac{m_w - m_0}{m_w} * 100 = \frac{m_v}{m_w} * 100 [\%] \quad (9)$$

Kde:

$w_{rel}$  – relativní vlhkost (%),

$m_w$  – hmotnost vlhkého dřeva (kg.g),

$m_0$  – hmotnost absolutně suchého dřeva (kg.g),

$m_v$  – hmotnost vody (kg.g).

Relativní a absolutní vlhkost dřeva je možno mezi sebou přepočítat dle následujících rovnic:

$$w_{rel} = \frac{100 \cdot w_{abs}}{100 + w_{abs}} \quad (10)$$

$$w_{abs} = \frac{100 \cdot w_{rel}}{100 + w_{rel}} \quad (11)$$

Pro definování mechanických a fyzikálních vlastností se využívá vlhkost absolutní.

### 5.2.1.1 Voda ve dřevě

Z hlediska uložení vody ve dřevě je možno vodu rozdělit na vodu volnou a vodu vázanou. Vodu vázanou je dále možno rozdělit na vodu chemicky vázanou a vodu hygrokopickou (Požgaj a kol., 1997).

Voda volná neboli voda kapilární vyplňuje ve dřevě lumény buněk a mezibuněčné prostory. Tato voda má při posuzování mechanických a fyzikálních vlastností velmi malý význam.

Voda chemicky vázaná je součástí chemických sloučenin dřeva, ze dřeva ji lze odstranit pouze spalováním dřeva. Ve dřevě je tedy zastoupena i tehdy, má-li dřevo 0% absolutní vlhkost. Pro posuzování mechanických a fyzikálních vlastností dřeva nemá žádný význam.

Voda hygrokopická se nachází v buněčných stěnách a je vázána vodíkovými můstky hydroxylových skupin OH amorfních částí hemicelulóz a celulózy. Ve dřevě se voda hygrokopická vyskytuje v rozmezí 0–30% vlhkosti. Tato voda je zásadní při posuzování mechanických a fyzikálních vlastností (Horáček, 1998).

Důležitým pojmem je bod nasycení vláken (BNV). BNV je vlhkost dřeva, při které jsou buněčné stěny nasycené vodou, ale v lumenech již není žádná voda v kapalném stavu. Tento bod určuje mez mezi vodou volnou a vodou vázanou (Požgaj a kol., 1997).

Bukové dřevo v důsledku změny vlhkosti hodně sesychá v tangenciálním a radiálním řezu. Patří mezi dřeviny velmi sesychavé a bobtnající (Matovič, 1993).

### 5.2.2 Hustota

Hustota patří mezi jednu z nejdůležitějších fyzikálních vlastností dřeva. Hustotou dřeva ( $\rho$ ) se rozumí hmotnost 1 m<sup>3</sup> dřeva při dané vlhkosti, udávaná na 1 kg váhy. Jednotkou hustoty je kg/m<sup>3</sup>. Hustotu dřeva silně ovlivňuje jeho vlhkost, hodnoty hustoty

značně kolísají se změnou vlhkosti (Požgaj a kol., 1997). Z tohoto důvodu se hustota dělí podle vlhkostních stavů:

- hustota dřeva při vlhkosti 12 %,
- hustota vlhkého dřeva  $w < 0$  %,
- hustota suchého dřeva  $w = 0$  %.

Dřeva se rozdělují do tří skupin, a to dle měření jejich hustoty při 12% vlhkosti.

- dřeva s nízkou hustotou:  $\rho_{12} < 550 \text{ kg/m}^3$  – například smrk, borovice, jedle,
- dřeva se střední hustotou:  $\rho_{12} 550 \text{ } 750 \text{ kg/m}^3$  – například modřín, buk jilm,
- dřeva s vysokou hustotou:  $\rho_{12} > 750 \text{ kg/m}^3$  – například dub, akát, habr.

Buk patří mezi dřeviny se střední hustotou. V tabulce níže jsou hodnoty hustoty buku dle různých autorů.

Tab. 2 Hustota buku dle různých autorů

	Hustota při $W=0$ % ( $\text{kg/m}^3$ )	Hustota při $W=12$ % ( $\text{kg/m}^3$ )
Lexa, (1952)	680	710
Požgaj, (1997)	684	-
Wagenfuhr, (2000)	680	720
Kollmann, (1951)	680	720
Šlezingerová, Gandelová (2008)	685	720
Horáček, (2001)	685	720

Rovnice pro výpočet hustoty:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (12)$$

Kde:

$m$  – hmotnost dřeva (kg),

$V$  – objem dřeva ( $\text{m}^3$ ).

### 5.2.3 Tepelné vlastnosti

Mezi nejdůležitější tepelné vlastnosti dřeva patří jeho tepelná vodivost a teplotní délková roztažnost. Přenos tepla ve dřevě má velký význam při technologii výroby všude, kde je nutné vědět rozložení tepla ve dřevě například při hydrotermické či chemické úpravě dřeva nebo při lisování (Zemiar, 1997).

### 5.2.4 Elektro-fyzikální vlastnosti

Elektro-fyzikální vlastnosti dřeva jsou důležité při samotném použití dřeva a také při jeho technologii úpravy. Elektrické vlastnosti dřeva jsou také využívány pro zjišťování některých vlastností dřeva (měření vlhkosti aj.).

Dřevo je v suchém stavu výborným izolantem, ovšem je-li jeho vlhkost nad bodem nasycení buněčných stěn, stává se z něho polovodič (Požgaj a kol., 1997).

### 5.2.5 Akustické vlastnosti dřeva

Dřevo má velmi dobré akustické vlastnosti. Právě proto je i často využíváno na výrobu hudebních nástrojů.

### 5.2.6 Povrchové a optické vlastnosti

Povrch dřeva je plocha, která dělí dřevní substanci od okolního prostředí. Vzhled povrchu je dán jeho anatomickou stavbou a také jeho opracováním. Mezi důležitý ukazatel povrchu dřeva patří jeho drsnost.

Mezi optické vlastnosti dřeva patří jeho barva. Barva určuje vzhled dřeva a její význam je velmi důležitý při výrobě nábytku a výrobků ze dřeva. Dle barvy je také možné určovat některé dřevní vady. Barva dřeva je dána jeho chemickými složkami (Požgaj a kol., 1997).

## 5.3 Mechanické vlastnosti

Mechanické vlastnosti udávají odolnost tělesa vůči účinku vnějších sil. Tyto vlastnosti také patří mezi vlastnosti, které jsou závislé na anizotropii dřeva, vlastnosti jsou výrazně rozdílné ve směru podélném a kolmém na vlákna (Požgaj a kol., 1997).

Mechanické vlastnosti se rozdělují na mechanické vlastnosti základní, technologické a odvozené.

Mezi mechanické vlastnosti řadíme houževnatost, pružnost, pevnost a plastičnost. Tyto 4 vlastnosti řadíme mezi mechanické vlastnosti základní. Odvozené mechanické

vlastnosti jsou tvrdost, odolnost proti tečení, odolnost proti trvalému zatížení a odolnost proti únavovému lomu. Technologické mechanické vlastnosti jsou součástí předmětu technologie dřev – jedná se například o štípatelnost, ohýbatelnost a impregnovatelnost.

Mechanické vlastnosti dřeva mají anizotropní charakter. Rozdílné mechanické vlastnosti v různých směrech je možné vidět na modelu z Obr. 12. Vidíme zde, že je dostačující zavedení 3 různých rovin pružné symetrie, příčnou (RT), radiální (LR) a poslední tangenciální (LT) (Gandelová, 2002).

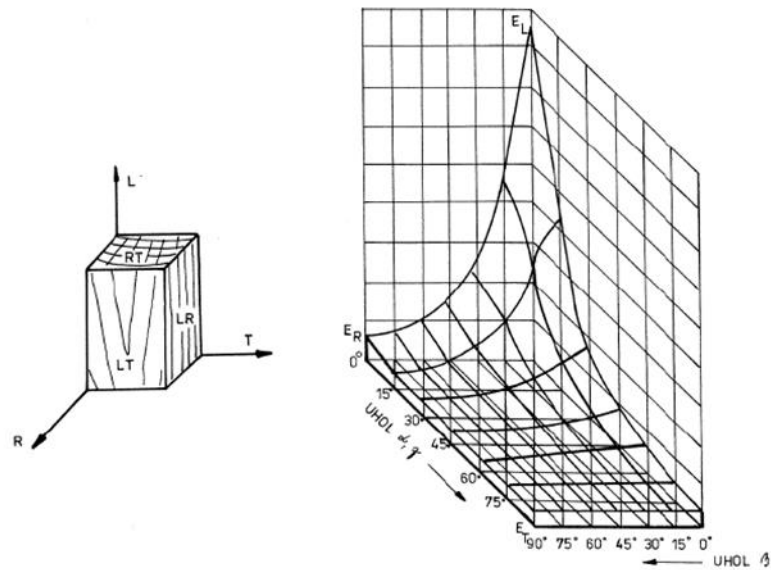
Mechanické vlastnosti dřeva jsou proměnné, k jejich zjištění se provádí zkoušky a následné vyhodnocení výsledků získaných při zkoušení. Rozdílné výsledné hodnoty naměřené u stejné dřeviny při zkoušení mohou být způsobeny například různou hustotou, jinou délkou či průběhem vláken. Ke správnému vyhodnocení se využívá variační koeficient. Variační koeficient udává podíl směrodatné odchylky a průměrné hodnoty (Kafka, 1989).

Mechanické vlastnosti, které jsou důležité pro experimentální část práce: pevnost dřeva, pružnost dřeva, plastičnost dřeva, dále jsou důležité moduly pružnosti, mez úměrnosti a pružná deformace.

### 5.3.1 Mechanické namáhání

Děj, při kterém dochází k vzájemnému působení dřeva a působících mechanických sil, nazýváme mechanické namáhání. Výsledkem působení mohou být dočasné či trvalé tvarové změny tělesa. Výsledek namáhání závisí na stavbě dřeva, chemickém složení dřeva a geometrii zkušebních vzorků. Namáhání dřeva můžeme také rozdělit na mechanické, tepelné, vlhkostní a další. Je-li dřevo využito jako konstrukční materiál působí zde zatížení mechanické tak i vlhkostní. Právě tato kombinace zatížení v závislosti v čase velmi ovlivňuje velikosti vzniklých deformací. S tímto jevem se nejčastěji můžeme setkat u ohybu dřeva (Požgaj a kol., 1997).





Obr. 12 Roviny pružné symetrie dřeva a diagram anizotropie modulu pružnosti  
(Požgaj a kol.,1997)

Základní druhy mechanického namáhání se rozlišují podle druhu napětí, které v tělese vzniká vlivem působící vnější síly. Rozeznáváme mechanické namáhání v krutu, ve smyku, na tah a na tlak a poslední namáhání v ohybu.

### Kritéria stavu napjatosti

Stav napjatosti vzniká, pokud materiál musí odolávat namáhání vnějšími silami. Stav napjatosti je prvním kritériem pro mechanické namáhání. Stav napjatosti může být jednoosý, dvouosý nebo víceosý. Za druhé kritérium je považováno kritérium časové. Dřevo vykazuje jiné chování při různých rychlostech určitého namáhání. Z časového hlediska je také možné mechanické namáhání po stránce kvalitativní rozdělit do skupin (rychlost deformace, rychlost zatížení, frekvence namáhání, rychlost působení namáhání a rychlost napětí).

### 5.3.2 Napětí

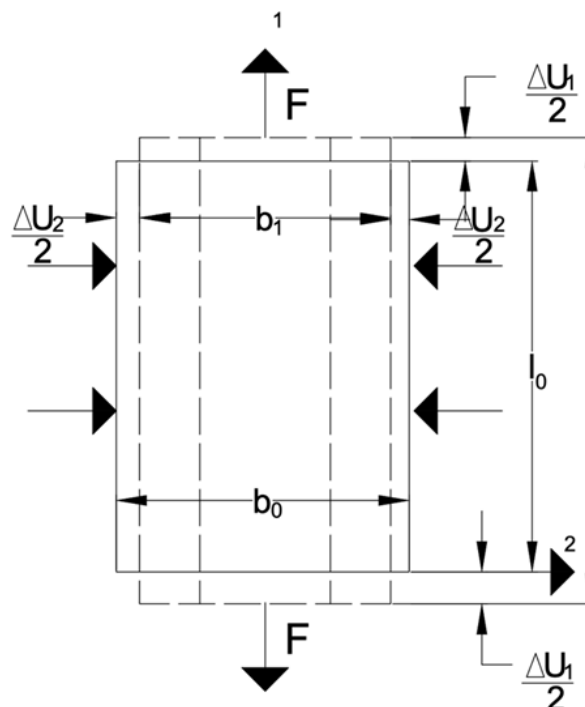
Napětí je definováno velikostí vnitřní síly, která je vztažena na jednotku plochy tělesa. Síly, které působí na těleso, působí v různých směrech. Podle směru těchto působících sil rozlišujeme napětí normálové  $\sigma$  – zde síla působí kolmo na plochu tělesa. Normálové napětí vzniká v tahu a v tlaku. Dalším druhem napětí je napětí tangenciální neboli smykové  $\tau$  – zde síla působí rovnoběžně s plochou tělesa. Je-li těleso namáháno v ohybu,

působí zde normálové napětí i napětí tangenciální. Napětí v krutu je zvláštní druh ohybového momentu (Gandelová, 2002).

Jelikož dřevo patří mezi anizotropní materiál, většinou se tedy jedná o trojosý stav napjatosti. Druhem, počtem a průběhem napětí je definován stav napjatosti.

### 5.3.3 Deformace

Působením mechanických sil na těleso dochází k rozměrovým a tvarovým změnám. Deformaci můžeme popsat změnami vzdáleností dvou různých bodů tělesa a změnami úhlů, které jsou dány třemi body tělesa při dodržení spojitosti tělesa. Deformace je možné rozdělit dle jejich vratnosti do 3 kategorií. Deformace pružné – těleso se po ukončení působení vnějších sil ihned vrátí do původního stavu. Deformace pružné v čase – těleso se po ukončení působení vnějších sil vrátí do původního stavu, ovšem k návratu nedochází okamžitě, ale až po uplynutí nějaké doby. Posledním typem deformace je deformace plastická – plastická deformace je deformace nevratná, těleso po ukončení působení vnější sil nevratně změní svůj tvar i rozměry (Kuklík, 2005).



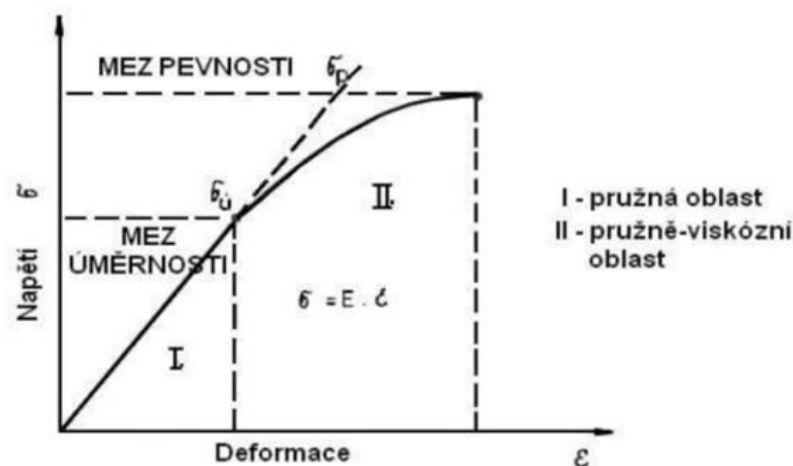
Obr. 13 Změna tvaru tělesa při normálovém napětí v tahu dle Požgaje (1997)

#### 5.3.3.1 Hookův zákon – vztah mezi napětím a deformací

Vztah mezi napětím a deformací popisuje Hookův zákon. Tyto vztahy je důležité poznat, jelikož díky správnému poznání těchto vztahů se předpokládá správný výběr

a použití dřeva na různé typy dřevěných konstrukcí. Obecný Hookův zákon popisuje lineární závislost každé složky přetvoření na všech složkách napětí. Deformace je úměrná působícími napětí do určité fáze, dále platí, že každá složka napětí je přímo úměrná každé složce deformace.

Vztah mezi napětím a deformací znázorňuje pracovní diagram, viz Obr. 14 (Matovič, 1993; Niemz, 1993).



Obr. 14 Pracovní diagram dle (Požgaj a kol., 1997)

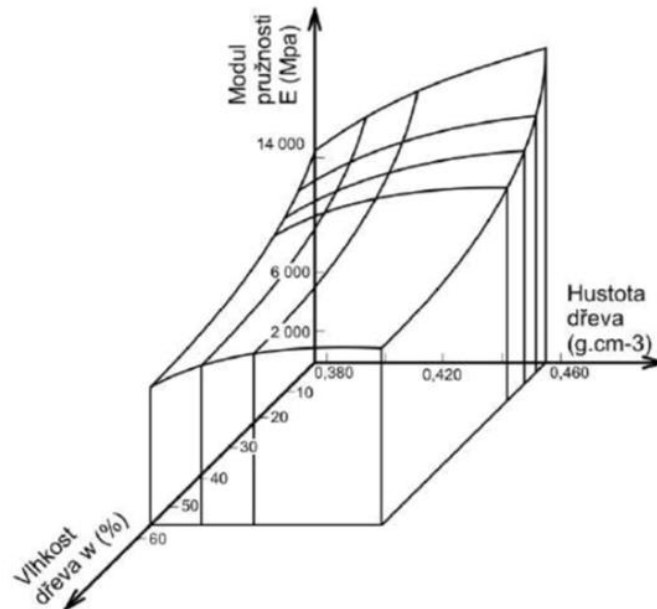
### 5.3.4 Pružnost dřeva

Pružnost dřeva je definována jako jeho schopnost dosáhnout původních rozměrů po odstranění vnějšího zatížení. Pružnost dřeva je popisována pomocí konstant modulu pružnosti  $E$  a smykového modulu  $G$  a Poissonovými čísly  $\mu$ . Další variantou je popsání pružnosti pomocí parametrů z pracovního diagramu mezi úměrnosti, pružnou deformací a energií pružné deformace (Gandelová, 2002).

#### 5.3.4.1 Modul pružnosti

Modul pružnosti vyjadřuje vnitřní odpor materiálu proti pružné deformaci. Čím většího napětí je potřeba pro vyvolání deformace tím větší modul pružnosti materiál má. Modul pružnosti v tahu, tlaku a ohybu tedy u normálového napětí je označován jako  $E$  – Youngovy moduly pružnosti, u napětí tangenciálního tedy namáhání ve smyku a krutu je modul pružnosti označován indexem  $G$ . Hustota a vlhkost dřeva výrazně ovlivňují modul pružnosti. Čím vyšší je hustota dřeva, tím více se zvětšuje modul pružnosti, naopak s rostoucí vlhkostí se modul pružnosti snižuje, viz Obr. 15. Je-li namáhání víceosé, musí být použit objemový modul pružnosti označován  $E_k$ . Diagram průběhu napětí deformace u ohybu, tahu a tlaku ukazuje, že se nacházíme v oblasti do meze úměrnosti, vztah

je lineární a rovnice je ve tvaru přímky  $y = k \cdot x$ . Převeďte-li se tento vztah na souřadnice deformace a napětí, rovnice získává tvar Hookeova zákona (Požgaj a kol., 1997).



Obr. 15 Graf znázorňující závislost modulu pružnosti na hustotě a vlhkosti dřeva (Požgaj a kol., 1997)

### 5.3.4.2 Modul pružnosti ve statickém ohybu

Modul pružnosti v ohybu je udávám pouze kolmo na vlákna dřeva v tangenciálním směru. Modul pružnosti v ohybu vyplývá z normálového napětí tělesa, které je způsobeno ohybovým momentem. Zatížený vzorek je namáhán na tah a na tlak, neutrální osa uprostřed vzorku je nezatížena. Deformace, která vzniká při ohýbání, je popisována poměrem vzniklého průhybu vzorku a poloměru ohybu. Modul pružnosti ve statickém ohybu vyjádříme (Horáček, 2008):

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} [MPa] \quad (13)$$

Kde:

$E$  – modul pružnosti,

$\sigma$  – napětí,

$\varepsilon$  – deformace.

Rovnice pro výpočet modulu pružnosti v ohybu:

$$E = \frac{Fl_0^3}{4bh^3\Delta y} [MPa] \quad (14)$$

Kde:

$E$  – modul pružnosti,

$F$  – působící síla (N),

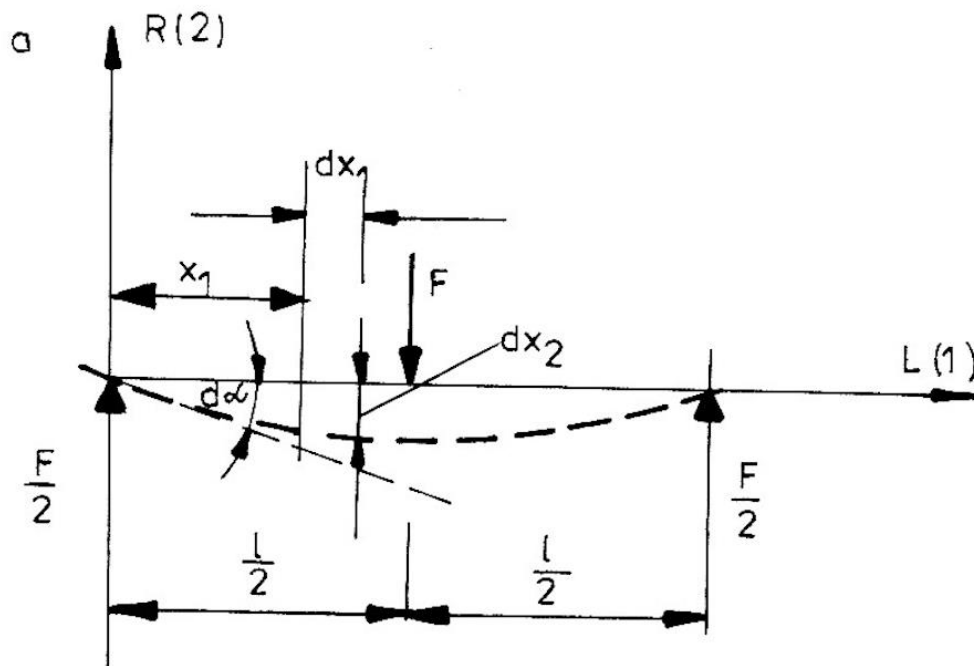
$l_0$  – vzdálenost podpěr (mm),

$b$  – šířka zkušební tělesa (mm),

$h$  – výška zkušební tělesa (mm),

$\Delta y$  – průhyb tělesa (mm).

Zatížení a průhyb dřevěného tělesa je vidět na Obr. 16.



Obr. 16 Ohyb dle (Požgaj a kol.,1997)

Deformace vzniklá při ohybu je definována poměrem průhybu tělesa k poloměru ohybu, viz rovnice (15).

$$Q_L = \frac{E_l \cdot d_{x2}}{d_r} \quad (15)$$

Kde:

$Q_L$  – napětí,

$E_l$  – modul pružnosti.

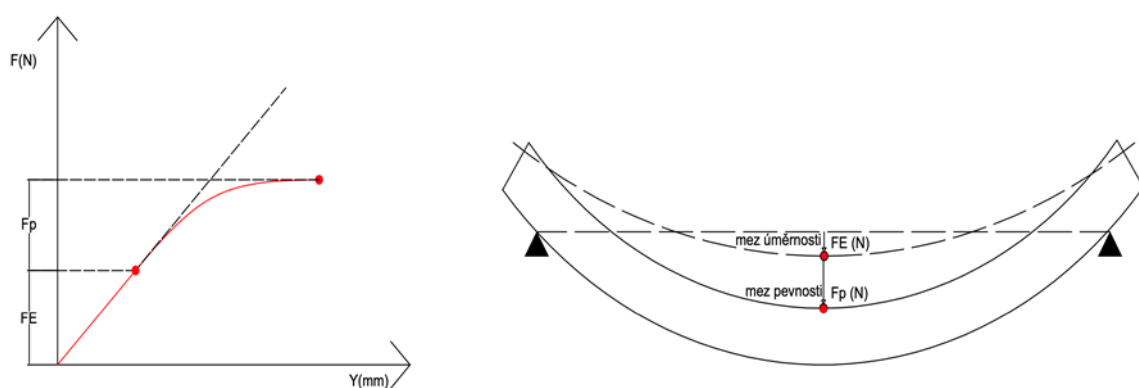
### 5.3.4.3 Poissonova čísla – koeficienty příčné deformace

Působí-li na těleso zatížení normálovým namáháním, vznikají jak deformace ve směru působení síly (poměrné podélné deformace  $E_1$ ) tak i deformace kolmé k působící síle (poměrné příčné deformace  $E_2$ ). Poissonovo číslo vyjadřuje podíl poměrné příčné deformace k poměrné deformaci podélné.

Vzhledem k tomu, že je dřevo anizotropní materiál – má tři roviny pružné symetrie je nutné stanovovat šest Poissonových čísel. Moduly pružnosti spolu s Poissonovými čísly určují deformační vlastnosti dřeva (Požgaj a kol., 1997).

### 5.3.5 Mez úměrnosti

Mez úměrnosti je takové napětí, do kterého v tělese vznikají deformace pružné, a toto napětí je v tělese rovnoměrně rozloženo. Po ukončení působení zatížení se těleso vrací do původního stavu. V pracovním diagramu je část do bodu meze úměrnosti lineárního charakteru. Nad mezí úměrnosti již napětí v tělese není rozloženo rovnoměrně, deformace rostou a deformační čára v pracovním diagramu přechází do nelineárního charakteru (Gandelová, 2002; Niemz, 1993).



Obr. 17 Silově průhybový diagram – namáhání ohybem, mez úměrnosti a pevnosti (Svoboda a kol., 2017)

### 5.3.6 Mez pevnosti

Jde o napětí, při kterém dochází k porušení tělesa. Jde tedy o nejvyšší napětí, které je dřevo schopno snést bez porušení. V pracovním diagramu je tato část nelineárního charakteru a nachází se v části od meze úměrnosti právě po mez pevnosti.

### 5.3.7 Pevnost dřeva

Pevnost dřeva je definována jako odolnost dřeva proti jeho trvalému porušení. Pevnost dřeva lze vyjádřit napětím, za jakého dojde k porušení soudržnosti dřeva – tomuto napětí se říká mez pevnosti. Pevnost dřeva dělíme na smluvní pevnost, skutečnou pevnost a pevnost ideální nebo teoretickou. Pevnost dřeva se stanovuje jako pevnost skutečná, pevnost dřeva v tlaku napříč vlákny je definována jako pevnost konvenční.

Pevnost dřeva je možné dělit podle:

1. Stavů napjatosti – jednoosý či víceosý.
2. Způsobu zatížení – na tah, tlak, krut a smyk.
3. Časový průběh zatížení – statické zatížení nebo dynamické zatížení.
4. Dle účinků zatížení na dřevo – poškození dřeva a jeho neporušení.

Pevnost u dřeva se dále rozlišuje podle směru, ve kterém zatížení působí na – pevnost v tahu, v tlaku, ohybu, krutu a smyku (Šlezingerová, 2005; Požgaj a kol., 1997).

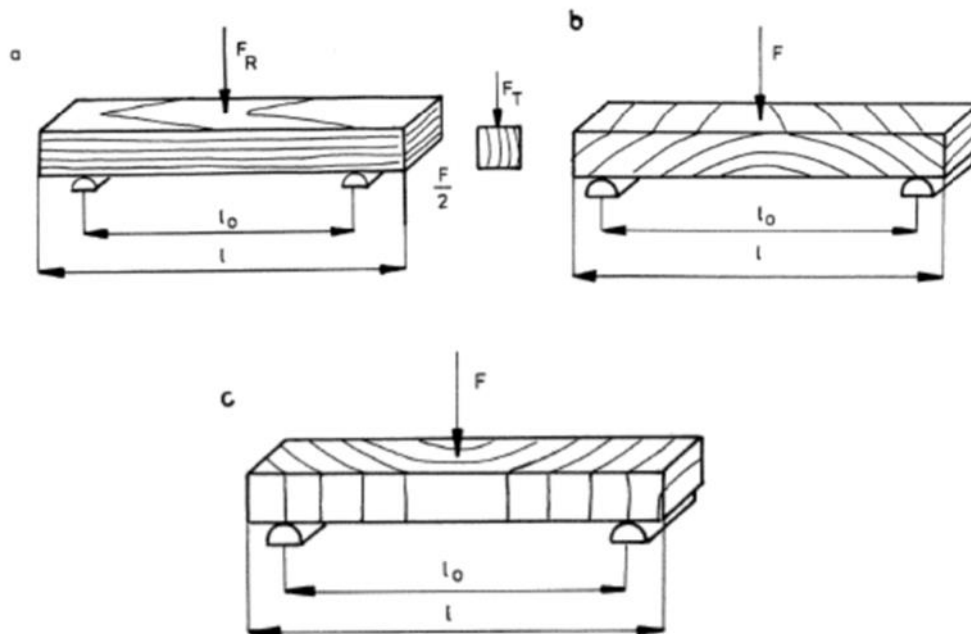
Mezi faktory, které ovlivňují pevnost dřeva, patří vlhkost, hustota a teplota dřeva. Se stoupající vlhkostí dřeva do MH pružnost a pevnost dřeva klesá (Gandelová, 2002).

#### 5.3.7.1 Pevnost dřeva v ohybu

Pevnost dřeva v ohybu patří mezi jedno z nejkomplicovanějších způsobů namáhání a zároveň je pevnost dřeva v ohybu řazena mezi jednu z nejdůležitějších mechanických vlastností dřeva. Dřevo má docela vysokou ohybovou pevnost, díky této vlastnosti je hojně využíváno na konstrukční prvky namáhané ohybem, jako jsou například nosníky, nábytek.

Dle průběhu vláken jsou rozlišovány tři způsoby pevnosti v ohybu a to zatížení dřeva kolmo na vlákna v radiálním směru či zatížení dřeva průběžně s vlákny nebo poslední způsob zatížení dřeva kolmo na osu materiálu. Tyto způsoby zatížení jsou vidět na Obr. 18. Dřevo je při tomto ději deformováno několika způsoby – dřevo je stlačováno, prodlužováno a dochází i k posunutí jeho částí. Ohybem je těleso z vnější strany

namáháno na tah a z vnitřní strany namáháno na tlak. Část tělesa, která ohybem není deformována a nepůsobí v ní normálové napětí (napětí je rovno 0) se nazývá neutrální osa. Směrem od středu tělesa k jeho okrajovým částím se zvyšuje deformace a vzniká zde i větší napětí. Mezi tahovým a tlakovým napětím je napětí smykové, viz Obr. 19.

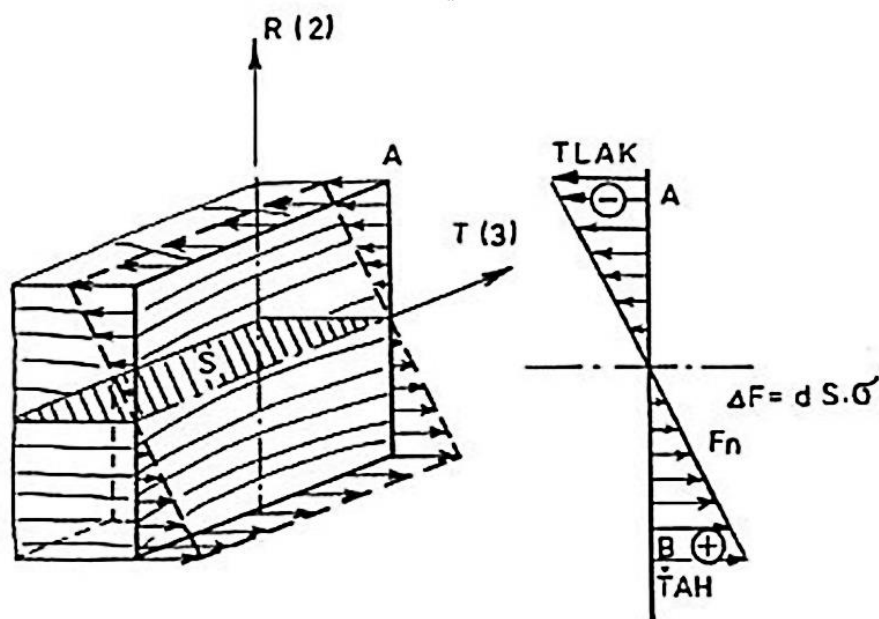


Obr. 18 Zatížení dřeva v ohybu a – kolmo na vlákna v radiálním směru, b – kolmo na osu tělesa, c – podél vláken (Požgaj a kol., 1997)

Pevnost dřeva na tah podél vláken je mnohonásobně vyšší než pevnost dřeva na tlak podél vláken. Díky tomu nastává narušení celistvosti dřeva při ohybu právě v tlakové zóně, dochází zde k vybočování vláken. Vzniká zde napětí, které překračuje mez úměrnosti, vlákna se deformují a nastávají trvalé plastické deformace. Toto vybočování vláken často není pozorovatelné pouhým okem. Ke konečnému narušení celistvosti dřeva dochází v tahové zóně – dojde k překonání meze pevnosti a poté nastává úplné porušení dřeva.

Pevnost ohybu kolmo na vlákna se může projevit několika způsoby, je ovlivněna rozměry ohýbaného tělesa, tvarem ohýbaného dřeva, druhem dřeviny a na vzdálenosti podpěr. Podíl vzdálenosti podpěr s ohledem k výšce tělesa je dán vztahem  $l_0/h > 14$  (Gandelová, 2002).





Obr. 19 Rozložení napětí po výšce tělesa (Požgaj a kol.,1997)

Porušení dřeviny je někdy možné pozorovat i ve středové krajní části dřeva. Trhlina se šíří po neutrální ose tělesa. Takový typ porušení dřeviny je způsoben smykovým napětím. Další narušení dřeviny může být roztržení vláken na tahové straně tělesa či zlom může probíhat po celé výšce tělesa – tupý nebo vláknitý lom. Tupý zlom se vyskytuje u dřevin s malou pevností, vláknitý zlom se vyskytuje u dřevin houževnatých a u dřevin s velkou pevností (Požgaj a kol., 1997; Campilho a kol., 2010).

Tab. 3 Mez pevnosti v ohybu (Ugolev,1986)

Druh dřeva	Mez pevnosti (MPa)
Smrk	80
Modřín	112
Jedle	69
Dub	108
Buk	109

## 6 Metodika experimentálních prací

Na základě stanovených cílů práce lze její metodiku rozdělit do několika bodů:

1. Výroba a příprava zkušebních vzorků.
2. Klimatizace vzorků.
3. Ohybová zkouška.
4. Sušení vzorků.
5. Výpočet daných charakteristik a výsledky zkoušky.
6. Statistické vyhodnocení výsledků.

### 6.1 Výroba a příprava zkušebních vzorků

Pro zjišťování potřebných charakteristik při dané geometrii vzorků byly vytvořeny soubory zkušebních těles pro experimentální měření. Každý soubor byl složen z 30 kusů zkušebních vzorků a to proto, aby byla zajištěna co největší relevantnost statistického vyhodnocení. Schéma zkušebních vzorků, viz Tab. 4, která zobrazuje základní dělení zkušebních těles, kdy rozlišuje tloušťku ( $h$ ) a dva stupně vzdálenosti spodních podpěr vzhledem ke vstupní tloušťce (desetinásobek a dvacetinásobek tloušťky).

Tab. 4 Schéma zkušebních vzorků (autor)

Tloušťka (mm)	Rozteč spodních podpěr (mm)	
	10 x h	20 x h
5	---	100
10	100	200
15	150	300
20	200	---
25	250	---

Všechny vzorky použité pro zkoušení byly vyrobeny z buku lesního (*Fagus sylvatica*). Řezivo, ze kterého byly vyrobeny zkušební vzorky, bylo řezáno v radiálním směru kolmo na vlákna pomocí kotoučové pily SCM Class 300. Po nařezání jednotlivých vzorků byla provedena tloušťková egalizace na tloušťkovací frézce. Při výrobě vzorků bylo dbáno na to, aby vzorky byly bez vad, jako jsou například suky a trhliny.

Rozměry vyrobených vzorků byly vždy šířka (b) 20 mm, délka (l) 100, 150, 200, 250, 300 mm a tloušťka (h) 5, 10, 15, 20, 25 mm. Celkem bylo testováno 7 souborů zkušebních těles. Jednotlivé soubory vzorků byly rozděleny dle sledovaných geometrických faktorů: tloušťky zkušebních vzorků a vzdálenosti podpěr.

Každý vzorek byl označen kódem pro lepší identifikaci:

BK\_20\_400\_1

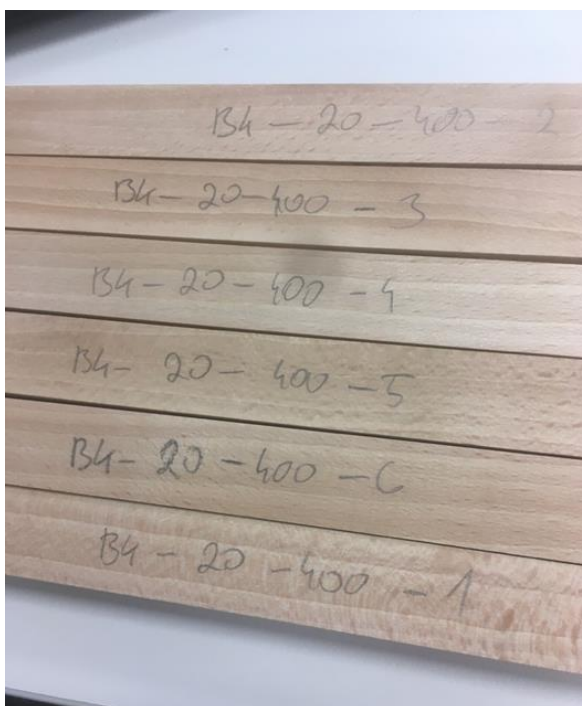
Kde:

BK – druh dřeviny,

20 – tloušťka (h),

400 – délka (l),

1 – číslo vzorku ze souboru.



Obr. 20 Značení vzorků (autor)

## 6.2 Klimatizace vzorků

Vzorky byly před samotným zkoušením klimatizovány v klimatizační komoře. Klimatizační komora byla nastavena na teplotu 20 °C a relativní vlhkost byla udržována na 65 %, po klimatizaci bylo dosaženo rovnovážné vlhkosti 12 %.

Před samotnou zkouškou bylo u každého zkoušeného vzorku provedeno měření a vážení, výsledky tohoto měření byly zaznamenány.



Obr. 21 Klimatizace (autor)

### 6.3 Ohybová zkouška

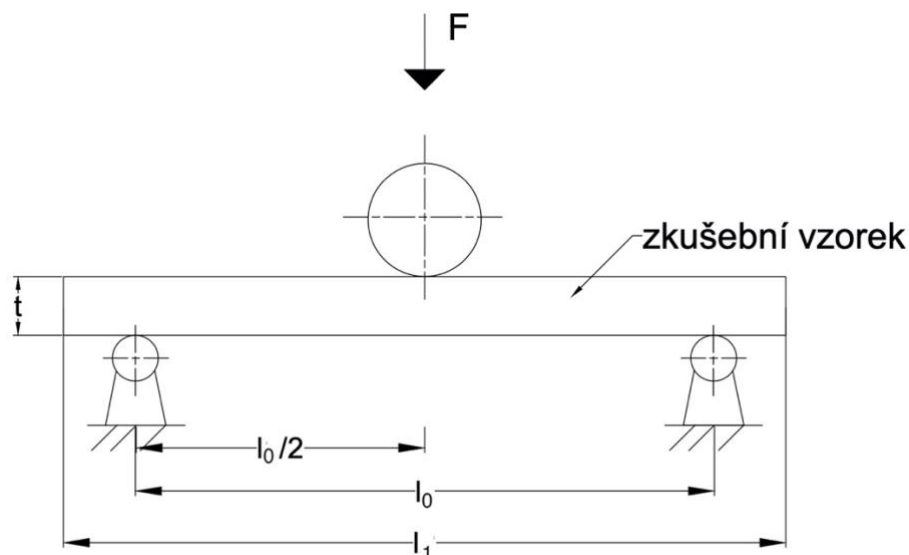
Vzorky byly zkoušeny třibodovou ohybovou zkouškou. Hlavními sledovanými charakteristikami popisující ohýbatelnost byl koeficient ohýbatelnosti, minimální poloměr ohybu, síla na mezi pevnosti a úměrnosti, průhyb na mezi pevnosti a úměrnosti. Dále spolu s ohýbatelností byly zjišťovány základní mechanické ohybové charakteristiky: modul pružnosti, mez úměrnosti a elastický potenciál.

Ohybové charakteristiky byly zjišťovány na univerzálním trhacím zařízení UTS 50 (Tira, Německo), třibodovým ohybem, viz Obr. 22 dle normy EN 310. Zkušební těleso je ohýbáno v radiálním směru vláken. Síly, které působí při zatěžování, byly zjišťovány záznamníkem dat Almeno 2690 (Ahlborn, Německo).

Před zkoušením jednotlivých souborů zkušebních vzorků bylo nutné upravovat vzdálenost podpěr, tak, aby tato vzdálenost odpovídala požadavkům pro daný soubor. Pro každý soubor vzorků byla nastavena specifická vzdálenost podpěr dle schématu zkušebních těles (10-ti násobek nebo 20-ti násobek tloušťky). Při zkoušce byl zkušební vzorek uložen na dvou podpěrách a byl zatěžován silou, která působila přímo v jeho

středu. Při umístování zkoušeného vzorku bylo nutno dbát na to, aby jeho podélná osa svírala pravý úhel s podpěrami.

Zatížení bylo prováděno tak, že mělo během celého průběhu zkoušky konstantní rychlost posuvu, tato rychlost byla nastavena tak, aby nebyl přesažen normou stanovený čas zkoušky 2 minuty. Čím byly testované vzorky delší, tím byla větší vzdálenost podpěr, do zlomení bylo dosahováno tím většího průhybu a byla tedy potřeba větší rychlost posuvu. Maximální lomové hodnoty byly zaznamenány pomocí záznamového zařízení. Zkoušky probíhaly v laboratoři, při teplotě 22 °C a vlhkosti vzduchu 65 %, dle EN 310. Na trhacím stroji UTS TIRA jsou vzorky zatěžovány až do té doby, dokud nedojde k poklesu síly o 10 % (Gaff a kol., 2016).



Obr. 22 Schéma zkušebního zařízení dle EN 310 (EN 310)

$F$  – zatěžovací síla,

$t$  – tloušťka zkušební vzorku,

$l_1$  – 20.t, 10.t,

$l_2$  – 20.t + 50 mm, 10.t + 50 mm.

Při testování je zjišťována síla  $F_{max}$ , která je nutná právě k porušení vzorku. Z tohoto zatížení se určí modul pružnosti v ohybu a také pevnost v ohybu. Z naměřených dat získaných při testování zkušebních těles vznikl silově-deformační diagram na základě kterého lze určit hraniční body. Hraniční body se stanovily za pomoci určení přesné hranice mezi lineární a nelineární částí diagramu. Lineární část diagramu zde tedy

přecházela do paraboly a její odklon nepřesahoval 1 %. Ve výsledném výpočtu modulu pružnosti musí být zohledněn fakt, že při této zkoušce také působí smyk, výsledná hodnota výpočtu je tedy jen orientační. Ohybová pevnost je vypočítána poměrem ohybového momentu  $M$  při maximální zatěžovací síle  $F_{\max}$  k momentu celého průřezu zkušební tělesa (EN 310). Dále se sleduje maximální průhyb tělesa, kterého se dosáhlo ve středu zkušební tělesa.

Touto zkouškou získáme silově průhybový diagram, který bude dále vyhodnocován pomocí software MATESS. Tento software nám umožňuje velmi přesné identifikace hraničních bodů silově průhybového diagramu, čímž dokážeme velmi přesně identifikovat jednotlivé charakteristiky ohybu.

#### 6.4 Sušení vzorků

Před tím, než došlo k výpočtům sledovaných charakteristik, bylo nutné určit přesnou vlhkost vzorků, při které probíhalo jejich testování. Jednotlivé vzorky byly v průběhu zkoušky převáženy. Nejprve byla zkušební tělesa zvážena v neusušeném stavu. Poté byla všechny zkoušená tělesa vložena do sušárny, kde probíhalo jejich sušení. Sušení probíhalo v sušárně Binder při teplotě  $100 \pm 3^\circ\text{C}$ . V průběhu sušení se sledovala hmotnost vzorků. V době, kdy došlo k ustálení hmotnosti vzorků, již nedocházelo k poklesu hmotnosti, vzorky byly bez veškeré vody volné. V tomto okamžiku se všechny vzorky zvážily a jejich hmotnost byla zaznamenána. Obsah vlhkosti před i po testování byl měřen dle normy ISO 13061-1 (2014).

Pro výpočet byl použit vzorec:

$$W = \frac{m_w - m_0}{m_0} * 100 \quad (16)$$

$W$  – vlhkost vzorku (%),

$m_w$  – hmotnost vzorku před vysušením (g),

$m_0$  – hmotnost vzorku po vysušení (g).

U všech vzorků byla stanovena jejich hustota, a to před samotným měřením a i po měření podle vzorce (17) dle ISO 13061-2.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (17)$$

Kde:

$m$  – hmotnost dřeva (kg),

$V$  – objem dřeva (m<sup>3</sup>).

## 6.5 Výpočet daných charakteristik

Z hodnot, které byly změřeny v předchozí části experimentu, byly výpočtem stanoveny tyto charakteristiky: modul pružnosti, mez úměrnosti, mez pevnosti a koeficient ohýbatelnosti.

### 6.5.1 Modul pružnosti

Modul pružnosti je pro jednotlivé vzorky vyjadřován vzorcem:

$$E = \frac{F \cdot l_0^3}{4 \cdot y_{\max} \cdot b \cdot h^3} [MPa] \quad (18)$$

Kde:

$l_0$  – vzdálenost mezi středy podpěr (mm),

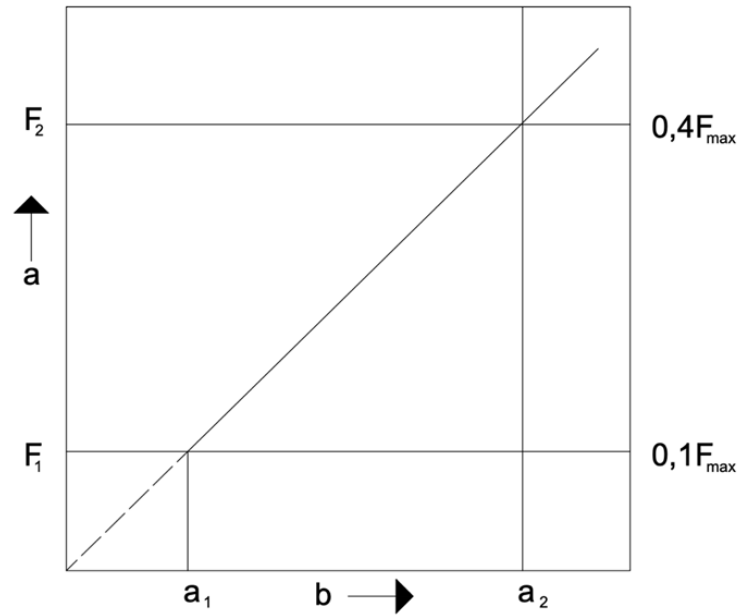
$b$  – šířka zkušebního tělesa (mm),

$h$  – tloušťka zkušebního tělesa (mm),

$F$  – maximální zatěžující síla (N),

$y_{\max}$  – maximální průhyb (mm)

Modul pružnosti je vyjadřován pro každý zkušební vzorek a jeho přesnost je na tři platné číslice dle ČSN EN 310.



Obr. 23 Křivka zatížení v oblasti pružné deformace

### 6.5.2 Mez pevnosti v ohybu

Je-li zkušební vzorek umístěn na dvou podpórách a působí na něj síla  $F$  přesně ve středu zkušebního vzorku, při výpočtu maximálního možného napětí můžeme vycházet z Navierova vzorce.

Pevnost v ohybu je stejně jako modul pružnosti pro každé zkušební těleso vyjádřena vzorcem:

$$\sigma_{max} = \frac{3F_{max}l_0}{2bh^2} \text{ (MPa)} \quad (19)$$

Kde:

$F_{max}$  – maximální působící síla (N),

$l_0$  – vzdálenost mezi středy podpěr (mm),

$h$  – tloušťka vzorku (mm),

$b$  – šířka vzorku (mm).

Pevnost v ohybu je pro každý zkoušený vzorek vyjadřována na tři platná čísla dle ČSN EN 310.



### 6.5.3 Mez úměrnosti

Mez úměrnosti je vypočítána dle rovnice:

$$\sigma_{\dot{u}} = \frac{3F_E l_0}{2bh^2} \quad (20)$$

Kde:

$\sigma_u$  – mez úměrnosti (MPa),

$F_E$  – síla na mez úměrnosti (N),

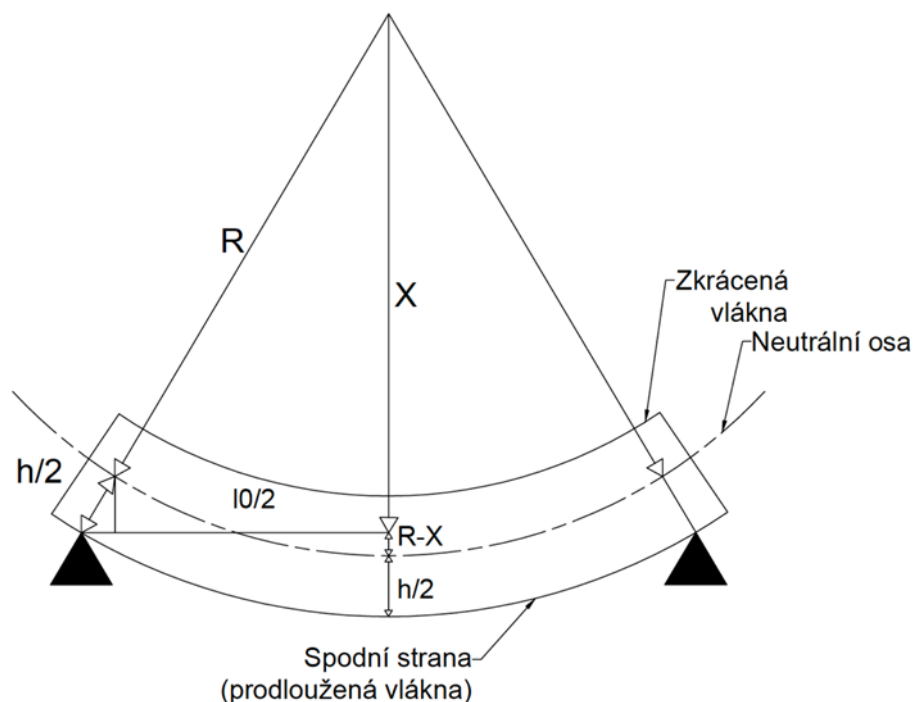
$l_0$  – vzdálenost podpěr (mm),

$b$  – šířka vzorku (mm),

$h$  – tloušťka vzorku (mm).

### 6.5.4 Minimální poloměr ohybu

V této práci jsou použity dva druhy rovnic pro výpočet minimálního poloměru ohybu  $R_{\min}$ . Rovnice odvozena z geometrie ohybu a základní rovnice pro ohyb. Tyto rovnice byly převzaty od Gaff a kol., 2016.



Obr. 24 Geometrie ohybu (autor)

Z geometrie ohybu vychází následující rovnice (23):

$$x^2 + \frac{l_0^2}{4} = \left(R + \frac{h}{2}\right)^2 \quad (21)$$

Z Obr. 24 je zřejmé, že maximální průhyb je složen ze dvou částí a to  $R-X$  a  $h/2$ .

$$R - X + \frac{h}{2} = y_{max} \quad (22)$$

Kombinací těchto dvou rovnic získáme rovnici pro minimální poloměr křivky  $R_{minB}$ .

$$R_{minB} = \frac{l_0^2}{8 \cdot y_{max}} + \frac{y_{max}}{2} - \frac{h}{2} \quad (23)$$

Druhá rovnice pro výpočet minimálního poloměru křivky vychází z rovnice pro výpočet křivosti ohýbaného nosníku (24).

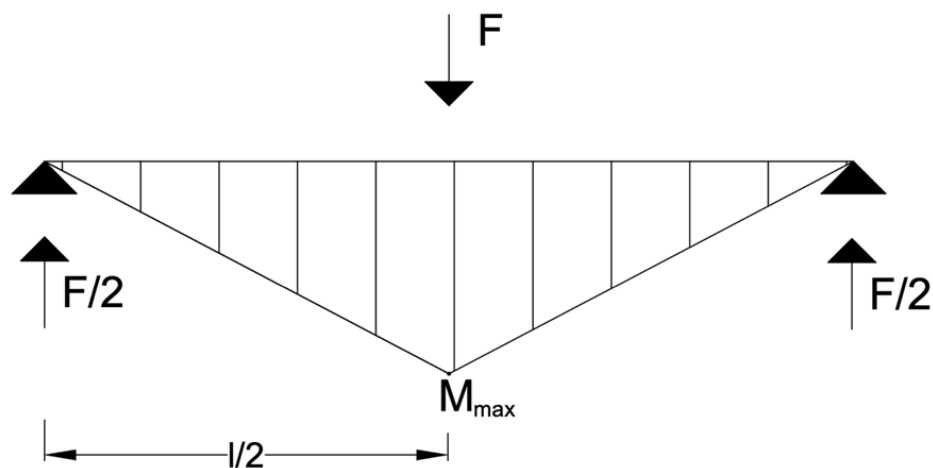
$$\frac{1}{R} = \frac{M}{E \cdot I} \quad (24)$$

Kde se pravá část rovnice skládá z:

$M$  – ohybový moment,

$E$  – modul pružnosti,

$I$  – moment setrvačnosti.



Obr. 25 Ohybový moment

Dle obrázku Obr. 25 spočítáme maximální moment podle vzorce:

$$M = \frac{F l_0}{4}$$

I – moment setrvačnosti.

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad (25)$$

Kde:

b – šířka průřezu,

h – výška průřezu,

I – moment setrvačnosti.

Dosazením jednotlivých rovnic pro E, M a I do rovnice křivosti dostaneme níže uvedenou rovnici pro výpočet R.

$$R = \frac{F \cdot l_0^3}{4 \cdot y_{max} \cdot b \cdot h^3} * \frac{\frac{b \cdot h^3}{12}}{F \cdot l_0 / 4} \quad (26)$$

$$R = \frac{l_0^2 \cdot I}{12 \cdot y_{max} * \frac{b \cdot h^3}{12}} \quad (27)$$

Po úpravě vzorce lze minimální poloměr ohybu  $R_{minC}$  zapsat dle vzorce 28.

$$R_{minC} = \frac{l_0^2}{12 \cdot y_{max}} \quad (28)$$

### 6.5.5 Koeficient ohýbatelnosti

Koeficient ohýbatelnosti je dán poměrem tloušťky ohýbaného materiálu k minimálnímu poloměru křivky  $R_{min}$ .

$$k_{oh} = \frac{h}{R_{min}} \quad (29)$$

Kde:

$k_{oh}$  – koeficient ohýbatelnosti ( - ),

h – výška vzorku (mm),

$R_{min}$  – minimální poloměr křivky (mm).

## 7 Vyhodnocení a výsledky

V minulosti byl prováděn minimální výzkum ohybové pevnosti dřeva, hlavně z pohledu nedostatečného zkoumání jednotlivých složek v procesu ohýbání. Nejčastěji se studie zaměřují na ovlivnění ohybových charakteristik změnou vlastností dřeva.

Jak vyplývá z existujících studií, nejvíce je koeficient ohýbatelnosti ovlivněn tloušťkou ohýbaného materiálu. Studie se ovšem doposud nezabývaly ostatními geometrickými vlivy, kterými je koeficient ohýbatelnosti ovlivněn. V této práci se proto klade důraz na zjišťování ostatních faktorů: vliv geometrie ohybu na koeficient ohýbatelnosti a vzájemné interakci s ostatními faktory jako je například tloušťka ohýbaného dřeva, či vzdálenost podpor při ohybu.

Charakteristiky, které byly zjišťovány při působení tříbodového ohybu – modul pružnosti, síla na mezi úměrnosti, síla na průhyb na mezi pevnosti, mez pevnosti, mez úměrnosti a koeficient ohýbatelnosti byly zpracovány v programu Statistica 12. Výsledky byly vyhodnocovány pomocí rozptylové analýzy (ANOVA). Analýza rozptylu analyzuje účinek daného faktoru na sledované charakteristiky. Analýza rozptylu je využívána při zkoumání vztahů mezi závislými a nezávislými proměnnými při vyhodnocování experimentálních dat. Je-li zkoumán vliv jednoho faktoru na jednu i více závislých proměnných jedná se o jednofaktorovou analýzu. Je-li zkoumán vliv více faktorů, jedná se o analýzu vícefaktorovou (Hebák, 2007).

K tomuto vyhodnocení účinku jednotlivých faktorů byl použit Fisherův test F, kde hladina významnosti byla  $\alpha = 0,05$ . Tento Fisherův test stanoví pro danou hodnotu významnosti P, statistickou významnost či nevýznamnost sledovaného faktoru. Sledovaný faktor se hodnotí podle hodnoty P takto:

- $P < 0,05$  vliv faktoru je statisticky významný,
- $P > 0,05$  vliv faktoru není statisticky významný,
- $P = 0,05$  vliv faktoru se nachází na hranici statistické významnosti,
- $P = 0$  faktor působí,
- $P < 0,001$  vliv faktoru je statisticky velmi významný,
- $0,001 < P < 0,01$  vliv faktoru je statisticky středně významný,
- $0,01 < P < 0,05$  vliv faktoru je statisticky málo významný (Gaff, Gáborík, 2009).

Vyhodnocené výsledky jsou shrnuty v tabulkách, kde každá hodnota má příslušný variační koeficient (VC). Pro lepší přehlednost a porovnání hodnot jsou výsledky zpracovány do grafů.

## 7.1 Modul pružnosti

V Tab. 5 můžeme vidět průměrné hodnoty modulu pružnosti pro jednotlivé vzorky. První sloupec označuje materiál zkušebních vzorků, druhý sloupec tloušťku bukových vzorků. Další třetí sloupec udává vzdálenost podpěr, která byla nastavena při zkoušení, ve čtvrtém sloupci je modul pružnosti, poslední sloupec znázorňuje počet vzorků v jednotlivých souborech.

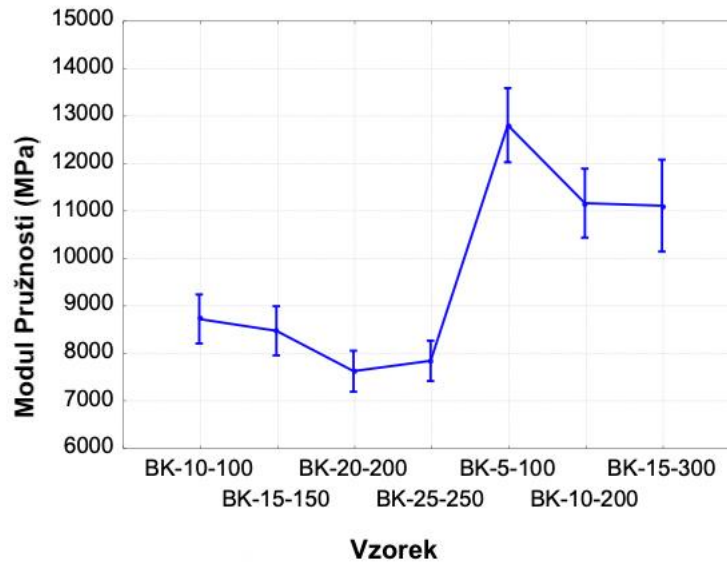
Tab. 5 Modul pružnosti

Materiál	h (mm)	l <sub>0</sub> (mm)	Modul pružnosti (MPa)	Variační koeficient	No.
BK	10	100	9 571,41	(18,58)	30
BK	15	150	7 873,08	(18,67)	30
BK	20	200	7 044,88	(15,71)	30
BK	25	250	7 945,29	(14,59)	30
BK	5	100	13 981,49	(18,09)	30
BK	10	200	15 851,82	(20,63)	30
BK	15	300	11 047,20	(27,30)	30

Pro lepší přehlednost jsou výsledky z Tab. 5 zobrazeny na Obr. 26.

Graf na Obr. 26 ukazuje závislost modulu pružnosti (E) na tloušťce materiálu (h) a vzdálenosti podpěr (l<sub>0</sub>). Zaměříme-li se na hodnoty modulu pružnosti v závislosti na tloušťce materiálu můžeme říci, že se zvětšující se tloušťkou průřezu klesají hodnoty modulu pružnosti. Naopak vzorky s nižší tloušťkou průřezu způsobují zvyšování hodnot modulu pružnosti. Dále je dle grafu zřejmé, že nastavená vzdálenost podpěr statisticky působí na hodnoty modulu pružnosti. Při stejné tloušťce materiálu a rozdílné vzdálenosti podpěr vidíme, že s větší vzdáleností podpěr bylo dosahováno většího modulu pružnosti. Porovnáme-li mezi sebou vzorky BK-10-100 a BK-10-200 potvrzuje se tento předpoklad, že při větší vzdálenosti podpěr se zvyšuje i modul pružnosti. U vzorku BK-10-200 dosahujeme přibližně o 39 % většího modulu pružnosti než u vzorku BK-10-100. Tato závislost je zřejmá i u vzorků BK-15-150 a BK-15-300, zde je u vzorku BK-15-300 modul

pružnosti větší dokonce o 40 %. Dále se potvrzuje pravidlo, že s nižší výškou vzorku je dosahováno většího modulu pružnosti což můžeme vidět na vzorcích BK-10-200 a BK- 5-100.



Obr. 26 Účinek interakce tloušťky materiálu a vzdálenosti podpěr na hodnoty modulu pružnosti E (MPa)

Výsledky odhalily velmi významný statistický účinek tloušťky vzorků na MOE menších jak 10 mm. Na základě výsledků úrovně významnosti vyhodnocené Duncanovým testem (Tab.15) můžeme dojít k závěru, že tloušťka dřeva má statisticky významný vliv na sledovanou charakteristiku „ $P = 0,000$ “.

## 7.2 Síla na mezi pevnosti

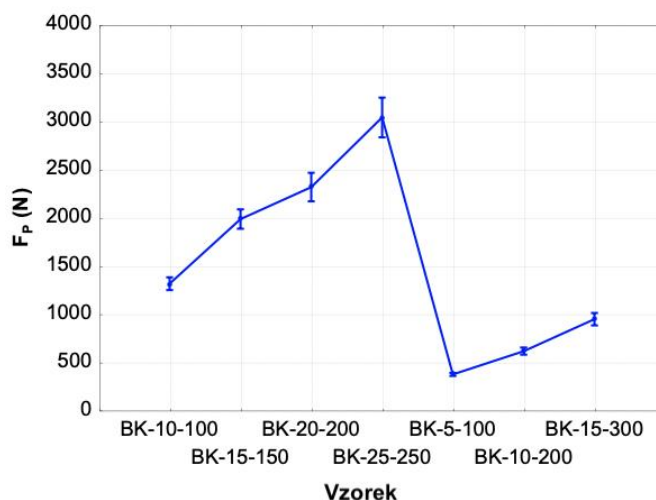
V Tab.6 můžeme vidět průměrné hodnoty síly na mezi pevnosti pro jednotlivé vzorky. První sloupec označuje materiál zkušebních vzorků, druhý sloupec tloušťku bukových vzorků. Další třetí sloupec udává vzdálenost podpěr, která byla nastavena při zkoušení, ve čtvrtém sloupci je síla na mez pevnosti a variační koeficient, poslední sloupec znázorňuje počet vzorků v jednotlivých souborech.

Tab. 6 Síla na mezi pevnosti

Materiál	h (mm)	l <sub>0</sub> (mm)	Síla na mezi pevnosti F <sub>p</sub> (N)	VC	No.
BK	10	100	1 310,45	-15,73	30
BK	15	150	1 980,77	-15,38	30
BK	20	200	2 312,52	-17,77	30
BK	25	250	3 034,76	-18,23	30
BK	5	100	369,11	-12,43	30
BK	10	200	611,09	-19,06	30
BK	15	300	942,07	-21,33	30

Pro lepší přehlednost jsou výsledky z Tab. 6 zobrazeny na Obr. 27.

Dle předpokladu naměřená data prokazují fakt, že se vzrůstající tloušťkou materiálu roste maximální síla pro zlomení zkušebního tělesa. Pro 5x větší tloušťku dřeva byla naměřena cca 8x vyšší odolnost na mezi pevnosti. Při porovnávání vzorků stejné tloušťky, ale jiné vzdálenosti podpěr je vidět, že se zvětšující se vzdáleností podpěr klesá i maximální síla pro zlomení zkušebního tělesa. Tento trend je nejlépe patrný u vzorků BK-10-100 a BK-10-200, kdy u vzorku BK-10-200 je síla potřebná ke zlomení vzorku o 53% menší než u vzorku BK-10-100. Stejný trend je viditelný i u vzorků BK-15-150 a BK-15-300. Nejvíce odolný vzorek proti jeho zlomení byl vzorek BK-25-250. Obecně tedy platí, že při větší tloušťce vzorku a menším rozponu podpěr bude stoupat i maximální síla na mezi pevnosti.



Obr. 27 Účinek interakce tloušťky materiálu a vzdálenosti podpěr na hodnoty F<sub>p</sub> (N)

Dle Tab. 158 a Tab. 19 v příloze 2 této práce je zřejmé, že všechny vstupní parametry statisticky významně ovlivňují výsledné hodnoty  $F_p$ .

### 7.3 Síla na mezi úměrnosti

V **Error! Reference source not found.**7 můžeme vidět průměrné hodnoty síly na mezi úměrnosti pro jednotlivé vzorky.

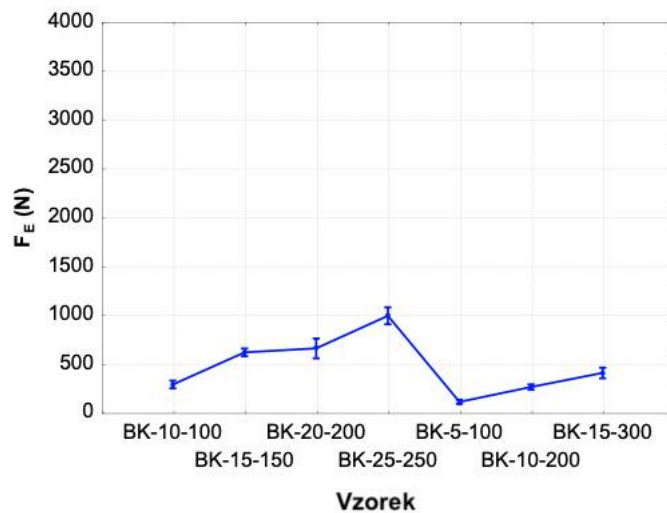
Tab. 7 Síla na mezi úměrnosti

Materiál	h (mm)	l <sub>0</sub> (mm)	Síla na mez úměrnosti Fe (N)	Variační koeficient	No.
BK	10	100	285,45	(13,57)	30
BK	15	150	612,96	(19,61)	30
BK	20	200	654,17	(13,06)	30
BK	25	250	987,63	(23,5)	30
BK	5	100	107,23	(17,34)	30
BK	10	200	258,98	(14,06)	30
BK	15	300	402,69	(12,52)	30

Pro lepší přehlednost jsou výsledky zpracovány do grafů Obr. 28.

Stejně jako v předchozích grafech, ve kterých se porovnávala naměřená data pro sílu na mezi pevnosti i zde přetrvává fakt, že se vzrůstající tloušťkou materiálu roste i odolnost materiálu vůči zatížení. Na Obr. 28 můžeme vidět srovnání maximální dosažené síly na mezi úměrnosti v závislosti na geometrických parametrech jako je tloušťka materiálu (h) a vzdálenost podpěr (l<sub>0</sub>), které byly nastaveny při ohybové zkoušce. Dle tohoto grafu je zřejmé, že u vzorku BK-25-250 je možno působit na zkoušený vzorek největší silou na mezi úměrnosti. Potvrzuje se zde tedy stejný trend jako při hodnocení síly na mezi pevnosti, kdy i tento vzorek dosahoval nejvyšších hodnot. Naopak nejnižších hodnot je dosahováno u vzorku BK-5-100, zde dochází k plastickým deformacím při působení síly o 89 % nižší, než je tomu u vzorku BK-25-250.



Obr. 28 Účinek interakce tloušťky materiálu a vzdálenosti podpěr na hodnoty  $F_E$  (N)

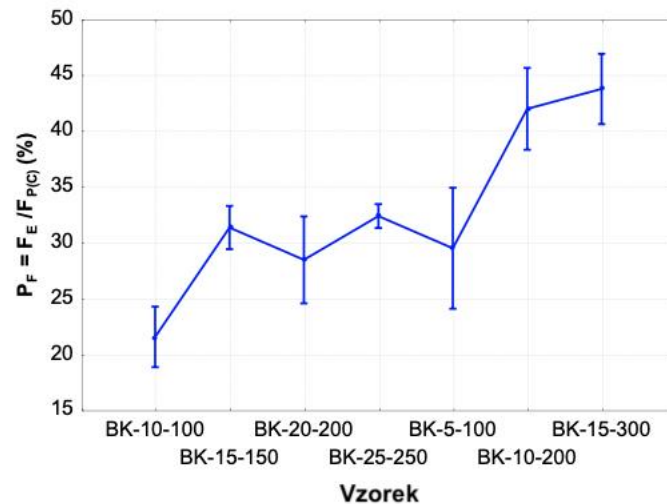
#### 7.4 Procentní poměr sil $F_E/F_P - P_F$

V Tab. 8 můžeme vidět procentní poměr sil  $F_E/F_P$  pro jednotlivé vzorky.

Tab. 8 Procentní poměr sil  $P_F = F_E/F_P$ 

Materiál	h (mm)	l <sub>0</sub> (mm)	$P_F$ (%)	Variační koeficient	No.
BK	10	100	21,51	(39,33)	30
BK	15	150	31,30	(18,80)	30
BK	20	200	28,41	(17,98)	30
BK	25	250	32,32	(8,88)	30
BK	5	100	29,44	(14,35)	30
BK	10	200	41,92	(27,67)	30
BK	15	300	43,71	(21,94)	30

Procentuální poměr  $P_F$  roste v závislosti na zvětšující se vzdálenosti podpěr, což potvrzuje vzorek BK-15-300. Pokud srovnáme vzorky se vzdáleností podpěr 200 mm, tloušťka 10 mm má větší procentuální poměr  $P_F$  než tloušťka 20 mm, z důvodu menší únosnosti na mezi pevnosti.

Obr. 29 Účinek interakce tloušťky materiálu a vzdálenosti podpěr na hodnoty  $P_F = F_E / F_P (C) (%)$ 

## 7.5 Průhyb na mezi pevnosti

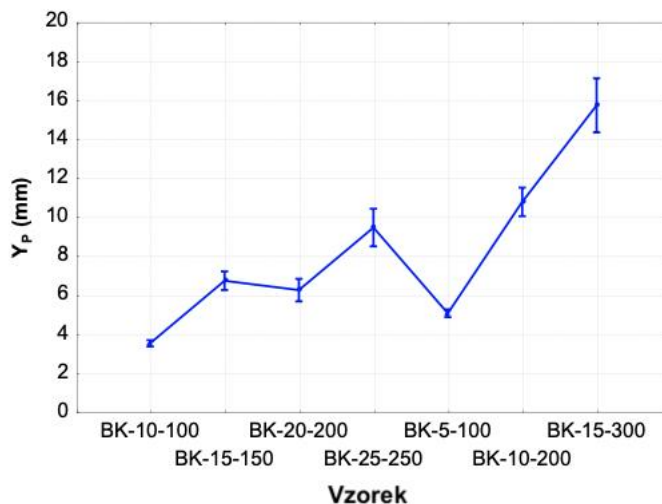
V Tab. 9 jsou vidět hodnoty průhybu na mezi pevnosti pro jednotlivé vzorky. Pro lepší přehlednost jsou hodnoty z této tabulky zpracovány do grafu na Obr. 30.

Tab. 9 Průhyb na mezi pevnosti –  $Y_P$ 

Materiál	h (mm)	l <sub>0</sub> (mm)	Průhyb na mezi pevnosti (mm)	Variační koeficient	No.
BK	10	100	3,49	(14,3)	30
BK	15	150	6,7	(11,68)	30
BK	20	200	6,22	(15,76)	30
BK	25	250	9,43	(17,36)	30
BK	5	100	5,03	(11,51)	30
BK	10	200	10,75	(11,53)	30
BK	15	300	15,7	(17,63)	30

Z grafu na Obr. 30 je patrné, že nejmenšího průhybu na mezi pevnosti je dosahováno u vzorku BK-10-100. Pro stejné tloušťky materiálu, které byly zkoušené na rozdílných vzdálenostech podpěr vidíme, že většího průhybu je dosahováno u vzorků s větší vzdáleností podpěr. Vzorek BK-10-200 dosahuje o 208 % většího průhybu než vzorek BK-10-100. Největšího průhybu bylo dosaženo u vzorku BK-15-300, potvrzuje se tedy, že se zvětšující se vzdáleností podpěr roste i statistická významnost vzdálenosti podpěr na maximální dosažený průhyb  $Y_P$ . Porovnáváme-li mezi sebou vzorky, které mají stejnou vzdálenost podpěr, ale liší se svou tloušťkou, potvrzuje se předpoklad, že většího

průhybu na mezi pevnosti je dosahováno u vzorků menší tloušťky. Toto je viditelné porovnáváme-li mezi sebou vzorky BK-5-100 a BK-10-100 nebo BK-10-200 a BK-20-200.



Obr. 30 Účinek interakce tloušťky materiálu a vzdálenosti podpěr na hodnoty  $Y_P$  (mm)

## 7.6 Průhyb na mezi úměrnosti

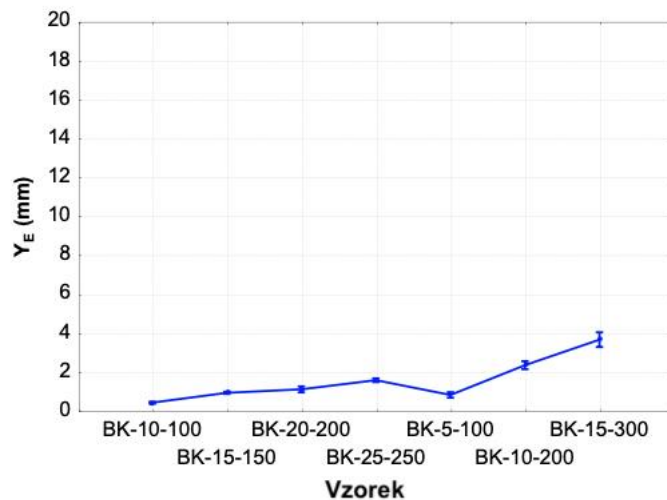
V Tab. 10 jsou zpracované naměřené hodnoty pro maximální průhyb na mezi úměrnosti pro jednotlivé vzorky. Výsledky z tabulky jsou pro lepší přehlednost zpracovány do grafu Obr. 31.

Tab. 10 Průhyb na mezi úměrnosti  $Y_E$

Materiál	h (mm)	$l_0$ (mm)	Průhyb na mezi úměrnosti (mm)	Variační koeficient	No.
BK	10	100	0,39	(11,56)	30
BK	15	150	0,89	(19,04)	30
BK	20	200	1,07	(19,12)	30
BK	25	250	1,54	(16,52)	30
BK	5	100	0,79	(13,85)	30
BK	10	200	2,32	(17,96)	30
BK	15	300	3,63	(12,56)	30

V grafu na Obr. 31 vidíme podobné chování, jaké bylo pozorováno při vyhodnocení průhybu na mezi pevnosti  $Y_P$  v grafu na Obr. 30. je zde patrný pokles hodnot v důsledku

menší tloušťky materiálu. Závislost mezi  $Y_E$  a vzdálenost podpěr není nijak statisticky významná, ačkoli trend dosažení největšího možného průhybu na mezi úměrnosti je i zde největší pro nastavení vzdálenosti podpěr na 300 mm u vzorku BK-15-300, stejně jako tomu bylo u dosažení maximální průhybu  $Y_P$ . Platí tedy, že se zvětšující se vzdáleností podpěr při stejné tloušťce materiálu je dosahováno většího průhybu na mezi úměrnosti.



Obr. 31 Účinek interakce tloušťky materiálu a vzdálenosti podpěr na hodnoty  $Y_E$  (mm)

## 7.7 Procentní poměr sil $Y_E/Y_P - P_Y$

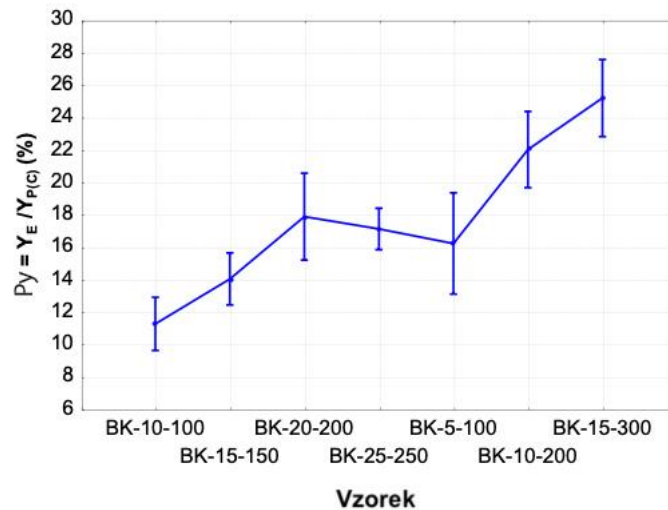
V Tab. 11 jsou naměřené hodnoty pro  $P_Y$ , pro lepší přehlednost je tabulka zpracována do grafu na Obr. 32.

Tab. 11 Procentní poměr sil  $Y_E/Y_P - P_Y$

Materiál	h (mm)	$l_0$ (mm)	$P_Y$ (%)	Variační koeficient	No.
BK	10	100	11,24	(15,67)	30
BK	15	150	14,02	(14,84)	30
BK	20	200	17,86	(11,68)	30
BK	25	250	17,1	(10,01)	30
BK	5	100	16,2	(17,01)	30
BK	10	200	22	(13,85)	30
BK	15	300	25,17	(18,71)	30

Procentuální poměr deformací roste v závislosti na zvětšující se vzdálenosti podpěr při stejných tloušťkách a zároveň klesá v závislosti se zvětšující se tloušťkou, pokud srovnáváme stejnou vzdálenost podpěr. Toto tvrzení potvrzují vzorky BK-10-100

a BK- 5-100. Nejnižšího poměru deformací je dosahováno u vzorku BK-10-100, pro využití v oblasti ohýbaného nábytku je tento nízký procentuální poměr deformací žádoucí. Na základě poměru deformací lze určit vlastnosti materiálu pro jeho další použití.



Obr. 32 Účinek interakce tloušťky materiálu a vzdálenosti podpěr na hodnoty  $P_Y$  (%)

## 7.8 Koeficient ohýbatelnosti

Tab. 12 a Tab. 13 ukazují průměrné hodnoty hodnocených charakteristik  $K_{ohC}$ ,  $K_{ohB}$  a příslušný variační koeficient pro jednotlivé sady zkušebních vzorků.

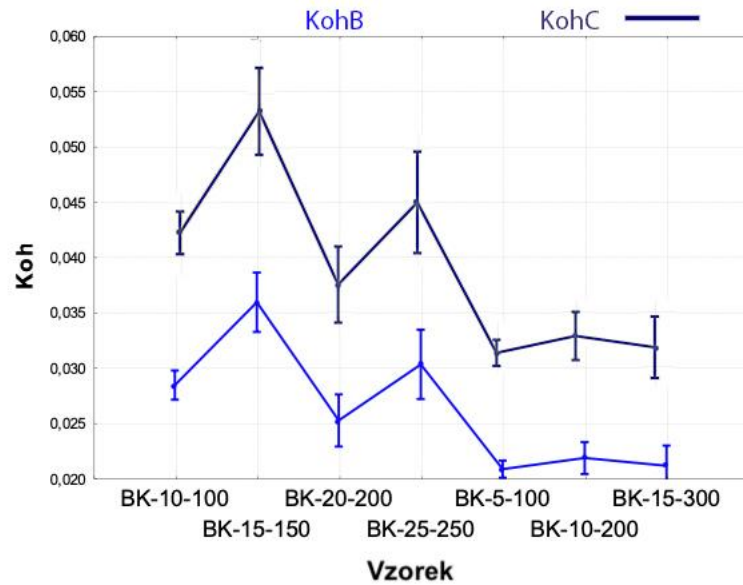
Tab. 12  $K_{ohC}$

Materiál	h (mm)	l <sub>0</sub> (mm)	$K_{ohC}$	Variační koeficient	No.
BK	10	100	0,04	(14,44)	30
BK	15	150	0,05	(12,72)	30
BK	20	200	0,04	(25,85)	30
BK	25	250	0,04	(17,61)	30
BK	5	100	0,03	(11,27)	30
BK	10	200	0,03	(21,36)	30
BK	15	300	0,03	(17,71)	30

Tab. 13  $K_{ohB}$ 

Materiál	h (mm)	l <sub>o</sub> (mm)	$K_{ohB}$	Variační koeficient	No.
BK	10	100	0,03	(14,5)	30
BK	15	150	0,04	(12,81)	30
BK	20	200	0,03	(15,94)	30
BK	25	250	0,03	(17,69)	30
BK	5	100	0,02	(11,13)	30
BK	10	200	0,02	(11,02)	30
BK	15	300	0,02	(17,25)	30

Z výsledných hodnot je patrný významný účinek tloušťky materiálu na hodnoty  $K_{ohB}$  a na hodnoty  $K_{ohC}$ . Je zřejmé, že při menší tloušťce materiálu dosahujeme i nižších hodnot koeficientu ohýbatelnosti. Toto potvrzují například vzorky BK-10-100 a BK-5-100, kdy při stejné vzdálenosti podpěr je dosahováno nižšího koeficientu ohýbatelnosti u vzorku tloušťky 5 mm. Tento trend se potvrzuje i u vzorků BK-20-200 a BK-10-200. Pro tloušťky materiálu 5 mm lze považovat pokles hodnot  $K_{oh}$  za významný. Posuzujeme-li vliv vzdálenosti podpěr na hodnoty  $K_{oh}$ , ukazuje se trend, že s větší vzdáleností podpěr se snižují hodnoty koeficientu ohýbatelnosti. Toto potvrzují vzorky BK-10-200 a BK-10-100, u vzorku se vzdáleností podpěr 200 mm byl koeficient ohýbatelnosti přibližně o 20 % nižší, než při vzdálenosti podpěr 100 mm. U vzorků BK-15-150 a BK-15-300 je koeficient ohýbatelnosti u vzorku se vzdáleností podpěr 300 mm nižší dokonce přibližně o 36 %, než u vzorku se vzdáleností podpěr 150 mm. Nejvyšší hodnoty  $K_{oh}$  byly stanoveny u vzorku BK-15-150 a naopak nejnižších hodnot koeficientu ohýbatelnosti bylo dosaženo u vzorku BK-5-100. Průměrné hodnoty  $K_{ohC}$  jsou přibližně o 50 % vyšší než hodnoty pro  $K_{ohB}$ .



Obr. 33 Účinek interakce tloušťky materiálu a vzdálenosti podpěr na hodnoty KohC a KohB

## 7.9 Minimální poloměr ohybu

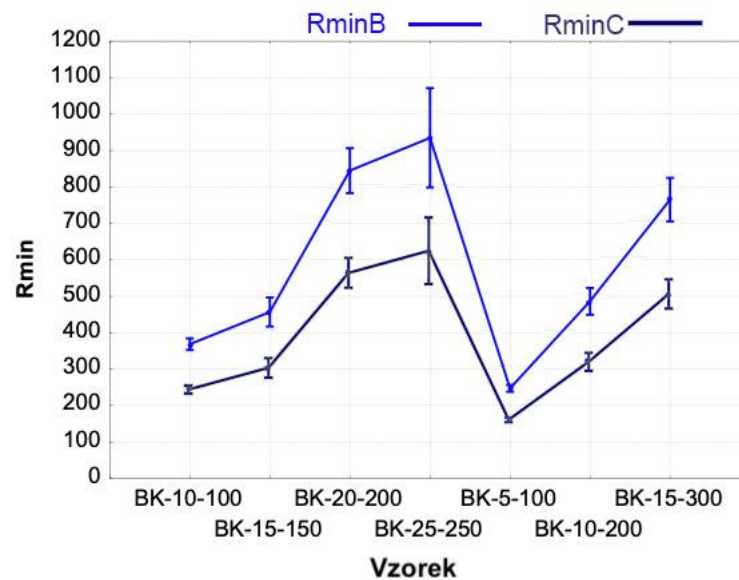
V Tab. 14 můžeme vidět průměrné hodnoty hodnocených charakteristik  $R_{\min C}$  a  $R_{\min B}$  a příslušný variační koeficient pro jednotlivé sady zkušebních vzorků.

Tab. 14 Průměrné hodnoty  $R_{\min C}$  a  $R_{\min B}$ 

Materiál	h (mm)	l <sub>o</sub> (mm)	$R_{\min C}$	VC	$R_{\min B}$	Variační koeficient	No.
BK	10	100	267,43	(13,90)	357,56	(13,95)	30
BK	15	150	350,16	(27,07)	445,92	(17,18)	30
BK	20	200	414,63	(20,46)	834,10	(20,54)	30
BK	25	250	431,51	(39,33)	924,18	(19,54)	30
BK	5	100	164,67	(11,65)	236,28	(11,52)	30
BK	10	200	290,02	(24,71)	475,34	(24,46)	30
BK	15	300	311,27	(25,08)	754,45	(24,79)	30

Dle výsledků můžeme říct, že závislost mezi tloušťkou materiálu a minimálním poloměrem ohybu je přímo úměrná. Dle předpokladu se snižující se tloušťkou materiálu je dosahováno nejmenšího minimálního poloměru ohybu. Tento fakt můžeme přisuzovat tomu, že se snižující se tloušťkou materiálu dosahujeme i vysokého modulu pružnosti vzorků. Z pohledu nastavení vzdálenosti podpěr je patrné, že se zvětšující se vzdáleností podpěr se zvyšuje i  $R_{\min}$ . Toto lze potvrdit u vzorků stejné tloušťky 10 mm BK-10-100

a BK-10-200, kde je vidět, že větší vzdálenost podpěr má z anásledek větší minimální poloměr ohybu. Pro docílení co nejmenšího poloměru ohybu je tedy vhodné volit co nejmenší tloušťky a zároveň dodržet menší vzdálenost podpěr při ohybu. Dle grafu je dále patrné, že obecně je menšího poloměru ohybu docíleno v případě  $R_{\min C}$ .



Obr. 34 Účinek interakce tloušťky materiálu a vzdálenosti podpěr na hodnoty  $R_{\min C}$  a  $R_{\min B}$



## 8 Diskuze

Získané hodnoty v experimentální části práce jsou v této kapitole porovnány s dostupnou literaturou a odbornými články na dané téma. Výsledky účinku jednotlivých faktorů jsou vyhodnoceny pomocí Duncanových testů, tyto tabulky jsou v přílohách práce 1-9.

### 8.1 Modul pružnosti

U měřených vzorků byla průměrná hodnota modulu pružnosti 11 360 MPa. V porovnání průměrné hodnoty s odbornou literaturou, kde je hodnota modulu pružnosti 14 132 MPa, je tato hodnota o něco nižší, ale dle Horáčka (1998), který uvádí průměrnou hodnotu modulu pružnosti mezi 10 –15 000 je tato hodnota srovnatelná.

Tab. 15 Průměrné hodnoty modulu pružnosti buku

Autor	Modul pružnosti
Gáborík (2011)	18 364
Požgaj (1997)	12 966
Kafka (1989)	12 600
Gaff a kol. (2015)	12 600

Hodnotíme modul pružnosti v závislosti na tloušťce materiálu potvrzuje se, že se snižující se tloušťkou materiálu je dosahováno vyšších hodnot modulu pružnosti, jak uvádí i Gaff (2014) ve své studii, kde nejvyšší modul pružnosti zaznamenal u tloušťky vzorků 6 mm. V tomto experimentu bylo největšího modulu dosaženo u vzorků BK 5-100 a BK-10-200 mm.

### 8.2 Síla na mezi pevnosti

Na základě úrovně významnosti P, uvedené v tabulkách Tab. 17 a Tab. 18, které jsou v příloze 2 této práce, docházíme k závěru, že všechny sledované faktory statisticky působí na hodnoty síly na mezi pevnosti. Toto potvrzuje i Svoboda (2017) ve své studii, kde hodnotí hodnoty síly na mezi pevnosti v závislosti na tloušťce materiálu a vzdálenosti podpor. Potvrzuje se také fakt, že se stoupající tloušťkou materiálu se zvyšuje i síla na mezi pevnosti. V dané práci dosahujeme nejvyšších hodnot síly na mezi pevnosti u souborů vzorků BK-25-250.

### 8.3 Síla na mezi úměrnosti

Stejně jako v případě síly na mezi pevnosti se i zde prokázalo, že všechny sledované faktory statisticky působí na hodnoty síly na mezi úměrnosti. Bylo prokázáno, že s rostoucí tloušťkou zkoušeného vzorku se zvyšuje i hodnota síly na mezi úměrnosti což potvrzuje i Svoboda a kol. (2017) ve své studii, kde uvádí průměrnou sílu na mezi úměrnosti 830 N. Průměrná hodnota síly na mezi úměrnosti byla v této studii 472 N. Tyto nižší hodnoty sil naměřených při testování vzorků mohou být způsobeny odlišnou hustotou, strukturou dřeva či jiným způsobem měření.

### 8.4 Procentní poměr sil $F_E/F_P - P_F$

Vyšší poměr sil byl ve studii naměřen u vzorku BK-15-300 (44 %). Bylo prokázáno, že statisticky významný vliv na hodnoty  $P_F$  má i vzdálenost podpěr nastavená při zkoušení. Nepotvrzuje se tedy pravidlo, že se zvyšující tloušťkou materiálu dochází i k významnému zvýšení sil potřebných pro deformaci vzorku, jak uvádí ve své studii Svoboda a kol. (2017).

### 8.5 Průhyb na mezi pevnosti

Nejmenšího průhybu na mezi pevnosti bylo dosaženo u vzorků BK-10-100. Porovnáme-li vzorek BK-5-100, kde bylo dosahováno také malého průhybu kolem 5 mm s výsledky ze studie od Sikory a kol. (2017), který uvádí u vzorků tloušťky 4 mm průhyb 4,8mm, můžeme říci, že dosažené průhyby jsou srovnatelné. Není však možné potvrdit fakt, že se vzrůstající tloušťkou se dosahuje i většího průhybu na mezi pevnosti. Jelikož v této studii je největšího průhybu dosahováno u vzorků tloušťky 15 mm (BK-15-300), za to u vzorků tloušťky 20 a 25 mm je dosahováno průhybu menšího. Je důležité brát v potaz, že v této studii je zohledněn i faktor vzdálenosti podpěr, který na průhyb na mezi pevnosti statisticky významně působí.

### 8.6 Průhyb na mezi úměrnosti

Sikora a kol. (2017) ve své studii uvádí, že se zvyšující se tloušťkou vzorku se zvyšuje i průhyb na mezi úměrnosti, stejně jako je tomu u průhybu na mezi pevnosti. Toto tvrzení nelze úplně potvrdit, jelikož největší průhyb je zaznamenán u vzorků BK-15-300 (3,63mm). Výsledky této studie ovšem zohledňují další geometrický parametr ohýbání – vzdálenost podpěr. Porovnáme-li mezi sebou vzorky se stejnou vzdáleností podpěr

(BK-10-100 a BK-5-100), platí zde tvrzení, že se zvyšující tloušťkou vzorku roste i průhyb na mezi úměrnosti. U vzorků tloušťky 15 mm byl průhyb na mezi úměrnosti o 22% větší než u vzorku tloušťky 5 mm. Není zde, tak znatelný rozdíl jako podle Sikory a kol. (2017), který udává nárůst průhybu na mezi úměrnosti u vzorku 4 a 10 mm o 92 %. Potvrzují se zde tedy stejná tendence jako byla u průhybu na mezi pevnosti. Stejně jako u průhybu na mezi pevnosti je zde potvrzený velký statisticky významný účinek vzájemné interakce vzdálenosti podpěr a tloušťky vzorků.

### 8.7 Procentní poměr sil $Y_E/Y_P - P_Y$

V této studii bylo dosaženo největšího poměru deformací u vzorku BK-15-300 (25,77 %) a naopak nejnižšího poměru u vzorku BK-10-100 (11,24 %). Tyto výsledky nepotvrzují výsledky studie od Svobody a kol (2017), které uvádějí, že se zvětšující se tloušťkou materiálu se poměr výrazně snižuje. Toto tvrzení vyvrací hlavně vzorek BK- 5-100, který má nejmenší tloušťku, ale dosahuje poměru 16,2 %, tedy nižších hodnot, než je tomu u vzorku BK-15-300. Potvrzuje se tedy, že na poměr má účinek i vzájemná interakce tloušťky a vzdálenosti podpěr.

### 8.8 Minimální poloměr ohybu a koeficient ohýbatelnosti

Hodnota koeficientu ohýbatelnosti je závislá na minimálním poloměru ohybu dřeva. Minimální poloměr ohybu pro bukové dřevo o tloušťce 25 mm je 370 mm. Tato hodnota vychází z Dřevařské příručky (1970). Tuto hodnotu nelze dle výzkumu potvrdit, jelikož minimální poloměr ohybu u bukového dřeva o tloušťce 25 mm dle tohoto výzkumu vychází  $R_{minC}$  431,5 mm a u  $R_{minB}$  dokonce 924,13 mm.

Dle výzkumu nelze potvrdit fakt, že hodnoty koeficientu ohýbatelnosti klesají se vzrůstající tloušťkou materiálu, jak uvádí Gaff ve svých výzkumech (2016, 2015). Na základě hladin významnosti P, lze konstatovat, že k statisticky významnému poklesu hodnot koeficientu ohýbatelnosti dochází při tloušťce materiálu 5 mm. Tento účinek je statisticky významný jak u  $K_{ohC}$  tak i u  $K_{ohB}$ .

Tato studie se dále zaměřuje na hodnoty koeficientu ohýbatelnosti ve vzájemné interakci tloušťky materiálu a vzdálenosti podpor. Tyto hodnoty jsou těžko porovnatelné s jinými autory, jelikož tato interakce nebyla doposud zkoumána.

Prezentované výsledky potvrzují tvrzení vyplývající z Tab. 36 a Tab. 37. Významný účinek na výsledné hodnoty  $K_{oh}$  má vzájemná interakce vzdálenosti podpěr a tloušťky

materiálu. Významný účinek této interakce byl potvrzen u vzorku BK-15-150 při hladině významnosti  $P = 0,00$ , této hodnoty bylo dosahováno u  $K_{ohC}$  i  $K_{ohB}$ .

## 9 Závěr

Cílem experimentální části diplomové práce bylo zjistit vliv vybraných geometrických parametrů ohybu - tloušťka materiálu, vzdálenost podpěr a vzájemná interakce těchto faktorů na mechanické charakteristiky, které definují ohýbatelnost dřeva a to hlavně na vliv koeficientu ohýbatelnosti. Mezi tyto charakteristiky dále patří modul pružnosti, síla na mezi pevnosti a úměrnosti, procentuální poměr těchto sil, průhyb na mezi úměrnosti, průhyb na mezi pevnosti, procentuální poměr těchto hodnot a minimální poloměr ohybu.

Zkoumáním naměřených údajů vyplývá fakt, že modul pružnosti je statisticky významně ovlivněn tloušťkou materiálu a nastavenou vzdáleností podpěr. Dle předpokladu bylo vyššího modulu pružnosti naměřeno u vzorků tloušťky 5 mm a 10 mm. Potvrdilo se tedy, že se zvyšující se tloušťkou vzorků klesají hodnoty modulu pružnosti. Větší vzdálenost podpěr vedla také ke zvýšení hodnot modulu pružnosti. Nejvyšší hodnotu modulu pružnosti měly vzorky BK-5-100 a BK-10-200 mm. Zatímco vzorky stejné tloušťky (10 mm) ale s menší vzdáleností podpěr BK-10-100 dosahovali přibližně o 39 % nižšího modulu pružnosti, než tomu bylo u vzorku BK-10-200.

Při sledování vlivu na sílu na mezi pevnosti má tloušťka i vzdálenost podpěr statisticky významný vliv. Se zvyšující se tloušťkou roste i síla na mezi pevnosti. Nejvyšších hodnot je dosahováno u vzorků BK-25-250, u vzorku BK-5-100 je dosahováno o 88 % nižších hodnot síly na mezi pevnosti.

Všechny sledované faktory statisticky působí i na hodnoty síly na mezi úměrnosti. Zde se prokázala stejná tendence jako u výsledků síly na mezi pevnosti. Se zvyšující tloušťkou roste i hodnota síly na mezi úměrnosti. Zároveň se hodnoty zvyšují i s větší vzdáleností podpěr. Nejvyšších hodnot síly na mezi úměrnosti bylo dosaženo u vzorků BK-25-250. U vzorků BK-5-100 bylo dosaženo o 89 % nižších hodnot, než u BK-25-250.

Při posuzování vzájemného poměru sil na mezi pevnosti a sil na mezi úměrnosti se neprokázalo pravidlo, že se zvyšující tloušťkou roste i procentuální poměr sil nutných k deformaci vzorku. Nejvyššího poměru sil bylo dosaženo u vzorků BK-15-300. Ukázalo se tedy, že významný vliv má i nastavená vzdálenost podpěr. Větší vzdálenost podpěr zvyšuje i procentuální poměr sil  $P_F$ .

Naměřené hodnoty průhybu na mezi pevnosti prokázali významný účinek všech působících faktorů. Nejmenšího průhybu bylo dosahováno u vzorků BK-5-100

a největšího u BK-15-300. Nepotvrdilo se tedy, že se zvyšující tloušťkou materiálu roste i průhyb na mezi pevnosti. Bylo prokázáno, že tyto hodnoty významně ovlivňuje i nastavená vzdálenost podpěr. Zde bylo prokázáno, že se zvyšující se vzdáleností podpěr je dosahováno vyššího průhybu na mezi pevnosti.

Průhyb na mezi úměrnosti potvrzuje výsledky, které byly získány u průhybu na mezi pevnosti. Největšího průhybu dosahujeme u vzorku BK-15-300. Zásadní vliv má na výsledný průhyb interakce tloušťky materiálu a nastavené vzdálenosti podpěr. Zvyšuje-li se vzdálenost podpěr, dosahujeme i většího průhybu na mezi úměrnosti.

Procentuální poměr deformací  $P_y$  opět potvrdil výsledky v předchozích měření průhybu  $Y_P$  a  $Y_E$ . Největšího procentuálního poměru dosahujeme u vzorku BK-15-300. Nejnižší je zaznamenán u vzorku BK-10-100. Potvrzuje se tedy pravidlo, že na výsledky má statisticky významný vliv vzájemná interakce nastavení vzdálenosti podpěr a tloušťka materiálu.

Dle studie je zřejmé, že tloušťka materiálu a nastavená vzdálenost podpěr významně ovlivňuje koeficient ohýbatelnosti. Nepotvrdil se předpoklad, že u vzorků vyšší tloušťky bude dosahováno nižších hodnot koeficientu ohýbatelnosti. Tyto výsledky je možné vysvětlit jinou vzdáleností podpěr a poměrem tloušťky materiálu k maximálnímu průhybu zatížení. Nejvyšších hodnot koeficientu ohýbatelnosti bylo dosaženo u vzorků BK-15-150 a BK-25-250. Bylo prokázáno, že se zvětšující vzdáleností podpěr se snižují hodnoty  $K_{oh}$ . Ve všech případech je výsledný  $K_{ohC}$  přibližně o 50 % vyšší než  $K_{ohB}$ .

Koeficient ohýbatelnosti je závislý na minimálním poloměru ohybu. Zde potvrzujeme předpoklad, že se zvyšující se tloušťkou materiálu se zvyšuje i minimální poloměr ohybu. Je zde přímá úměra, kdy nejmenšího poloměru ohybu dosahujeme u vzorků tloušťky 5 mm. Se zvyšující se vzdáleností podpěr dochází ke zvyšování minimálního poloměru ohybu. Při vzájemné interakci se výsledky jen potvrzují, nejmenšího poloměru ohybu je dosahováno u vzorků BK-5-100, BK-10-100 a BK-15-150 mm.

Správná znalost koeficientů ohýbatelnosti dřeva  $K_{ohC}$  a  $K_{ohB}$  a účinků geometrických parametrů ohybu na jejich hodnoty má vědecký i praktický význam. Naměřené hodnoty koeficientů ohýbatelnosti na základě této práce pomáhají lépe pochopit problematiku ohýbání dřeva a správné zvolení geometrických parametrů ohybu. Zjištěné poznatky mohou napomoci při navrhování nástrojů pro ohýbání a zároveň i určují napětí, kterému je možno výrobek během používání vystavovat. Studie analyzuje účinky těchto

vybraných parametrů včetně jejich vzájemné interakce na  $K_{ohB}$  a  $K_{ohC}$ . Díky poznání vzájemné interakce tloušťky a vzdálenosti podpěr na koeficient ohýbatelnosti je možné tyto parametry vhodně zvolit tak, aby byl výsledný koeficient ohýbatelnosti co nejvhodnější pro určené využití. Z výsledků studie vyplývá, že koeficient ohýbatelnosti je významně ovlivňován právě touto vzájemnou interakcí geometrických parametrů ohybu. Zároveň výsledky práce potvrdily výsledky z dostupných vědeckých studií, že většího koeficientu ohýbatelnosti je dosahováno u  $K_{ohC}$ . Při volbě širšího množství souborů vzorků by mohlo být dosaženo velice ucelených a komplexních výsledků, což by mohlo být předmětem dalšího zkoumání. Tato práce potvrzuje, že hlubší zkoumání vzájemné interakce geometrických parametrů ohybu na koeficient ohýbatelnosti má svůj význam. Již tento experiment prokazuje jisté trendy a závislosti geometrických parametrů ohybu na koeficient ohýbatelnosti.

## 10 Seznam použité literatury

AYDIN, I., ÇOLAK, S., Çolakoğlu, G., and Salih, E. (2004). "A comparative study on some physical and mechanical properties of laminated veneer lumber (LVL) produced from beech (*Fagus orientalis* Lipsky) and eucalyptus (*Eucalyptus camaldulensis* Dehn.) veneers," *Holz. Roh. Werkst.* 62(3), 218-220. DOI: 10.1007/s00107-004-0464-3

UHLÍŘ, A., VLASÁK J.. *Technologie výroby nábytku III pro 4. ročník studijního oboru Nábytkářství. 2.*, aktualiz. vyd. Praha: Informatorium, 1997. ISBN 80-860-7304-1.

UHLÍŘ, J. *Odkaz Michaela Thoneta: katalog k výstavě: Bystřice pod Hostýnem 1861-2011.* Bystřice pod Hostýnem: Město Bystřice pod Hostýnem, 2011. ISBN 978-80-904117-5-3.

UHLÍŘ, J. *Semper sursum: katalog k výstavě: Bystřice pod Hostýnem 1861-2011.* Brno: ERA, 2005. Edice Zpravodaje města Bystřice pod Hostýnem. ISBN 80-736-6017-2.

GOYNE EVANS. *American Windsor Furniture: Specialized Forms.* New York: Hudson Hills Press, 1997. ISBN 1-55595-064-7.

GOYNE EVANS. *Windsor-Chair Making in America: From Craft Shop to consumer.* University Press of New England, 2006. ISBN 978-1584654933.

NAVI, P., SANDBERG, D. *Thermo-Hydro-Mechanical Wood Processing* [online]. CRC Press, 2011[cit. 2020-04-16]. ISBN 13-978-1-4398-6043-4.

GAFF, M., GÁBORÍK, J. 2014. Effect of Cyclic Loading on the Elasticity of Beech Solid and Laminated Wood

UGOLEV, V. N., *Drevesinovedenije s osnovami lesnovo tovarovedenija.* Moskva, 365 s.

BÖHM, M.; REISNER, J.; BOMBA, J. *Materiály na bázi dřeva.* 1. vyd. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, Fakulta lesnická a dřevařská, Katedra zpracování dřeva, 2012. 183 s. ISBN 978-80-213-2251-6.

HORÁČEK, P. *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva I.* 1. vyd. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 1998. 297 s. ISBN 80-7157-347-7.

J. Bodig, B.A. *Jayne Mechanics of wood and wood composites* Van Nostran-Reinhold Co., Inc., New York, NY (1982), p. 712

KAFKA, E. et al. *Dřevařská příručka I. část.* 1. vyd. 1989.



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

NIEMZ, P. *Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe*. Weinbrenner: DRW-Verlag Stuttgart, 1993. 243 s. ISBN 3-87181-324-9

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

ŠLEZINGEROVÁ, J.; GANDELOVÁ, L. Stavba dřeva. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2005. 187 s. ISBN 80-7157-636-0.

ŠLEZINGEROVÁ, J.; HORÁČEK, P.; GANDELOVÁ, L. Nauka o dřevě. 1. vyd. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 1998. 176 s. ISBN 80-7157-194-6.

TREBULA, P.; KLEMENT, I. Sušenie a hydrotermická úprava dreva – Návody na cvičenia. 1. vyd. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 1998. 205 s. ISBN 80-228-0727-3.

ZEMIAR, J. Kategorizácia a charakteristika procesov spracovania dreva. 1. vyd. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 1997. 55 s. ISBN 80-228-0711-7.

HEBÁK, P. *Vícerozměrné statistické metody*. 2., přeprac. vyd. Praha: Informatorium, 2007-. ISBN 8073330393.

KUKLÍK, P. *Dřevěné konstrukce*. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-010-3310-4.

GAFF, M.; BABIAK, M. Tangent modulus as a function of selected factors. *Composite Structures*. 2018, vol. 202, s. 436–446.

GAFF, M.; GAŠPARÍK, M.; BABIAK, M.; VOKATÝ, V. *Bendability characteristics of wood lamellae in plastic region*. 2017, vol. 163, s. 410–422.

GAFF, M.; VOKATÝ, V.; BABIAK, M.; CIHAD BAL, B. Coefficient of wood bendability as a function of selected factors. *Construction and Building Materials*. 2016, vol. 126, s. 632–640.

SVOBODA, T., GAFFOVÁ, Z., RAJNOHA, R., ŠATANOVÁ, A., KMINIAK, R. Bending Forces at the Proportionality Limit and the Maximum – Technological Innovations for Better Performance in Wood Processing Companies. *BioResources* [online]. 2017, 12(2), 4146-4165 [cit. 2020-05-16]. DOI: 10.15376/biores.12.2.4146-4165. ISSN 1930-2126. Dostupné z: <http://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/11318>

SIKORA, A., SVOBODA T., ZÁBORSKÝ, V. a GAFFOVÁ Z. Effect of Selected Factors on the Bending Deflection at the Limit of Proportionality and at the Modulus of Rupture in Laminated Veneer Lumber. *Forests* [online]. 2019, 10(5)

[cit. 2020-02-10]. DOI: 10.3390/f10050401. ISSN 1999-4907. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1999-4907/10/5/401>

GAFF, M., HÝSEK Š., SIKORA A. a M. *Newly Developed Boards Made from Crushed Rapeseed Stalk and their Bendability Properties* [online]. 2018 [cit. 2020-05-16]. DOI: 10.15376/biores.13.3.4776-4794. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/324908804\\_Newly\\_Developed\\_Boards\\_Made\\_from\\_Crushed\\_Rapeseed\\_Stalk\\_and\\_their\\_Bendability\\_Properties](https://www.researchgate.net/publication/324908804_Newly_Developed_Boards_Made_from_Crushed_Rapeseed_Stalk_and_their_Bendability_Properties)

SVOBODA, T., SIKORA A., ZÁBORSKÝ A., GAFFOVÁ Z.. *Impact of Selected Factors on the Bending Forces at the Proportionality Limit and Yield Point in Laminated Veneer Lumber*. *Bioresources* [online]. 2019, 14 (2), 2491-2512 [cit. 2020-05-16]. DOI: 10.15376/biores.14.2.2491-2512. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/330966945\\_Impact\\_of\\_Selected\\_Factors\\_on\\_the\\_Bending\\_Forces\\_at\\_the\\_Proportionality\\_Limit\\_and\\_Yield\\_Point\\_in\\_Laminated\\_Veneer\\_Lumber](https://www.researchgate.net/publication/330966945_Impact_of_Selected_Factors_on_the_Bending_Forces_at_the_Proportionality_Limit_and_Yield_Point_in_Laminated_Veneer_Lumber)

BABIAK, M., GAFF, M., SIKORA, A. a HÝSEK, Š. Modulus of elasticity in three- and four-point bending of wood. *Composite Structures* [online]. 2018, 204, 454-465 [cit. 2020-05-16]. DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.07.113. ISSN 02638223. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263822317342538>

CAMPILHO, R.D.S.G., M.F.S.F. DE MOURA, A.M.J.P. BARRETO, J.J.L. MORAIS a J.J.M.S. DOMINGUES. Experimental and numerical evaluation of composite repairs on wood beams damaged by cross-graining. *Construction and Building Materials* [online]. 2010, 24(4), 531-537 [cit. 2020-05-17]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2009.10.006. ISSN 09500618. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061809003432>

DEJMAL, A. *Základy hypotermické úpravy a ochrany dřeva*. 1. vyd. Brno : Mendelova zemědělská univerzita v Brně, 1995. 193 s. ISBN 80-7157-163-3.

KARASOVÁ, D. *GDN: geneze designu nábytku*. V Praze: Uměleckoprůmyslové muzeum, 2012. ISBN 978-80-7101-103-3

DRÁPELA, J. *Výroba nábytku technologie*. Praha: SNTL - Státní nakladatelství technické literatury, 1980.

GAFF, M. – GAŠPARÍK, M. – BORŮVKA, V. – BABIAK, M. Simulating stresses associated with the bending of wood using a finite element method. *BioResources*, 2015, roč. 10, č. 2, s. 2009-2019. ISSN: 1930-2126.

GAFF, M., M. GAŠPARÍK, V. BORŮVKA a E. HAVIAROVÁ. Stress simulation in layered wood-based materials under mechanical loading [online]. 2015b, 87, 1065-1071 [cit. 2020-03-18]. DOI: 10.1016/j.matdes.2015.08.128. ISSN 02641275. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0264127515303786>

HÝSEK, Š., GAFF, M., SIKORA, A., and BABIAK, M. (2018). "New composite material based on winter rapeseed and his elasticity properties as a function of selected factors,"

DŘEVAŘSKÁ TECHNICKÁ PŘÍRUČKA, Kolektiv. 1970. Dřevařská technická příručka. Praha: STNL Nakladatelství technické literatury, s. 748.

ZEMIAR, J. *Technológia výroby nábytku*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2009. ISBN 978-80-228-2064-6.

PERELYGIN, L.M. 1965. *Náuka o dreve*. Bratislava: Slovenské vydavateľstvo technické literatury, s. 448.

### **Normy**

ČSN EN 310. Stanovení modulu pružnosti v ohybu a pevnosti v ohybu. Praha: Český normalizační institut, 1996, 8 s.

ČSN 49 0103. Dřevo. Zjišťování vlhkosti při fyzikálních a mechanických zkouškách.

### **Internetové zdroje**

DALHEIM, R. Woodworking network [online]. Woodworking network, 2017 [cit. 2020-04-10]. Dostupné z: <https://www.woodworkingnetwork.com/technology/cold-bend-hardwood-bends-fix-desired-shape>

Hulinský, P. Technologická příprava dřeva [online]. Brno: Publi.cz, 2016 [cit. 2020-05-16]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/164/05.html>

Ludmila Hlásková Ohýbání a lamelování masivního dřeva [online]. [cit. 10.2.2019]. Dostupné z: [https://fraxinus.mendelu.cz/vyuka/soubory/TMZD\\_NMS/Povinne\\_volitelne\\_predmety/Tvarovani\\_materialu\\_na\\_bazi\\_dreva/pr04%20Ohyb%C3%AD.pdf](https://fraxinus.mendelu.cz/vyuka/soubory/TMZD_NMS/Povinne_volitelne_predmety/Tvarovani_materialu_na_bazi_dreva/pr04%20Ohyb%C3%AD.pdf)

Encyclopedia Britannica *Windsor chair* [online]. [cit. 15.4.2019]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/topic/Windsor-chair>

## 11 Seznam příloh

PŘÍLOHA 1	MODUL PRUŽNOSTI	85
PŘÍLOHA 2	SÍLA NA MEZI PEVNOSTI	87
PŘÍLOHA 3	SÍLA NA MEZI ÚMĚRNOSTI	89
PŘÍLOHA 4	PROCENTNÍ POMĚR SIL $P_f$	91
PŘÍLOHA 5	PRŮHYB NA MEZI PEVNOSTI	93
PŘÍLOHA 6	PRŮHYB NA MEZI ÚMĚRNOSTI	95
PŘÍLOHA 7	PROCENTNÍ POMĚR SIL $P_y$	97
PŘÍLOHA 8	KOEFICIENT OHÝBATELNOSTI	99
PŘÍLOHA 9	MINIMÁLNÍ POLOMĚR OHYBU	102

## Příloha 1 Modul pružnosti

Tab. 15 - Porovnání účinků tloušťky vzorku pomocí Duncanova testu na hodnoty Modulu pružnosti

Modul pružnosti (MPa)					
Tloušťka vzorku	{1} 236	{2} 417	{3} 604	{4} 834	{5} 924
5		0	0	0	0
10	0		0,786	0	0
15	0	0,786		0	0
20	0	0	0		0,656
25	0	0	0	0,656	

Tab. 16 Porovnání účinků vzdálenosti podpěr pomocí Duncanova testu na hodnoty Modulu pružnosti

Modul pružnosti (MPa)					
Tloušťka vzorku	{1} 10 634	{2} 8 448	{3} 9 588	{4} 7 817	{5} 11 087
5		0	0,048	0	0,39
10	0		0,031	0,232	0
15	0,048	0,031		0,001	0,006
20	0	0,232	0,001		0
25	0,39	0	0,006	0	

Tab. 17 Porovnání účinků interakce tloušťky a vzdálenosti podpěr pomocí Duncanova testu  
na MOE

Modul pružnosti (MPa)							
Vzorek	{1} 8 698	{2} 8 448	{3} 7 599	{4} 7 817	{5} 12 784	{6} 11 141	{7} 11 087
<b>BK-10-100</b>		0,6	0,033	0,081	0	0	0
<b>BK-15-150</b>	0,6		0,092	0,186	0	0	0
<b>BK-20-200</b>	0,033	0,092		0,647	0	0	0
<b>BK-25-250</b>	0,081	0,186	0,647		0	0	0
<b>BK-5-100</b>	0	0	0	0		0,001	0,001
<b>BK-10-200</b>	0	0	0	0	0,001		0,911
<b>BK-15-300</b>	0	0	0	0	0,001	0,911	

## Příloha 2 Síla na mezi pevnosti

Tab. 18 Porovnání účinků tloušťky vzorku pomocí Duncanova testu na hodnoty  $F_p$ 

$F_p$ (N)					
Tloušťka vzorku	{1} 369,11	{2} 956,45	{3} 1 448,1	{4} 2 312,5	{5} 3 034,8
5		0	0	0	0
10	0		0	0	0
15	0	0		0	0
20	0	0	0		0
25	0	0	0	0	

Tab. 19 Porovnání účinků vzdálenosti podpěr pomocí Duncanova testu na hodnoty  $F_p$ 

$F_p$ (N)					
Tloušťka vzorku	{1} 864,5	{2} 1 980,8	{3} 1 356,8	{4} 3 034,8	{5} 942
5		0	0	0	0,54
10	0		0	0	0
15	0	0		0	0
20	0	0	0		0
25	0,54	0	0	0	

Tab. 20 Porovnání účinků interakce tloušťky a vzdálenosti podpěr pomocí Duncanova testu na  $F_p$ 

$F_p$ (N)							
Vzorek	{1} 1310,4	{2} 1980,8	{3} 2312,5	{4} 3034,8	{5} 369,8	{6} 611,09	{7} 942,07
<b>BK-10-100</b>		0	0	0	0	0	0
<b>BK-15-150</b>	0		0	0	0	0	0
<b>BK-20-200</b>	0	0		0	0	0	0
<b>BK-25-250</b>	0	0	0		0	0	0
<b>BK-5-100</b>	0	0	0	0		0	0
<b>BK-10-200</b>	0	0	0	0	0		0
<b>BK-15-300</b>	0	0	0	0	0	0	



### Příloha 3 Síla na mezi úměrnosti

Tab. 21 - Porovnání účinků tloušťky vzorku pomocí Duncanova testu na hodnoty FE

F <sub>E</sub> (N)					
Tloušťka vzorku	{1} 107,23	{2} 272,05	{3} 505,13	{4} 654,17	{5} 987,63
5		0	0	0	0
10	0		0	0	0
15	0	0		0	0
20	0	0	0		0
25	0	0	0	0	

Tab. 22 - Porovnání účinků tloušťky vzorku pomocí Duncanova testu na hodnoty FE

F <sub>E</sub> (N)					
Tloušťka vzorku	{1} 201,03	{2} 612,96	{3} 432,22	{4} 987,63	{5} 402,69
5		0	0	0	0
10	0		0	0	0
15	0	0		0	0,49
20	0	0	0		0
25	0	0	0,49	0	

Tab. 23 - Porovnání účinků interakce vzdálenosti podpěr a tloušťky vzorků pomocí Duncanova testu na hodnoty FE

F <sub>E</sub> (N)							
Vzorek	{1} 285,45	{2} 612,96	{3} 654,17	{4} 987,63	{5} 107,23	{6} 258,98	{7} 402,69
<b>BK-10-100</b>		0	0	0	0	0,49	0
<b>BK-15-150</b>	0		0,29	0	0	0	0
<b>BK-20-200</b>	0	0,29		0	0	0	0
<b>BK-25-250</b>	0	0	0		0	0	0
<b>BK-5-100</b>	0	0	0	0		0	0
<b>BK-10-200</b>	0,49	0	0	0	0		0
<b>BK-15-300</b>	0	0	0	0	0	0	

## Příloha 4 Procentní poměr sil $P_F$

Tab. 24 - Porovnání účinků tloušťky vzorku pomocí Duncanova testu na hodnoty  $P_F$ 

$P_F$ (%)					
Tloušťka vzorku	{1} 29,44	{2} 31,84	{3} 37,5	{4} 28,4	{5} 32,32
5		0,36	0	0,7	0,31
10	0,36		0,04	0,22	0,86
15	0	0,04		0	0,05
20	0,7	0,22	0		0,18
25	0,31	0,86	0,05	0,18	

Tab. 25 - Porovnání účinků vzdálenosti podpěr pomocí Duncanova testu na hodnoty  $P_F$ 

$P_F$ (%)					
Tloušťka vzorku	{1} 25,26	{2} 31,3	{3} 36	{4} 32,32	{5} 43,71
5		0,01	0	0	0
10	0,01		0,06	0,66	0
15	0	0,06		0,12	0
20	0	0,66	0,12		0
25	0	0	0	0	

Tab. 26 - Porovnání účinků interakce vzdálenosti podpěr a tloušťky vzorků pomocí Duncanova testu na hodnoty PF

P <sub>F</sub> (%)							
Vzorek	{1} 21,51	{2} 31,3	{3} 28,4	{4} 32,32	{5} 29,44	{6} 41,92	{7} 43,71
<b>BK-10-100</b>		0	0	0	0	0	0
<b>BK-15-150</b>	0		0,26	0,67	0,44	0	0
<b>BK-20-200</b>	0	0,26		0,14	0,67	0	0
<b>BK-25-250</b>	0	0,67	0,14		0,26	0	0
<b>BK-5-100</b>	0	0,44	0,67	0,26		0	0
<b>BK-10-200</b>	0	0	0	0	0		0,46
<b>BK-15-300</b>	0	0	0	0	0	0,46	

## Příloha 5 Průhyb na mezi pevnosti

Tab. 27 - Porovnání účinků tloušťky vzorku pomocí Duncanova testu na hodnoty YP

Y <sub>P</sub> (mm)					
Tloušťka vzorku	{1} 5,03	{2} 7,16	{3} 11,31	{4} 6,22	{5} 9,43
5		0,02	0	0,17	0
10	0,02		0	0,27	0,01
15	0	0		0	0,03
20	0,17	0,27	0		0
25	0	0,01	0,03	0	

Tab. 28 - Porovnání účinků vzdálenosti podpěr pomocí Duncanova testu na hodnoty YP

Y <sub>P</sub> (mm)					
Tloušťka vzorku	{1} 4,22	{2} 6,70	{3} 8,76	{4} 9,42	{5} 15,70
5		0	0	0	0
10	0		0	0	0
15	0	0		0,23	0
20	0	0	0,23		0
25	0	0	0	0	

Tab. 29 - Porovnání účinků interakce vzdálenosti podpěr a tloušťky vzorků pomocí Duncanova testu na hodnoty YP

Y <sub>P</sub> (mm)							
Vzorek	{1} 3,49	{2} 6,70	{3} 6,22	{4} 9,42	{5} 5,03	{6} 10,74	{7} 15,70
<b>BK-10-100</b>		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>BK-15-150</b>	0,00		0,38	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>BK-20-200</b>	0,00	0,38		0,00	0,03	0,00	0,00
<b>BK-25-250</b>	0,00	0,00	0,00		0,00	0,01	0,00
<b>BK-5-100</b>	0,00	0,00	0,03	0,00		0,00	0,00
<b>BK-10-200</b>	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00		0,00
<b>BK-15-300</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	

## Příloha 6 Průhyb na mezi úměrnosti

Tab. 30 - Porovnání účinků tloušťky vzorku pomocí Duncanova testu na hodnoty YE

<b>Y<sub>E</sub> (mm)</b>					
<b>Tloušťka vzorku</b>	<b>{1}</b> <b>0,78</b>	<b>{2}</b> <b>1,36</b>	<b>{3}</b> <b>2,29</b>	<b>{4}</b> <b>1,07</b>	<b>{5}</b> <b>1,54</b>
<b>5</b>		0,02	0	0,23	0
<b>10</b>	0,02		0	0,23	0,46
<b>15</b>	0	0		0	0
<b>20</b>	0,23	0,23	0		0,07
<b>25</b>	0	0,46	0	0,07	

Tab. 31 - Porovnání účinků vzdálenosti podpěr pomocí Duncanova testu na hodnoty YE

<b>Y<sub>E</sub> (mm)</b>					
<b>Tloušťka vzorku</b>	<b>{1}</b> <b>,57</b>	<b>{2}</b> <b>,89</b>	<b>{3}</b> <b>1,77</b>	<b>{4}</b> <b>1,54</b>	<b>{5}</b> <b>3,63</b>
<b>5</b>		0,03	0,00	0,00	0,00
<b>10</b>	0,03		0,00	0,00	0,00
<b>15</b>	0,00	0,00		0,11	0,00
<b>20</b>	0,00	0,00	0,11		0,00
<b>25</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	

Tab. 32 - Porovnání účinků interakce vzdálenosti podpěr a tloušťky vzorků pomocí Duncanova testu na hodnoty  $Y_E$ 

$Y_E$ (mm)							
Vzorek	{1} 3,49	{2} 6,70	{3} 6,22	{4} 9,42	{5} 5,03	{6} 10,74	{7} 15,70
<b>BK-10-100</b>		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>BK-15-150</b>	0,00		0,38	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>BK-20-200</b>	0,00	0,38		0,00	0,03	0,00	0,00
<b>BK-25-250</b>	0,00	0,00	0,00		0,00	0,01	0,00
<b>BK-5-100</b>	0,00	0,00	0,03	0,00		0,00	0,00
<b>BK-10-200</b>	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00		0,00
<b>BK-15-300</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	



## Příloha 7 Procentní poměr průhybu $P_y$

Tab. 33 - Porovnání účinků tloušťky vzorku pomocí Duncanova testu na hodnoty  $P_Y$ 

$P_Y$ (%)					
Tloušťka vzorku	{1} 16,20	{2} 16,68	{3} 19,59	{4} 17,85	{5} 17,10
5		0,78	0,08	0,39	0,63
10	0,78		0,13	0,53	0,81
15	0,08	0,13		0,31	0,17
20	0,39	0,53	0,31		0,66
25	0,63	0,81	0,17	0,66	

Tab. 34 - Porovnání účinků vzdálenosti podpěr pomocí Duncanova testu na hodnoty  $P_Y$ 

$P_Y$ (%)					
Tloušťka vzorku	{1} 13,59	{2} 14,01	{3} 20,18	{4} 17,10	{5} 25,17
5		0,77	0,00	0,02	0,00
10	0,77		0,00	0,04	0,00
15	0,00	0,00		0,04	0,00
20	0,02	0,04	0,04		0,00
25	0,00	0,00	0,00	0,00	

Tab. 35 - Porovnání účinků interakce vzdálenosti podpěr a tloušťky vzorků pomocí Duncanova testu na hodnoty PY

P <sub>Y</sub> (%)							
Vzorek	{1} 11,24	{2} 14,05	{3} 17,85	{4} 17,1	{5} 16,2	{6} 21,99	{7} 25,17
<b>BK-10-100</b>		0,08	0	0	0	0	0
<b>BK-15-150</b>	0,08		0,02	0,06	0,17	0	0
<b>BK-20-200</b>	0	0,02		0,63	0,33	0,01	0
<b>BK-25-250</b>	0	0,06	0,63		0,57	0	0
<b>BK-5-100</b>	0	0,17	0,33	0,57		0	0
<b>BK-10-200</b>	0	0	0,01	0	0		0,04
<b>BK-15-300</b>	0	0	0	0	0	0,04	

## Příloha 8 Koeficient ohýbatelnosti

Tab. 36 - Porovnání účinků tloušťky vzorku pomocí Duncanova testu na hodnoty KohC a KohB

<b>KohC</b>					
<b>Tloušťka</b>	<b>{1} ,031</b>	<b>{2} ,037</b>	<b>{3} ,042</b>	<b>{4} ,037</b>	<b>{5} ,044</b>
<b>5</b>		0,009	0,000	0,012	0,000
<b>10</b>	0,009		0,055	0,984	0,003
<b>15</b>	0,000	0,055		0,045	0,251
<b>20</b>	0,012	0,984	0,045		0,002
<b>25</b>	0,000	0,003	0,251	0,002	
<b>KohB</b>					
<b>Tloušťka</b>	<b>{1} ,020</b>	<b>{2} ,025</b>	<b>{3} ,028</b>	<b>{4} ,025</b>	<b>{5} ,030</b>
<b>5</b>		0,008	0,000	0,009	0,000
<b>10</b>	0,008		0,056	0,930	0,002
<b>15</b>	0,000	0,056		0,054	0,223
<b>20</b>	0,009	0,930	0,054		0,002
<b>25</b>	0,000	0,002	0,223	0,002	

Tab. 37 - Porovnání účinků vzdálenosti podpěr pomocí Duncanova testu na hodnoty KohC a KohB

<b>KohC</b>					
<b>Tloušťka</b>	<b>{1} ,036</b>	<b>{2} ,053</b>	<b>{3} ,034</b>	<b>{4} ,044</b>	<b>{5} ,031</b>
<b>5</b>		0,000	0,275	0,000	0,011
<b>10</b>	0,000		0,000	0,000	0,000
<b>15</b>	0,275	0,000		0,000	0,118
<b>20</b>	0,000	0,000	0,000		0,000
<b>25</b>	0,011	0,000	0,118	0,000	
<b>KohB</b>					
<b>Tloušťka</b>	<b>{1} ,024</b>	<b>{2} ,035</b>	<b>{3} ,023</b>	<b>{4} ,030</b>	<b>{5} ,021</b>
<b>5</b>		0,000	0,259	0,000	0,008
<b>10</b>	0,000		0,000	0,000	0,000
<b>15</b>	0,259	0,000		0,000	0,102
<b>20</b>	0,000	0,000	0,000		0,000
<b>25</b>	0,008	0,000	0,102	0,000	

Tab. 38 - Porovnání účinků interakce tloušťky materiálu a vzdálenosti podpěr pomocí

Duncanova testu na hodnoty KohC a KohB

<b>KohC</b>							
<b>Vzorek</b>	<b>{1}</b> <b>,024</b>	<b>{2}</b> <b>,053</b>	<b>{3}</b> <b>,037</b>	<b>{4}</b> <b>,04</b>	<b>{5}</b> <b>,03</b>	<b>{6}</b> <b>,03</b>	<b>{7}</b> <b>,03</b>
<b>BK-10-100</b>		0,00	0,02	0,18	0,00	0,00	0,00
<b>BK-15-150</b>	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>BK-20-200</b>	0,02	0,00		0,00	0,00	0,02	0,01
<b>BK-25-250</b>	0,18	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00
<b>BK-5-100</b>	0,00	0,00	0,00	0,00		0,49	0,81
<b>BK-10-200</b>	0,00	0,00	0,02	0,00	0,49		0,62
<b>BK-15-300</b>	0,00	0,00	0,01	0,00	0,81	0,62	
<b>KohB</b>							
<b>Vzorek</b>	<b>{1}</b> <b>,028</b>	<b>{2}</b> <b>,036</b>	<b>{3}</b> <b>,025</b>	<b>{4}</b> <b>,030</b>	<b>{5}</b> <b>,020</b>	<b>{6}</b> <b>,021</b>	<b>{7}</b> <b>,021</b>
<b>BK-10-100</b>		0,00	0,02	0,18	0,00	0,00	0,00
<b>BK-15-150</b>	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>BK-20-200</b>	0,02	0,00		0,00	0,00	0,01	0,00
<b>BK-25-250</b>	0,18	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00
<b>BK-5-100</b>	0,00	0,00	0,00	0,00		0,50	0,83
<b>BK-10-200</b>	0,00	0,00	0,01	0,00	0,50		0,62
<b>BK-15-300</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,83	0,62	

## Příloha 9 Minimální poloměr ohybu

Tab. 39 - Porovnání účinků tloušťky vzorku pomocí Duncanova testu na hodnoty  $R_{minC}$  a  $R_{minB}$

$R_{minC}$					
Tloušťka vzorku	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}
	157	279	403	560	621
5		0,000	0,000	0,000	0,000
10	0,000		0,000	0,000	0,000
15	0,000	0,000		0,000	0,000
20	0,000	0,000	0,000		0,030
25	0,000	0,000	0,000	0,030	
$R_{minB}$					
Tloušťka vzorku	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}
	236	417	604	834	924
5		0,000	0,000	0,000	0,000
10	0,000		0,000	0,000	0,000
15	0,000	0,000		0,000	0,000
20	0,000	0,000	0,000		0,032
25	0,000	0,000	0,000	0,032	

Tab. 40 - Porovnání účinků vzdálenosti podpěr pomocí Duncanova testu na hodnoty  $R_{minC}$  a  $R_{minB}$ 

$R_{minC}$					
Tloušťka vzorku	{1} 201	{2} 300	{3} 423	{4} 621	{5} 502
5		0,000	0,000	0,000	0,000
10	0,000		0,000	0,000	0,000
15	0,000	0,000		0,000	0,005
20	0,000	0,000	0,000		0,000
25	0,000	0,000	0,005	0,000	
$R_{minB}$					
Tloušťka vzorku	{1} 300	{2} 445	{3} 632	{4} 924	{5} 754
5		0,001	0,000	0,000	0,000
10	0,001		0,000	0,000	0,000
15	0,000	0,000		0,000	0,004
20	0,000	0,000	0,000		0,000
25	0,000	0,000	0,004	0,000	

Tab. 41 - Porovnání účinků interakce tloušťky materiálu a vzdálenosti podpěr pomocí

Duncanova testu na hodnoty  $R_{minC}$  a  $R_{minB}$ 

$R_{minC}$							
Vzorek	{1} 240	{2} 300	{3} 560	{4} 621	{5} 157	{6} 316	{7} 502
<b>BK-10-100</b>		0,027	0,000	0,000	0,002	0,007	0,000
<b>BK-15-150</b>	0,027		0,000	0,000	0,000	0,541	0,000
<b>BK-20-200</b>	0,000	0,000		0,025	0,000	0,000	0,032
<b>BK-25-250</b>	0,000	0,000	0,025		0,000	0,000	0,000
<b>BK-5-100</b>	0,002	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000
<b>BK-10-200</b>	0,007	0,541	0,000	0,000	0,000		0,000
<b>BK-15-300</b>	0,000	0,000	0,032	0,000	0,000	0,000	
$R_{minB}$							
Vzorek	{1} 357,5	{2} 445,9	{3} 834,1	{4} 924,1	{5} 236,2	{6} 475,3	{7} 754,4
<b>BK-10-100</b>		0,028	0,000	0,000	0,003	0,005	0,000
<b>BK-15-150</b>	0,028		0,000	0,000	0,000	0,465	0,000
<b>BK-20-200</b>	0,000	0,000		0,025	0,000	0,000	0,048
<b>BK-25-250</b>	0,000	0,000	0,025		0,000	0,000	0,000
<b>BK-5-100</b>	0,003	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000
<b>BK-10-200</b>	0,005	0,465	0,000	0,000	0,000		0,000
<b>BK-15-300</b>	0,000	0,000	0,048	0,000	0,000	0,000	