

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

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**2022**

**Bc. Petr Kupsa**

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

**ÚČINEK TLOUŠŤKY MATERIÁLU A VZDÁLENOSTI PODPĚR NA  
VYBRANÉ CHARAKTERISTIKY OHÝBÁNÍ**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

Studijní program:	Dřevařské inženýrství
Pracoviště:	Katedra zpracování dřeva a biomateriálů
Vedoucí diplomové práce:	Ing. Adam Sikora Ph.D.
Konzultant diplomové práce:	Ing. Petr Paul

# ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta lesnická a dřevařská

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Petr Kupsa

Dřevařské inženýrství

Název práce

**Účinek tloušťky materiálu a vzdálenosti podpěr na vybrané charakteristiky ohybu**

Název anglicky

**The effect of material thickness and support distance on selected bending characteristic**

---

### Cíle práce

Práce se bude věnovat zkoumání vybraných geometrických parametrů ohýbání bukového dřeva na vybrané charakteristiky ohybu. Vstupními geometrickými parametry ohybu řešených v rámci této práce budou tloušťka materiálu ( $h$ ) a vzdálenost podpěr ( $l_0$ ). Délka ohýbaného dřeva bude vycházet z těchto parametrů, tak aby byl zachován daný poměr mezi tloušťkou materiálu a vzdáleností podpěr při ohybu. Pro ohyb bude použita metoda trojbodového ohybu vycházející z normy EN 310. Na základě experimentálních měření budou příslušnými analýzami vyhodnoceny vlivy zkoumaných geometrických parametrů ohybu na výsledné charakteristiky ohybu.

### Metodika

1. Literární rozbor problematiky vlivu geometrie ohybu na charakteristiky ohybu.
2. Navržení metodiky tvorby zkušebních těles a jejich testování.
3. Experimentální zjištění vlivu geometrie ohybu na charakteristiky ohybu.
4. Statistické vyhodnocení.
5. Práci čleňte do standardních kapitol – úvod, literární rozbor, cíl práce, materiál a metodika, výsledky, diskuze, závěr, použitá literatura a souhrn.

Harmonogram práce:

1. Úvod (říjen 2021).
2. Analýza problematiky (listopad 2021).
3. Experimentální část (listopad 2021).
4. Měření (prosinec 2021).
5. Vyhodnocení (leden 2022).
6. Přínosy a doporučení (únor 2022).

7. Závěr (březen 2022).



**Doporučený rozsah práce**

80

**Klíčová slova**

charakteristiky ohýbání dřeva, geometrické parametry ohýbání

---

**Doporučené zdroje informací**

- ASTM E111-04 (2010). "Standard Test Method for Young's Modulus, Tangent Modulus, and Chord Modulus," ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- Bodig, J., and Jayne, B. A. (1982). "Mechanics of Wood and Wood Composites," Van Nostrand-Reinhold CO, Inc., New York, 712 pp. ISBN: 0-89464-777-6
- Frese, H., and Blaß. (2006). "Characteristic bending strength of beech glulam," Mater. Struct., 40(1), pp. 3-13. DOI: 10.1617/s11527-006-9117-9
- Gaff, M., Babiak, M., Vokatý, V., and Ruman, D. (2017). "Bending characteristics of hardwood lamellae in the elastic region," Composites Part B Engineering 116(1), pp. 61-75. DOI: 10.1016/j.compositesb.2016.12.058
- Niemz, P. (2016). "Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe," Educational Material, ETH-Zürich. DOI: 10.3929/ethz-a-010635628
- Požgaj, A., Chovanec, D., Kurjatko, S., a Babiak, M. (1993). "Štruktúra a Vlastnosti Dřeva," Příroda a. s., Bratislava, Slovakia, pp. 486. ISBN: 80-07-00600-1

---

**Předběžný termín obhajoby**

2021/22 LS – FLD

**Vedoucí práce**

Ing. Adam Sikora, Ph.D.

**Garantující pracoviště**

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů

**Konzultant**

Ing. Petr Paul

Elektronicky schváleno dne 23. 9. 2021

**doc. Ing. Roman Fojtík, Ph.D.**

Vedoucí ústavu

Elektronicky schváleno dne 15. 2. 2022

**prof. Ing. Róbert Marušák, PhD.**

Děkan

V Praze dne 10. 04. 2022

### Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem práci: „Účinek tloušťky materiálu a vzdálenosti podpěr na vybrané charakteristiky ohýbaní“ vypracoval samostatně a veškeré použité zdroje uvádím v seznamu použité literatury. Souhlasím, se zveřejněním práce v souladu s § 47b Zákona c. 111/1998 Sb., o vysokých školách ve znění pozdějších předpisu a v souladu s platnou Směrnicí o zveřejňování vysokoškolských závěrečných prací.

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

V Praze, dne: .....

.....

Petr Kupsa

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu práce Ing. Adamovi Sikorovi, PhD., za vstřícný přístup, odbornou pomoc při vyhodnocování vzorků a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Petru Paulovi za ochotu a odborný dohled při zpracovávání laboratorních výsledků. Poděkování také patří rodičům a přátelům za podporu v průběhu celého studia.

## **Abstrakt**

Diplomová práce se zabývá posouzením vlivu tloušťky materiálu a vzdálenosti podpěr na vybrané mechanické vlastnosti bukového dřeva (*Fagus sylvatica*), které byly zjišťovány pomocí třibodového ohybu. Hlavními faktory byla tloušťka zkušebních těles a vzdálenost podpěr. Úrovně faktoru tloušťky zkušebních těles byly 15, 20, 25, 45, 50, 55, 60, 80, 85, 90 mm. Úrovně faktoru vzdálenosti podpěr při ohybové zkoušce byly vždy desetinásobky tloušťky zkušebního tělesa. Délka materiálu byla o 80 cm delší jak vzdálenosti podpěr z každé strany 40 mm. Sledované mechanické vlastnosti byly získány analýzou silově průhybového diagramu (pevnost, práce, průhyb a moduly).

Výzkum diplomové práce hodnotil rozdíly ohybových charakteristik zkušebních těles s rostoucími geometrickými parametry. Podle (Požgaj, et al., 1993) krátká tělesa podléhají smykovému napětí více než delší tělesa, tím jsou negativně ovlivněny ohybové vlastnosti. Cílem práce je ověření této hypotézy a porovnání rozdílů mezi ohybovými charakteristikami zkušebních těles různých geometrických parametrů.

Vyhodnocení jednotlivých úrovní zkušebních těles potvrdilo, že vyšší tloušťka materiálu a vzdálenost podpěr má velmi významný vliv na hodnoty zkoumaných charakteristik. Zlepšení sledovaných charakteristik, lze dosáhnout zvolením vhodné tloušťky materiálu a délky podpěr.

**Klíčová slova:** třibodový ohyb, buk, mechanické vlastnosti, tloušťka, vzdálenost podpěr



## **Abstrakt v cizím jazyce**

This thesis deals with the assessment of the influence of material thickness and support distance on selected mechanical properties of beech wood (*Fagus sylvatica*), which were determined by using three-point bending. The main factors were the thickness of test specimens and support distance. The thickness factor levels of test specimens were 15, 20, 25, 45, 50, 55, 60, 80, 85, 90 mm. The support distance factor levels in the bending test were always ten times the thickness of the test specimens. The length of the material was 80 cm longer than the support distance from each side was 40 mm. The monitored mechanical properties were obtained by analysing the force deflection diagram (strength, work, deflection and modules).

The thesis research evaluated differences in bending characteristics of test specimens with increasing geometric parameters. According to (Požgaj, et al., 1993) short specimens are subject to shear stress more than longer specimens, thus bending properties are negatively affected. The aim of the thesis is to verify this hypothesis and compare differences between bending characteristics of test bodies of different geometric parameters.

Evaluation of individual levels of test specimens confirmed that the higher material thickness and distance of supports has a very significant influence on the values of the examined characteristics. Improvement of the observed characteristics can be achieved by choosing the appropriate material thickness and length of supports.

**Klíčová slova:** Three – point bending, beech, mechanical properties, thickness, support distance

## Cíl práce

Hlavním cílem diplomové práce je zhodnocení vlivu geometrických parametrů na sledované ohybové charakteristiky. Shrnout literární poznatky různých autorů, kteří se problematikou zabývali. Na základě měření, vyhodnocení a získaných poznatků různých autorů lze zhodnotit, jaký vliv má zvyšující se tloušťka a délka materiálu na sledované ohybové charakteristiky.

Sledovanými ohybovými charakteristikami byla pevnost v ohybu (MOR), modul plasticity (E), plastická práce ( $W_A$ ), aproximovaná práce ( $W_B$ ), sečnicový modul ( $CH_M$ ), tangentový modul na mezi pevnosti ( $E_P$ ), tangentový modul středový ( $E_{MW}$ ), tangentový modul na mezi úměrnosti ( $E_E$ ), síla na mez pevnosti ( $F_P$ ), síla na mez úměrnosti ( $F_E$ ), průhyb na mez pevnosti ( $Y_P$ ), průhyb na mez úměrnosti ( $Y_E$ ). Tělesa byla testována tříbodovým ohybem na testovacím zařízení UTS TIRA. Pro výzkum jsme zvolili bukové (*Fagus sylvatica*) dřevo, rozdílné tloušťky zkušebních těles a rozdílné nastavení vzdálenosti podpěr pro testovaný materiál. Naměřené hodnoty byly analyzovány softwarem MATESS ze silově – průhybového diagramu. K vyhodnocení jsme použili program Statistica 13, konkrétně byla použita jednosměrná analýza rozptylu a Duncanův test, pro určení statisticky významných hodnot.

# Obsah

<b>Cíl práce.....</b>	<b>10</b>
<b>Obsah .....</b>	<b>11</b>
<b>Seznam ilustrací .....</b>	<b>14</b>
<b>Seznam tabulek .....</b>	<b>16</b>
<b>Úvod .....</b>	<b>18</b>
<b>Analýza literárních poznatků .....</b>	<b>20</b>
<b>1 Dřevo a jeho vlastnosti .....</b>	<b>20</b>
1.1 Chemická struktura .....	20
1.1.1 Celulóza .....	20
1.1.2 Lignin.....	21
1.1.3 Hemicelulóza .....	21
1.2 Mikroskopická struktura dřeva .....	21
1.3 Submikroskopická struktura dřeva.....	22
1.3.1 Vztah mezi chemickým složením dřeva a stavbou buněčné stěny .....	22
1.3.2 Submikroskopická struktura buněčných stěn .....	23
1.4 Makroskopická struktura dřeva.....	24
1.4.1 Geometrie.....	24
1.4.2 Letokruhy.....	24
1.4.3 Jarní letní dřevo .....	25
1.4.4 Jádru a běl .....	25
1.5 Vybrané fyzikální vlastnosti .....	26
1.5.1 Vlhkost.....	26
1.5.2 Hmotnost a hustota .....	30
1.6 Mechanické vlastnosti .....	32
1.6.1 Pevnost.....	32
1.6.2 Pružnost .....	34
1.6.3 Plastické vlastnosti.....	36
<b>2 Mechanické namáhání .....</b>	<b>41</b>
2.1 Napětí a deformace .....	42
2.1.1 Vztah napětí a deformace .....	43
2.1.2 Deformace.....	44
2.1.3 Napětí.....	44
2.2 Tah a tlak.....	45

2.3	Smyk .....	46
<b>3</b>	<b>Jednoduchý ohyb dřeva .....</b>	<b>48</b>
3.1	Faktory ovlivňující ohyb .....	52
3.1.1	Vliv struktury dřeva .....	52
3.1.2	Geometrie.....	54
3.1.3	Jarní letní dřevo .....	56
3.1.4	Vlhkost.....	56
<b>4</b>	<b>Metodika.....</b>	<b>58</b>
4.1	Zkušební tělesa.....	58
4.1.1	Buk lesní .....	58
4.1.2	Výběr suroviny .....	59
4.1.3	Zpracování suroviny .....	59
4.1.4	Značení těles .....	60
4.1.5	Klimatizace .....	60
4.1.6	Mechanické testování .....	61
4.2	Výpočet sledovaných charakteristik .....	63
<b>5</b>	<b>Vyhodnocení a výsledky .....</b>	<b>67</b>
5.1	Výsledky a diskuze .....	68
<b>6</b>	<b>Závěr.....</b>	<b>74</b>
	<b>Seznam použité literatury .....</b>	<b>76</b>
	<b>Příloha 1 Síla na mez pevnosti.....</b>	<b>81</b>
	<b>Příloha 2 Síla na mez úměrnosti.....</b>	<b>82</b>
	<b>Příloha 3 Naměřené hodnoty <math>F_P</math>, <math>F_E</math>.....</b>	<b>83</b>
	<b>Příloha 4 Průhyb na mez pevnosti.....</b>	<b>84</b>
	<b>Příloha 5 Průhyb na mez úměrnosti .....</b>	<b>85</b>
	<b>Příloha 6 Naměřené hodnoty <math>Y_P</math> a <math>Y_E</math>.....</b>	<b>86</b>
	<b>Příloha 7 Sečnicový modul.....</b>	<b>87</b>
	<b>Příloha 8 Tangentový modul na mezi úměrnosti .....</b>	<b>88</b>
	<b>Příloha 9 Tangentový modul na střední hodnotě.....</b>	<b>89</b>
	<b>Příloha 10 Tangentový modul na mezi pevnosti .....</b>	<b>90</b>
	<b>Příloha 11 Naměřené hodnoty <math>CH_M</math>, <math>E_E</math>, <math>E_{MW}</math>, <math>E_P</math>.....</b>	<b>91</b>
	<b>Příloha 12 Modul plasticity .....</b>	<b>92</b>
	<b>Příloha 13 Neměřené hodnoty <math>E</math>.....</b>	<b>93</b>
	<b>Příloha 14 Plastická práce.....</b>	<b>94</b>
	<b>Příloha 15 Aproximovaná práce.....</b>	<b>95</b>

<b>Příloha 16 Naměřené hodnoty <math>A_w, B_w</math>.....</b>	<b>96</b>
<b>Příloha 17 Pevnost v ohybu.....</b>	<b>97</b>
<b>Příloha 18 Naměřené hodnoty MOR .....</b>	<b>98</b>
<b>Seznam příloh.....</b>	<b>99</b>

## Seznam ilustrací

Obr. 1 Přibližné zastoupení celulózy, hemicelulózy, ligninu v jednotlivých vrstvách buněčné stěny (Gandelová & Šlezingerová, 2014).....	22
Obr. 2 Sorpční izotermy bukového dřeva podle různých autorů (Kúdela & Čunderlík, 2012) .....	29
Obr. 3 Sorpční izoterma reakčního a nereakčního bukového dřeva a kůry (Kúdela & Čunderlík, 2012) .....	29
Obr. 4 Silově-průhybový diagram dřeva při ohýbání, $W$ – absolutní vlhkost (Gaff & Babiak, 2017).....	36
Obr. 5 Silově-průhybový diagram – plastické vlastnosti materiálu: $\sigma_p$ – mez pevnosti; tangent moduly: EE – na mezi úměrnosti, EMV – na střední hodnotě plasticity, EP – na mezi pevnosti; CHM – přímka sečnicového modulu (Gaff & Babiak, 2018) .....	38
Obr. 6 Silově-průhybový diagram dřeva při ohýbání – celková práce plastické oblasti (Gaff a Babiak, 2017) .....	39
Obr. 7 Silově-průhybový diagram dřeva při ohýbání: A) přibližná práce plastické oblasti, B) přibližná chyba (Gaff & Babiak, 2017).....	40
Obr. 8 Způsoby mechanického namáhání (Hájek, et al., 2018).....	41
Obr. 9 Složky napětí na základních plochách dřevěné kostky v kartézském pravouhlém systému (Požgaj, et al., 1993) .....	43
Obr. 10 Původní a deformovaný průřez nosníku v čistém ohybu (Bodig & Jayne, 1982) .....	47
Obr. 11 Jednoduchý ohyb nosníku: (a) nedeformovaný nosník, (b) deformovaný nosník, (c) schéma volné části profilů nosníku (d) diferenciální průřez (Bodig & Jayne, 1982)	49
Obr. 12 Rozložení napětí v průřezu namáhaného prvku (Babiak, et al., 2018).....	49
Obr. 13 Posuvné síly vzniklé tří bodovým ohybem (Babiak, et al., 2018).....	50
Obr. 14 Schéma ohybu jednovrstvého tělesa: a) deformovaný tvar, b) průřez deformovaného nosníku (Bodig & Jayne, 1982) .....	51
Obr. 15 Vliv geometrie na modul pružnosti a pevnost ohybu (Požgaj, et al., 1993).....	55
Obr. 16 Model závislosti modulu pružnosti na hustotě a vlhkosti (Požgaj, et al., 1993)	57
Obr. 17 Značení zkušebních těles (vlastní zdroj) .....	60
Obr. 18 Klimatizační zařízení (vlastní zdroj) .....	61
Obr. 19 Schéma zkušebního zařízení (EN 310, 1993).....	62
Obr. 20 Ohybová zkouška (vlastní zdroj).....	63

Obr. 21 Sečnicový modul v závislosti na tloušťce a vzdálenosti podpěr .....	69
Obr. 22 Tangentové moduly v závislosti na tloušťce a vzdálenosti podpěr .....	69
Obr. 23 Modul plasticity v závislosti na tloušťce a vzdálenosti podpěr .....	70
Obr. 24 Plastická práce v závislosti na tloušťce a vzdálenosti podpěr .....	71
Obr. 25 Aproximovaná práce v závislosti na tloušťce a vzdálenosti podpěr.....	72
Obr. 26 Pevnost v ohybu v závislosti na tloušťce a vzdálenosti podpěr.....	73

## Seznam tabulek

Tab. 1 Procentuální zastoupení bukových elementů v bukovém dřevě podle různých autorů (Kúdela & Čunderlík, 2012).....	22
Tab. 2 Hustota v suchém stavu a redukovaná hustota bukového dřeva na území Slovenska (Janotka & Kurjatko, 1978).....	31
Tab. 3 Hustota bukového dřeva v úplně suchém stavu a redukovaná hustota v čerstvém stavu podle různých autorů (Kúdela & Čunderlík, 2012).....	32
Tab. 4 Pevnost ohybu bukového dřeva (Kúdela & Čunderlík, 2012).....	33
Tab. 5 Hodnoty modulu pružnosti bukového dřeva při různých způsobech zatížení (Kúdela & Čunderlík, 2012).....	35
Tab. 6 Pevnost v tlaku bukového dřeva (Kúdela & Čunderlík, 2012).....	46
Tab. 7 Smyková pevnost bukového dřeva (Kúdela & Čunderlík, 2012).....	47
Tab. 8 Vliv vybraných anatomických parametrů na vlastnosti dřeva (Horáček, 2008) .	52
Tab. 9 Vliv geometrie na modul pružnosti a pevnost ohybu (Požgaj, et al., 1993).....	55
Tab. 10 Mechanické a fyzikální vlastnosti buku (Wagenführ, 1974; Sarvaš, et al., 2010) .....	59
Tab. 11 Rozměry zkušebních těles (vlastní zdroj).....	60
Tab. 12 Porovnání vlivu tloušťky zkušební těles a vzdálenosti podpěr na sílu meze pevnosti pomocí Duncanova testu .....	81
Tab. 13 Porovnání vlivu tloušťky zkušební těles a vzdálenosti podpěr na sílu meze úměrnosti pomocí Duncanova testu.....	82
Tab. 14 Tabulka naměřených hodnot $F_p$ a $F_E$ .....	83
Tab. 15 Porovnání vlivu tloušťky zkušební těles a vzdálenosti podpěr na průhyb na mezi pevnosti pomocí Duncanova testu .....	84
Tab. 16 Porovnání vlivu tloušťky zkušební těles a vzdálenosti podpěr na průhyb na mezi úměrnosti pomocí Duncanova testu.....	85
Tab. 17 Tabulka naměřených hodnot $Y_p$ a $Y_E$ .....	86
Tab. 18 Porovnání vlivu tloušťky zkušební těles a vzdálenosti podpěr na sečnicový modul pomocí Duncanova testu .....	87
Tab. 19 Porovnání vlivu tloušťky zkušební těles a vzdálenosti podpěr na tangentský modul meze úměrnosti pomocí Duncanova testu .....	88
Tab. 20 Porovnání vlivu tloušťky zkušební těles a vzdálenosti podpěr na tangentský modul na střední hodnotě pomocí Duncanova testu.....	89



Tab. 21 Porovnání vlivu tloušťky zkušební těles a vzdálenosti podpěr na tangentový modul meze pevnosti pomocí Duncanova testu .....	90
Tab. 22 Tabulka naměřených hodnot $CH_M$ , $E_E$ , $E_{MW}$ , $E_P$ .....	91
Tab. 23 Porovnání vlivu tloušťky zkušební těles a vzdálenosti podpěr na modul plasticity pomocí Duncanova testu .....	92
Tab. 24 Tabulka naměřených hodnot $E$ .....	93
Tab. 25 Porovnání vlivu tloušťky zkušební těles a vzdálenosti podpěr na plastickou práci pomocí Duncanova testu.....	94
Tab. 26 Porovnání vlivu tloušťky zkušební těles a vzdálenosti podpěr na aproximovanou práci pomocí Duncanova testu.....	95
Tab. 27 Tabulka naměřených hodnot $A_w$ , $B_w$ .....	96
Tab. 28 Porovnání vlivu tloušťky zkušební těles a vzdálenosti podpěr na pevnost v ohybu pomocí Duncanova testu.....	97
Tab. 29 Tabulka naměřených hodnot MOR .....	98

## Úvod

Dřevo je unikátní, přírodní materiál, který má pro své fyzikální a mechanické vlastnosti široké využití a je při vývoji lidstva nenahraditelný. Dřevo mělo v různých historických obdobích specifické využití, lidé ho zpočátku začali využívat jako zdroj tepla, na výrobu jednoduchých nástrojů, zbraní sloužících při lovu atd. Později dřevo kvůli výbornému poměru pevnosti a hmotnosti začalo sloužit jako stavební materiál, kde se začali využívat ohybové charakteristiky materiálu. Pro svou všestrannost, snadnou obrobitelnost a obnovitelnost se dřevo používá v dřevozpracujícím průmyslu (Požgaj, et al., 1993). Dřevo je heterogenní a anizotropní materiál. To má podstatný vliv na jeho různorodou strukturu, která ovlivňuje jeho vlastnosti. Strukturu dřeva lze rozdělit na mikroskopickou a makroskopickou. Z mikroskopického hlediska jsou ohybové charakteristiky ovlivněny odklonem fibril. Z makroskopického pohledu ohybové charakteristiky ovlivňuje uskupení letokruhů, jarní, letní dřevo, tak i jádrová a bělová část dřeva (Samuel, 1914; Gandelová, et al., 2009).

Zkoumání ohybové teorie můžeme zpravidla uplatnit pro konstrukční účely, ale také ohybové vlastnosti dřeva využíváme při tvarování ohybem apod. U dřeva je potřeba rozlišovat oblasti silově – průhybového diagramu na elastické a plastické oblasti (Požgaj, et al., 1993). Silově – průhybový diagram je křivka rozlišující deformace na dvě části, a to na lineární část po mez úměrnosti (elastická) a nelineární část nad mezí úměrnosti po mez pevnosti (plastická). Do napětí meze úměrnosti, se těleso po ukončení silového napětí vrátí do původního stavu. Naopak napětí nad mezí úměrnosti způsobuje trvalé změny tvaru na rozdíl od pružné deformace (Požgaj, et al., 1993). Práci, týkající se elastických vlastností je celá řada, nicméně neméně důležité jsou charakteristiky vyplývající z plastické práce oblasti pracovního diagramu. Hlavní otázkou je kdy se materiál dostane do plastické oblasti silově – průhybového diagramu a deformace se stává trvalou a v jaké míře ovlivní geometrie namáhaného tělesa ohybové charakteristiky.

Jak již bylo zmíněno ohybové charakteristiky dřeva jsou ovlivňovány spousty faktory, jak prostředím, tak charakterem materiálu. Jedním z významných faktorů, kterým se práce zabývá je vliv tloušťky materiálu a vzdálenosti podpěr na ohybové charakteristiky dřeva. Pro práci byla řešena problematika tříbodového statického ohybu, kde významnou roli hraje smykové napětí. Vliv tloušťky materiálu a vzdálenost podpěr na ohybové charakteristiky můžeme pozorovat podle (Požgaj, et al., 1993; Chao, et al.,

2017; Blomberg, 2005) u krátkých nosníků testovaných třibodovým ohybem, můžeme pozorovat časté porušení ve smyku, zejména s vyšší výškou. Snížením smykového napětí můžeme u dřeva dosáhnout vyšších plastických vlastností. Práce analyzuje změnu geometrie ohybu a její dopad na sledované ohybové vlastnosti (práce, průhyb, moduly...), tyto informace jsou důležité pro využití vhodné tloušťky a délky materiálu za účelem lepších ohybových charakteristik, například pro nosné konstrukce. Výsledky práce porovnají naměřené hodnoty s literárními poznatky a zhodnotíme, jaký vliv mají geometrické parametry na sledované charakteristiky.

# **Analýza literárních poznatků**

## **1 Dřevo a jeho vlastnosti**

Dřevo je organický materiál rostlinného původu. Z biologického hlediska se jedná o soubor rostlinných pletiv, která mají převážně zdřevnatělou buněčnou stěnu jednotlivých buněk. Většina buněk, které tvoří strukturu dřeva, živého stromu nejsou aktivní (Požgaj, et al., 1993).

Dřevo představuje pevný, pružný a přitom lehký materiál, který se dobře opracovává. Vlastnosti dřeva umožňují jeho široké využití v různých odvětvích. Například ve stavebnictví, kde kombinace dřeva s kovy umožňuje lehké a pevné konstrukce (Gandelová & Šlezingerová, 2014).

Dřevo má i spoustu nevýhod. Jeho anizotropní, nehomogenní charakter ovlivňuje fyzikální a mechanické vlastnosti. Makroskopické, mikroskopické i chemické složení ovlivňuje praktické využití dřeva (Gandelová & Šlezingerová, 2014).

### **1.1 Chemická struktura**

Suché dřevo vysušené na konstantní hmotnost různých dřevin má prakticky stejné chemické složení, a tím i stejnou hustotu dřevní substance. Průměrně obsahuje 49,5 % uhlíku, 44,2 % kyslíku, 6,3 % vodíku. Z chemického hlediska je dřevo biopolymer, skládající se z hydrofilní sacharidové složky strukturální jednotkou (Požgaj, et al., 1993). Dřevo tvoří polymery (biopolymery) celulóza, hemicelulózy a lignin (Gandelová & Šlezingerová, 2014).

#### **1.1.1 Celulóza**

Čistá celulóza je nerozvětvený homopolymer opakujících se složek celobiózy, tvoří 43 – 52 % z hmotnosti jehličnatého a listnatého stromu (Požgaj, et al., 1993). Tvoří konstrukční základ v rostlinných buňkách, je základní jednotkou buněčné stěny dřeva. Čím větší je polymerační stupeň řetězce celulózy tím je větší pevnost dřeva (Bodig & Jayne, 1982).

### **1.1.2 Lignin**

Lignin se podílí na zdřevnatění buněčných stěn. Je to rozvětvený amorfní polymer, tvořící další část buněčné stěny. Není tvořen ze sacharidů, ale převážně z aromatických alkoholů, které odpuzují vodu. Je chemicky stabilnější než celulóza a hemicelulózy. Má o něco větší výhřevnost než celulóza. Při působení vyšších teplot kolem 170 °C stává se plastickým (Bodig & Jayne, 1982). Dřevo obsahuje 20 – 30 % ligninu z celkové hmotnosti (Požgaj, et al., 1993).

### **1.1.3 Hemicelulóza**

Hemicelulózy mají v porovnání s celulózou kratší řetězce s menší molekulovou hmotností a jsou ze dřeva snadněji hydrolyzovatelné. Většinou se vyskytují v amorfní formě. Hemicelulózy významně ovlivňují chemické a fyzikální vlastnosti dřeva. Jejich obsah v závislosti na druhu dřeva kolísá v rozmezí 20 – 35 % (Kačíková, 2001).

## **1.2 Mikroskopická struktura dřeva**

Dřevo se skládá s výjimkou jsou parenchymatické buňky převážně z odumřelých buněk, buněčných stěn a prostorů mezi nimi (lumeny, mezibuněčné prostory). Buněčná stěna anatomických elementů není homogenní. Dřeviny dělíme na jehličnaté dřeviny (nahosemenné) a listnaté dřeviny (krytosemenné). Zkoumané buk patří do skupiny listnatých dřevin.

Buk je tvrdá roztroušeně pórovitá dřevina s poměrně pravidelnou, málo heterogenní strukturou. Základní dřevěná pletiva buku jsou vláknité pletiva, cévy (tracheidy) a parenchymatické buňky. V ohledu na cévy bukového dřeva a parenchymatické buňky se odborná literatura shoduje. Zatím, co se týče strukturálních typů a morfologie buku, názory na typy vláknitých pletiv se liší. Vzhledem k malým morfologickým rozdílům mezi jednotlivými typy pletiv, budeme dále považovat za základní vláknitou buňku bukového dřeva libriformní (dřevně) vlákno. Dřevěné vlákna (libriformní vlákna) tvoří cca 35-54 % dřevěné hmoty viz. tabulka (Kúdela & Čunderlík, 2012).

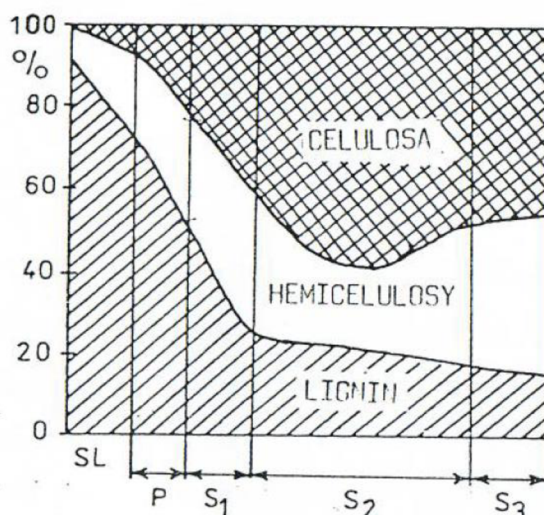
**Tab. 1 Procentuální zastoupení bukových elementů v bukovém dřevě podle různých autorů  
(Kúdela & Čunderlík, 2012)**

Cévy	Vlákná	Dřevěný parenchym	Dřeňové paprsky	autor
22-31-38	35-37-44	4-5-6	23-27-30	(Hüber & Prütz, 1938)
15-31-65	34-54	5	22-27-30	(Kollmann, 1939)
35	46	2	17	(Knigge & Schulz, 1961)
22,2-37,8	34,5-43,6	4,0-5,5	22,6-30,0	(Wagenführ, 1989)
				(Keller, 1981)
13,1	48,3	13,2	25,3	3 roční
22,9	47,3	8,1	21,9	Od 5 do 8 roků
26,6	49,5	4,9	19,1	Od 25 do 28 roků
26,1	53,7	4,0	16,2	Od 50 do 70 roků
31,0	37,4	4,6	27,0	Průměr hodnot autorů

### 1.3 Submikroskopická struktura dřeva

#### 1.3.1 Vztah mezi chemickým složením dřeva a stavbou buněčné stěny

Po chemické stránce se na stavbě buněčných stěn anatomických elementů dřeva podílejí především tři základní biopolymery, a to celulóza, hemicelulózy a lignin. Každá z těchto látek má v buněčné stěně, event. v jejích vrstvách, specifickou funkci ve vztahu k vlastnostem dřeva. Jejich zastoupení se v jednotlivých vrstvách buněčné stěny velmi liší. Přibližné zastoupení základních biopolymerů v buněčné stěně zachycuje obrázek 1 (Gandelová & Šlezingerová, 2014).



**Obr. 1 Přibližné zastoupení celulózy, hemicelulózy, ligninu v jednotlivých vrstvách buněčné stěny  
(Gandelová & Šlezingerová, 2014)**

Celulóza je základní stavební složkou buněčné stěny, tvoří její fibrilární kostru. Vlákenné makromolekuly celulózy se pomocí vodíkových vazeb seskupují ve vyšší

strukturální jednotky (fibrily), které jsou odlišně uspořádány v jednotlivých vazbách buněčné steny. Orientace celulosových struktur v buněčných stěnách je příčinou tzv. anizotropie vlastností dřeva (rozdílnost vlastností dřeva ve směru uložení nad molekulových struktur celulózy v buněčných stěnách a ve směru kolmém na toto uložení). Celulózová kostra zabezpečuje elasticitu buněčných stěn anatomických elementů a tím i dřeva vůbec. Po chemické stránce je celulóza nejstabilnější složkou buněčné stěny (zejména krystalická část) (Gandelová & Šlezingerová, 2014).

Celulóza je v buněčných stěnách doprovázena hemicelulózami. Mezi celulózou a hemicelulózou převažují chemické vazby. Hemicelulózy působí jako tmelící faktor celulosové kostry a jen částečně se podílí na vlastní struktuře buněčné stěny. Na hemicelulózy, především jejich boční řetězce, je vázán lignin. Chemicky jsou méně stálé než celulóza (Gandelová & Šlezingerová, 2014).

Lignin v buněčné stěně obaluje a stmeluje polysacharidové struktury. Působí zde jako zpevňující faktor. Díky své prostorové makromolekulové struktuře dobře vyplňuje submikroskopické dutinky polysacharidové kostry. Je vázán zejména na boční řetězce hemicelulóz fyzikálními, ale i chemickými vazbami. Existenci vazeb mezi ligninem a polysacharidy buněčné stěny zvyrazňuje užívaný termín lignopolysacharidové komplexy (LPC) (Gandelová & Šlezingerová, 2014).

### **1.3.2 Submikroskopická struktura buněčných stěn**

Celulóza tvoří strukturální kostru buněčných stěn anatomických elementů dřeva. Je to umožněno její schopností tvořit pomocí vodíkových vazeb nadmolekulové struktury (vyšší stavební jednotky). Velmi důležité řetězcové makromolekuly celulózy se seskupují asi v počtu 40 a tvoří elementární fibrily neboli micely. V průřezu jsou pravoúhlé (příčný rozměr 3-6 nm) a po délce se střídají oblasti s pravidelně uspořádanými makromolekulami celulózy do útvarů podobných krystalům (krystalická část celulózy) s oblastmi amorfními bez pravidelného uspořádání. 20-60 elementárních fibril skládá mikrofibrilu. Průměr mikrofibril je 20-30 nm. Asi 20 mikrofibril tvoří vyšší strukturální jednotku, které může být viditelná i světelným mikroskopem, tzn. makrofibrilu neboli fibrilu. Příčné rozměry se udávají kolem 400 nm a délka až několik mm. Makrofibrily tvoří lamely (např. v S2), lamely vrstvy (P1, P2, S1, S2, S3) a vrstvy tvořící buněčnou stěnu (Gandelová & Šlezingerová, 2014).

Mezi elementárními fibrilami neboli micelami jsou prostory o velikosti asi 1 nm, označované jako intermicelární prostory. Sem se mohou ukládat pouze nízkomolekulární látky (voda, anorganické látky). Prostory mezi mikrofibrilami se označují jako submikroskopické dutinky mezi celulosovými strukturami mají rozměry 6-10 nm a jsou vyplněny základní amorfni látkou (matrix) tvořenou hemicelulózami, ligninem, pektinovými látkami aj. Některé mohou být také prázdné a za určitých podmínek se sem ukládá voda eventuálně jádrové látky (Gandelová & Šlezingerová, 2014).

## **1.4 Makroskopická struktura dřeva**

Charakteristické znaky dřeva, které je možné spatřit pouhým okem, jsou makroskopické znaky dřeva. Můžeme podle nich rozlišit druh dřeviny podle textury, barvy, tvaru a drobnějších rozdílů (pórovitost).

### **1.4.1 Geometrie**

Při dimenzování dřevěných nosníků nevystačíme pouze s pevnostními charakteristikami získanými na malých (normalizovaných) tělesech. Je třeba vzít v úvahu všechny faktory, které ovlivňují mechanické vlastnosti konstrukčních materiálů. Moduly pružnosti a pevnost dřeva, které se zjišťovaly na normalizovaných a velkorozměrových tělesech (řezivo, nosník) nejsou stejné. Vyplývá to především z rozměrů a geometrie těles, na kterých tyto vlastnosti zjišťujeme, ale také výskyt různých vad dřeva. Na velkorozměrových tělesech je větší pravděpodobnost výskytu různých vad než na normalizovaných tělesech. Zvláště významný vliv na pevnost (stabilitu) při zatížení v tlaku má tloušťka materiálu. Při ohybovém namáhání je třeba kromě tloušťky a vzdálenosti podpěr uvažovat s poměrem výšky tělesa k jeho šířce (Požgaj, et al., 1993).

### **1.4.2 Letokruhy**

Letokruhy jsou vrstvy dřeva, které přirostou během ročního období. Za tvorbu letokruhů je zodpovědné kambium pomocí dělení buněk. Každý druh dřeviny má specifické znaky letokruhů, jako je pórovitost barva a šířka.

Jehličnaté dřeviny mají výrazný rozdíl mezi jarním a letním dřevem. Jarní dřevo je světlejší a má nižší hustotu, jak letní tmavé letokruhy.



Listnaté dřeviny lze rozdělit do dvou skupin. Kruhovitě pórovité dřeviny s výrazným jádrem. Mezi tyto dřeviny patří dub, jilm, jasan. Další zastoupení mají roztroušeně pórovité rostliny, jejich letokruhy jsou špatně rozeznatelné a patří k nim například habr, ořech, bříza (Siau, 1984).

### **1.4.3 Jarní letní dřevo**

Každý letokruh se skládá ze dvou strukturou a barvou rozdílných vrstev jarního a letního dřeva. Světlá část letokruhů je vytvořena na počátku vegetačního období a označuje se jako jarní dřevo. Tmavší část letokruhů je vytvořena v průběhu vegetačního období (v jeho druhé polovině) a nazývá se letní dřevo. Barevná rozdílnost jarního a letního je odrazem od jejich odlišné anatomické struktury. Obě části letokruhu se vzájemně liší svou hustotou. Jarní dřevo má nižší, letní dřevo má vyšší (Siau, 1984).

### **1.4.4 Jádro a běl**

Běl je světleji zbarvená část dřeva přiléhající ke kambiu. V rostoucím stromě obsahuje výrazné množství vlhkosti dřeva, živé buňky v dřeňových paprscích a v dřevním parenchymu. I přesto je velká část buněk, které tvoří bělové část dřeva odumřelá. Bělí je vedena voda s minerálními látkami od kořenů ke koruně stromu. Bělové dřevo je oproti jádru méně trvanlivé a odolné, ale snadněji impregnovatelné. Některé dřeviny mají jádro, které je tmavěji zbarvené než výrazně světlejší běl. Jádro se nachází ve středu stromu a díky němu rozdělujeme dřeviny na bělové dřeviny, s bělí a vyzrálým dřevem a jádrové dřeviny (Siau, 1984).

Bělové dřeviny jsou dřeviny, u kterých se nevyskytuje barevně odlišené jádro. Barva v celém průřezu kmene je tedy stejná. Ve dřevě jsou parenchymatické buňky v celém kmeni aktivní. Činnost těchto buněk je ve středu kmene nižší než při obvodu kmene. Jsou to například habr, olše, bříza, javor aj dřeviny (Siau, 1984; Gandelová & Šlezingerová, 2014).

U dřeviny s bělí a vyzrálým dřevem jsou v jádru buňky většinou odumřelé, nebo s nižší vitalitou. Buňky v bělí jsou aktivní i když jsou ve vyzrálém dřevě odumřelé. Buňky mají stále dobrou propustnost. Mezi vlhkostí běle a vlhkostí vyzrálého dřeva je značný rozdíl. To způsobuje rychlejší tmavnutí bělí než vyzrálého dřeva při kácení stromů. Při

sušení se barva se vyrovnává. Mezi tyto dřeviny můžeme zařadit například jasan, jilm, vrba aj. dřeviny (Siau, 1984; Gandelová & Šlezingerová, 2014).

U jádrových dřevin je aktivní pouze běl. V jádrovém dřevě se vyskytují v dřevních pletivech, lumenech, cévách nebo v odumřelém parenchymu jádrové látky. Tyto látky jsou odpovědné za zbarvení jádra. Mají vliv na fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva a zvyšují odolnost vůči biotickým činitelům. Je to například modřín, borovice, dub, akát aj. dřeviny (Čunderlík, 2009; Gandelová & Šlezingerová, 2014).

Dřeva s bělí a nepravým jádrem mají rozmanitě členitou tmavší zónu jádra s výraznou marginální linií, která odděluje jádro od světlejší zóny běle (buk, olše bříza topol, javor aj. dřeviny) (Gandelová & Šlezingerová, 2014).

## 1.5 Vybrané fyzikální vlastnosti

Dřevo je přírodní heterogenní materiál, jeho pórovitost a hygroskopicitu zajišťuje živiny pro růst. Vlhkost, hustota a vzhledové povrchové vlastnosti jsou fyzikální vlastnosti dřeva a ostatních materiálů na bázi dřeva (Matovič, 1993).

Vlastnosti bukového dřeva jsou předpokladem pro použití bukového materiálu. Společně se strukturou je považujeme za hlavní parametry jeho využití v dřevozpracujícím průmyslu.

### 1.5.1 Vlhkost

Dřevo je anizotropní materiál, to má vliv na hygroskopicitu, vodivost vody v radiálním směru významně ovlivňují dřeňové paprsky. Obecně platí, že koeficienty difúze v základních anatomických směrech podélném, radiálním a tangenciálním, jsou přibližně dány poměrem 35/3/2 (Siau, 1984).

Přítomnost kapalin (vody) ve dřevě se nazývá vlhkostí dřeva. Vyjadřuje se podílem hmotnosti vody k hmotnosti dřeva v absolutně suchém stavu – vlhkost absolutní  $W_{abs}$ , nebo podílem hmotnosti vody ke hmotnosti mokrého dřeva – vlhkost relativní  $W_{rel}$ . Absolutní a relativní vlhkost se nejčastěji vyjadřuje v % a vypočítá se podle vztahů (Horáček, 2008)

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

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

kde:

$W_{rel}$  – relativní vlhkost (%),

$W_{abs}$  – absolutní vlhkost (%),

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

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

$m_v$  – hmotnost vody (kg,g).

Absolutní vlhkost dřeva se používá pro charakteristiku fyzikálních a mechanických vlastností dřeva. Relativní vlhkost se využívá tam, kde je nezbytné znát procentuální zastoupení vody z celkové hmotnosti mokrého dřeva, např. při prodeji nebo nákupu dřeva podle jeho hmotnosti (Reinprecht, 2008)

Pro přepočítání mezi relativní a absolutní vlhkostí používáme vzorce:

$$W_{rel} = (100 \cdot W_{abs}) / (100 + W_{abs}) \quad (3)$$

$$W_{abs} = (100 \cdot W_{rel}) / (100 - W_{rel}) \quad (4)$$

Z hlediska uložení vody ve dřevě můžeme rozdělit vodu na volnou a vázanou. Volná voda, nazývaná také kapilární, vyplňuje ve dřevě zejména lumény, případně mezibuněčné prostory, přičemž je poutána silami kapilární povahy. V dřevě je přítomna pouze tehdy, když jsou buněčné stěny zaplněné vázanou vodou. Množství volné vody ve dřevě se pohybuje od bodu nasycení vláken až po úplné nasycení dřeva vodou. Její maximální množství může být vyšší než 100 %. Závisí převážně od objemu lumenů a v menší míře i od mezibuněčných prostor dané dřeviny (Požgaj, et al., 1993).

V závislosti na podílu vody ve dřevě ve vztahu k sušině dřeva rozlišujeme tři hraniční hodnoty:

**Vlhkost suchého dřeva**- ustálený poměr hmotnosti vody ke hmotnosti sušiny dle vztahu (rovnice 1) při sušení dřeva teplotou  $103 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ , tzn., že se ve dřevě nenachází žádná voda vázaná ani volná. Tato vlhkost se vyjadřuje vlhkostí absolutně suchého dřeva ( $w_0 = 0 \%$ ) (Reinprecht, 2008).

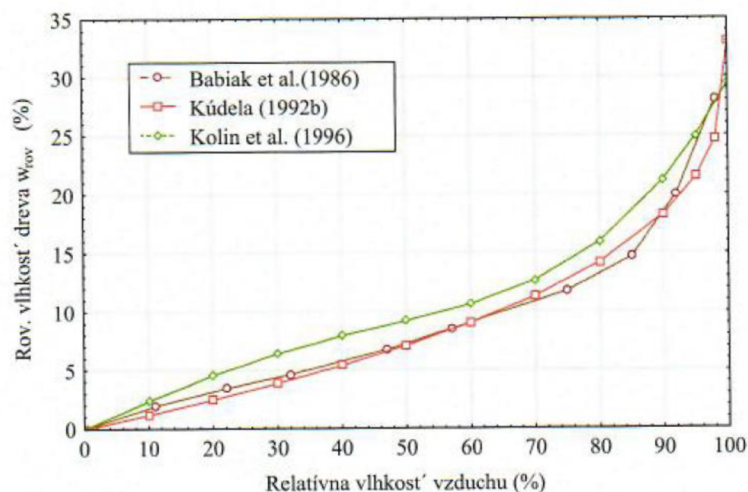
**Vlhkost při nasycení buněčných stěn** – mikrokapilární systém v buněčné stěně je zcela zaplněn vodou. Tato vlhkost se vyjadřuje mezi nasycení buněčných stěn MNBS nebo mezi hygroskopicity (Reinprecht, 2008).

**Vlhkost při nasycení dřeva** – mikro i makrokapilární systém je plně nasycen vodou, dřevo obsahuje maximální množství vody. Tato vlhkost se vyjadřuje maximální vlhkostí dřeva ( $W_{\max} = 80 \dots 400 \%$ ) (Reinprecht, 2008).

Čerstvě vytěžené bukové dřevo má poměrně vysokou vlhkost. V běli, jako fyziologicky aktivní části kmene se vlhkost pohybuje od 75 do 100 % a ve zralém dřevě od 60 do 80 %. Vlhkost čerstvého dřeva může v závislosti na ročním období, klimatu a deficitu vlhkosti klesnout až na 35 – 45 % (Kúdela & Čunderlík, 2012).

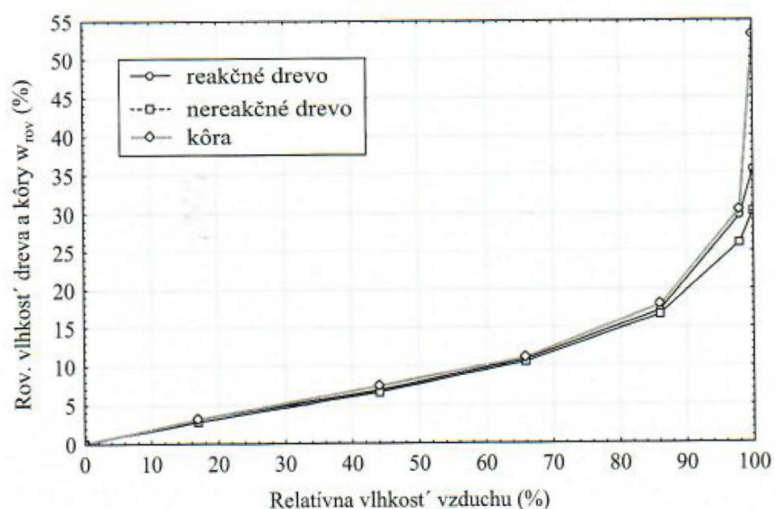
Vlhkost dřeva v daném prostředí závisí převážně na jeho nasáklivosti v závislosti na hustotě funkčních hydroxylových skupinách a na parametrech prostředí (relativní vlhkosti prostředí a teplotě). Vzhledem k prostředí bukové dřevo může obsahovat 0 % vlhkosti až po úplné nasycení buněčných stěn (přibližně 30 %). Nasáklivost dřeva z okolí nazýváme vodou vázanou. (Kúdela & Čunderlík, 2012).

Při změně parametrů prostředí bude změna vlhkosti v bukovém dřevě probíhat dokud nedosáhne rovnovážného stavu. Sorpční vlastnosti bukového dřeva při teplotě  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  můžeme sledovat na obrázku 2. Je vidět, exponenciální zvýšení vlhkosti v bukovém dřevě při zvýšení relativní vlhkosti prostředí od 60 % (Kúdela & Čunderlík, 2012).



**Obr. 2 Sorpční izotermy bukového dřeva podle různých autorů (Kúdela & Čunderlík, 2012)**

Další příčinou, které může způsobit rozdíly mezi sorpčními izotermami bukového dřeva je jeho homogenita. Reakční dřevo za stejných podmínek dosahuje mírně vyšší rovnovážnou vlhkost jak dřevo nereakční. Významné rozdíly byli převážně při vysokých vlhkostech viz. obrázek 3 (Kúdela & Čunderlík, 2012).



**Obr. 3 Sorpční izoterma reakčního a nereakčního bukového dřeva a kůry (Kúdela & Čunderlík, 2012)**

Je to z důvodu většího podílu celulózy a také z důsledku slabších vazeb G – vrstvy s S<sub>2</sub> vrstvou můžou ostatní vrstvy buněčné steny můžou více nasávat, čím se uvolňuje sorpční místa. (Kúdela & Čunderlík, 2012)

### 1.5.2 Hmotnost a hustota

Objemová hmotnost dřeva je charakterizována podílem hmotnosti dřeva a jeho objemu, udává se jednotkou v  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$  nebo  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ . Určení hustoty u dřeva poměrně obtížné, jelikož vlhkost dřeva ovlivňuje celkovou hmotnost. Další faktory, které mají zásadní vliv na hustotu a hmotnost dřeva jsou podíl letního dřeva v letokruhu, poloha v kmeni a věk stromu. Hustota dřeva je jedna z nejvýznamnějších charakteristik dřeva, která významně ovlivňuje většinu fyzikálních a mechanických vlastností dřeva. U jehličnatých dřevin s vyšším podílem letního dřeva objemová hmotnost roste. U listnatých dřevin je spíše naopak. Pro jehličnatá dřeva platí, že směrem k obvodu kmene se objemová hmotnost zvyšuje. U listnatého dřeva je variabilita vyšší (Horáček, 2008; Požgaj, et al., 1993).

Rozlišujeme následující veličiny:

- Hustotu dřevní substance – hustota buněčných stěn, vyjádřená bez všech dutin.
- Hustotu dřeva – rozeznáváme hustotu v suchém, mokřém stavu a při  $W=12\%$ .
- Redukovanou hustotu dřeva – udává, kolik sušiny se nachází v mokřém dřevě (Gandelová, et al., 2009).

Rozsáhlý výzkum hustoty a vybraných mechanických vlastností bukového dřeva probíhal na Slovensku v sedmdesátých letech 20. století. Zkoumali se hustoty v závislosti na lokaci, lesních podmínkách a poloze stromů. Výsledky lze zpozorovat v tabulce 2 (Kúdela & Čunderlík, 2012).

**Tab. 2 Hustota v suchém stavu a redukováaná hustota bukového dřeva na území Slovenska (Janotka & Kurjatko, 1978)**

Hustota bukového dřeva					
Vlastnost	Základní statistické charakteristiky	oblast			
		Západoslovenská	Středoslovenská	Východoslovenská	Slovensko
4-6 m nad zemí					
Hustota v suchém stavu	$\bar{x}$ [ $kg \cdot m^{-3}$ ]	696	673	688	684
	$s$ [ $kg \cdot m^{-3}$ ]	33	33	33	33
	$V$ (%)	4,8	4,9	4,8	4,8
	$n$	540	938	1080	2558
Redukovaná hustota v čerstvém dřevě	$\bar{x}$ [ $kg \cdot m^{-3}$ ]	566	555	563	561
	$s$ [ $kg \cdot m^{-3}$ ]	23	21	23	22
	$V$ (%)	4,1	3,8	4,0	4,0
	$n$	619	995	1241	2855
0,5-1 m pod korunou					
Hustota v suchém stavu	$\bar{x}$ [ $kg \cdot m^{-3}$ ]	677	654	667	665
	$s$ [ $kg \cdot m^{-3}$ ]	30	31	30	31
	$V$ (%)	4,5	4,8	4,6	4,6
	$n$	333	532	525	1393
Redukovaná hustota v čerstvém stavu	$\bar{x}$ [ $kg \cdot m^{-3}$ ]	562	548	552	553
	$s$ [ $kg \cdot m^{-3}$ ]	20	24	22	22
	$V$ (%)	3,5	4,5	4,1	4,0
	$n$	422	596	609	1627

Na základě výzkumu lze usoudit, že vliv lokací a lesní podmínky se neukázaly jako významný faktor. Z toho důvodu tyto data můžeme použít i pro náš výzkum. Nezjistily se významné rozdíly šířky letokruhů ani hustoty běle a zralého dřeva. Za to je dobré si všimnout rozdílů hustoty. Potvrdil se také vliv nadmořské výšky. Hustota s vlivem zvýšení nadmořské výšky mírně klesá. Při výšce 300 – 400 m n.m. byla průměrná hustota  $695 \text{ kg} \cdot \text{m}^3$  a při 900-1000 m n. m.  $656 \text{ kg} \cdot \text{m}^3$ . Poslední hodnoty udávané pro Slovensko jsou  $\rho_0 684 \text{ kg} \cdot \text{m}^3$  s odchylkou  $33,1 \text{ kg} \cdot \text{m}^3$  (Kúdela & Čunderlík, 2012). (Sarvaš, et al., 2010; Wagenführ, 1974) uvádí hustotu buku v suchém stavu  $720 \text{ kg} \cdot \text{m}^3$  a podle (Požgaj, et al., 1993)  $680 \text{ kg} \cdot \text{m}^3$ . Veškeré hodnoty hustoty spadají do rozmezí hustot měřených na území Evropy podle tabulky 3 (Kúdela & Čunderlík, 2012).

**Tab. 3 Hustota bukového dřeva v úplně suchém stavu a redukovaná hustota v čerstvém stavu podle různých autorů (Kúdela & Čunderlík, 2012).**

Základní statistické charakteristiky				
Vlastnosti	$\bar{x}$ [ $kg \cdot m^{-3}$ ]	$\bar{x}$ [ $kg \cdot m^{-3}$ ]	$n$	autor
$\rho_0$	490-680-880	-	-	(Reginač, et al., 1985)
$\rho_{rč}$	561	-	-	
$\rho_0$	677	32	40	(Kúdela, 1990)
$\rho_{rč}$	552	22	40	
$\rho_0$	490-680-880	-	-	(Lexa, et al., 1952)
$\rho_{rč}$	570	-	-	(Wagenführ, 2007)
$\rho_0$	679	27	39	(Kurjatko, 2010)
$\rho_{rč}$	558	20	39	
$\rho_0$	650	-	-	(Ugolev, 2007)
$\rho_{rč}$	560	-	-	

## 1.6 Mechanické vlastnosti

Dřevo jako každý jiný materiál tvoří atomy a molekuly, které jsou náhodně nebo zákonitě uspořádány v daném prostoru. Stupeň homogenity uspořádání atomů a molekul v objemu dřeva a orientace zejména jejich kovalentních a vodíkových vazeb určují velikost a orientaci mechanických vlastností na úrovni mikrostruktury a makrostruktury povrchu (Požgaj, et al., 1993).

Mechanické vlastnosti charakterizují schopnost dřeva odolávat účinkům vnějších sil. Tyto síly definují dřevo v závislosti na odporu jeho vnitřní struktury s výsledkem tohoto procesu jsou dočasné nebo trvalé změny tvaru dřeva.

Mezi mechanické vlastnosti patří pevnost, pružnost, tvrdost, deformovatelnost, charakteristiky výkonu, technologické charakteristiky, odolnost proti opotřebení, schopnost zadržovat spojovací prvky (Kvietková, 2015).

### 1.6.1 Pevnost

Velmi důležitou z konstrukčního hlediska nejsledovanější vlastností je pevnost. Pod pevností si lze představit odpor dřeva, resp. odolnost vůči trvalému porušení soudržnosti jeho částic. Nazýváme jí mezi pevností. Po překročení mezi pevnosti se materiál poruší. Způsob porušení (zlomení, roztrhnutí, uklouznutí, atd.) závisí na namáhání.



Na pevnosti bukového dřeva se převážně podílí jeho silnostěnné vláknité buňky. Variabilita struktury vláknitých buněk bukového dřeva je příčinou variability jeho mechanických vlastností (Leclercq, 1977).

Tabulka 4 uvádí průměrné hodnoty pevnosti v ohybu při tangenciálním a radiálním zatížení.

**Tab. 4 Pevnost ohybu bukového dřeva (Kúdela & Čunderlík, 2012)**

Pevnost v ohybu			
	Radiální směr	Tangenciální směr	
$\bar{x}$ [MPa]	126,2	118,3	(Kúdela & Čunderlík, 2012)
$s$ [MPa]	10,8	9,1	
$n$	30	30	
	63-105-180		(Lexa, et al., 1952)
	94		(Perelygin, 1965)
	118	110	(Kúdela, 1990)
	124		(Požgaj, et al., 1993)
	74-123-210		(Wagenführ, 2007)
	104		(Ugolev, 2007)

Pevnostní vlastnosti dřeva rozdělujeme:

- a. podle stavu napjatosti na pevnosti získané při jednoosé a víceosé stavu napjatosti;
- b. podle způsobu zatížení na:
  - pevnost v tahu,
  - pevnost v tlaku, pevnost v ohybu,
  - pevnost v kroucení,
  - pevnost ve smyku;
- c. podle časového zatížení na:
  - statické,
  - dynamické;
- d. podle účinku zatížení na dřevo na:
  - pevnost, kterou jsme získali destrukcí dřeva, jeho porušením,
  - pevnost určenou nedestruktivní, při které nenastane trvalá změna jeho tvaru, chemického složení nebo struktury.

## 1.6.2 Pružnost

Mechanické vlastnosti jsou rozhodující úlohou při konstrukčním využití dřeva a je třeba brát do úvahy především pružnost a pevnost materiálu.

Fyzikální podstatou pružnosti je změna stavu materiálu, která nastává při působení mechanických sil a projevuje se deformací. Po působení mechanických sil se materiál vrací do původního stavu. Je to proces vratný. Pružnost dřeva je kvantifikovaná charakteristikami napětí (mezí úměrnosti, modul pružnosti) a deformačními charakteristikami (pružnou deformací a energií pružné deformace) (Kúdela & Čunderlík, 2012).

Podle (Požgaj, et al., 1993) pružnost dřeva z makroskopického lze pokládat za plně vratný proces, neboť po uvolnění vnějších sil těleso získá původní tvar. Z hlediska submikrostavby dřeva nemusí nastávat vratný proces například na úrovni fibril. Z hlediska termodynamiky se kromě deformací mění i objem dřeva, proto celý proces můžeme pokládat za adiabatický. Celý proces zatěžování uvolňování v pružné části dřeva neprobíhá v jedné rovině, ale vytváří hysterézu. Všechny uvedené jevy naznačují, že dřevo z hlediska submikrostruktury buněčných stěn není dokonale pružné. Proto je i možné dřevo považovat za anelastický materiál.

Z praktického hlediska má pojem pružnost svůj technický význam. Na základě diagramu napětí – deformace budeme pružnost dřeva kvantifikovat prostřednictvím veškerých charakteristik s kterými se setkáváme na lineární části diagramu. Pružnost dřeva lze kvantifikovat těmito charakteristikami (Požgaj, et al., 1993):

Pružnost dřeva je charakterizována:

- Modulem pružnosti ( $E$ ,  $G$ )
- Poissonovými čísly ( $\mu$ )
- Mezí úměrnosti ( $\sigma_u$ )
- Pružnou deformací ( $\epsilon_p$ )
- Energií použité k deformaci

### 1.6.2.1 Modul pružnosti

Modul pružnosti vyjadřuje napětí, při němž se v mezích pružnosti mění pevnostní parametry dřeva, udává se v MPa. Modul pružnosti  $E$  se mění v závislosti na druhu

dřeviny, na vlhkosti, na anizotropii, na vadách dřeva a na objemové hmotnosti. Z průhybového diagramu napětí – deformace vyplývá, že po mez úměrnosti se jedná o lineární vztahy. Modul pružnosti vypočítáme dle vzorce (5).

Určí se ze vztahu:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} (Pa) \quad (5)$$

E – modul pružnosti v (Pa),

$\sigma$  – mez úměrnosti (lineární část pracovního diagramu napětí-deformace)

$\varepsilon$  – normálové namáhání.

Modul pružnosti při různých metodách zatížení je uveden v tabulce 5. Podle tabulky 5 modul pružnosti ve statickém ohybu se výrazně neliší od modulu pružnosti v tahu a tlaku rovnoběžně s vlákny. Podstatný rozdíl při daných způsobech zatížení je však v hodnotách meze úměrnosti (Kúdela & Čunderlík, 2012).

**Tab. 5 Hodnoty modulu pružnosti bukového dřeva při různých způsobech zatížení (Kúdela & Čunderlík, 2012)**

Modul pružnosti v tahu					
Základní statistický charakter	Rovnoběžně s vlákny	Kolmo na vlákna		autor	
		Radiální směr	Tangenciální směr		
$\bar{x}$ [MPa]	17227	-	-	(Kúdela & Čunderlík, 2012)	
s [MPa]	2794				
n	32				
	10000-16000-18000	-	-	(Lexa, et al., 1952)	
	13065	1317	678	(Bodig & Jayne, 1982)	
	16837	2280	1160	(Požgaj, et al., 1993)	
	10000-16000-18000	-	-	(Wagenführ, 2007)	
Modul pružnosti v tahu					
	16750	1588	613	(Požgaj, et al., 1993)	
Modul pružnosti ve smyku					
	R – rovina	T – rovina	R – rovina	T – rovina	
	1013	754	255	(Bodig & Jayne, 1982)	
	1640	1080	470		
				(Požgaj, et al., 1993)	
Modul pružnosti v ohybu					
	Radiální směr		Tangenciální směr		
$\bar{x}$ [MPa]	13660		12990		(Kúdela & Čunderlík, 2012)
s [MPa]	1600		1090		
n	30		30		
	1100-1500-23000				(Lexa, et al., 1952)
	9522				(Bodig & Jayne, 1982)
	13393		12740		(Kúdela, 1990)
	12966				(Požgaj, et al., 1993)

### 1.6.2.2 Modul pružnosti ve statickém ohybu

V ohybu se udává pouze modul pružnosti kolmo na vlákna a zkouší se prakticky jen v tangenciálním směru. Odvození modulu pružnosti v ohybu vychází z normálového namáhání tělesa způsobeného ohybovým momentem. Při zatížení dřevěného nosníku je konkávní strana namáhána na tlak a strana konvexní na tah. Neutrální osa přibližně uprostřed tělesa je nezatížena (Gandelová, et al., 2009).

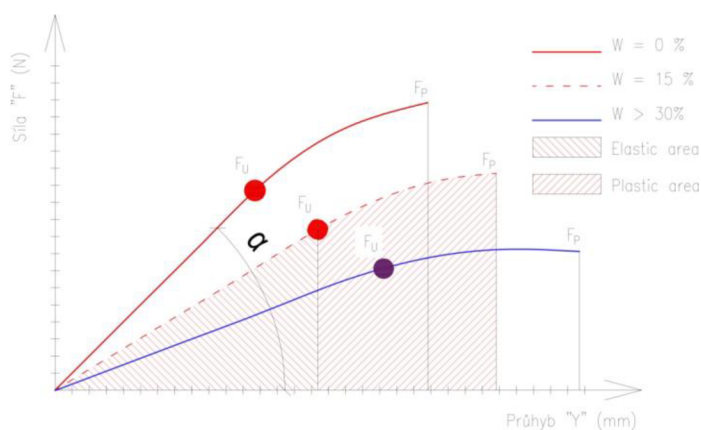
### 1.6.2.3 Mez úměrnosti

Mez úměrnosti představuje hraniční napětí mezi pružnosti a pružně-viskózní oblastí. V případě že napětí překročí mez úměrnosti, lineární úsek diagramu odkloní a přechází do nelineárního průběhu. Tento odklon způsobí nárůst plastických deformací a deformacích pružných v čase (Požgaj, et al., 1993).

Při zkoušce tlaku bukového dřeva rovnoběžně s vlákny při 12 % vlhkosti představuje mez úměrnosti bukového dřeva přibližně 70 % z meze pevnosti. Ve statickém ohybu mez úměrnosti představuje cca 45% meze pevnosti. Nejvyšší podíl meze úměrnosti z meze pevnosti je ve smyku rovnoběžně s vlákny (90 %) (Kúdela & Čunderlík, 2012).

### 1.6.3 Plastické vlastnosti

Plasticita je schopnost materiálu měnit svůj tvar v pevném stavu pod vnějšími silami trvale bez lámání, tj. plasticky deformovat před rozbitím. Stupeň plasticity při mechanickém namáhání je plastická deformace. Fyzická povaha plasticity se liší na základě druhu materiálu (dřevo, kov, makromolekulární termoplasty atd.) i na základě vlhkosti ve dřevě (obrázek 4) (Gaff & Babiak, 2017).



Obr. 4 Silově-průhybový diagram dřeva při ohýbání, W – absolutní vlhkost (Gaff & Babiak, 2017)

### 1.6.3.1 Mez pevnosti

Pokud se napětí zvyšuje nad mez úměrnosti, není už v tělese rozprostřeno rovnoměrně a deformační křivka se zakřivuje. Elastické deformace stále rostou a stávají se plastickými. Pokud přestane působit vnější síla, deformace nezanikají. Napětí, při kterém dojde k porušení dřeva, se nazývá mez pevnosti. Je to nejvyšší hodnota napětí, které dřevo vydrží bez porušení celistvosti (Gandelová, et al., 2009).

Většina výzkumů je zaměřena na elastické vlastnosti materiálu (modul pružnosti, elastické deformace) na mezi úměrnosti, zatímco malá část se zabývá deformací v plastickém rozsahu od meze úměrnosti  $\sigma_u$  k mezi pevnosti  $\sigma_p$ , kde končí elastické deformace a začínají plastické (Gaff & Babiak, 2017).

### 1.6.3.2 Plastický potenciál

Informace o plastickém potenciálu ( $P_p$ ) materiálu je důležitou vlastností materiálu. Popisuje množství energie pohlcené materiálem při jeho přetvoření ohýbáním v plastické oblasti silově-průhybového diagramu. Vynásobením této hodnoty objemem materiálu nad podpěrami je získána informace o práci potřebné pro ohyb tělesa v plastické oblasti silově-průhybového diagramu (obrázek 4) (Gaff & Babiak, 2018).

Šrafovaná oblast na (obrázek 4 Obr. 4) charakterizuje celkovou práci použitou pro deformaci tělesa (Požgaj, et al., 1993). Velikost této oblasti závisí nejen na maximálním zatížení  $F_p$  a průhybu v okamžiku poškození, ale také na tvaru křivky, vlhkosti a hustotě dřeva. Velikost plochy klesá se zvyšující se vlhkostí a snižující se hustotou dřeva (Kyanka, G. H., 1980).

Plastická práce může být vypočítána pomocí regresivní rovnice (6) nebo zjednodušenou variantou pomocí lineární aproximace (7). Na základě těchto přístupů lze vyjádřit chybu aproximace (8) viz vzorec (5)

$$\overline{W}_A = \frac{a}{3}(Y_P^3 - Y_E^3) + \frac{b}{2}(y_P^2 - Y_E^2) + c(y_P - y_E) \quad (6)$$

$$\overline{W}_B = \frac{(F_P + F_E)}{2}(y_P - y_E) \quad (7)$$

$$\Delta W = \frac{\overline{W}_A - \overline{W}_B}{\overline{W}_A} \cdot 100 \quad (8)$$

kde:

$W_A$  – práce (mJ),

$W_B$  – aproximovaná práce (mJ),

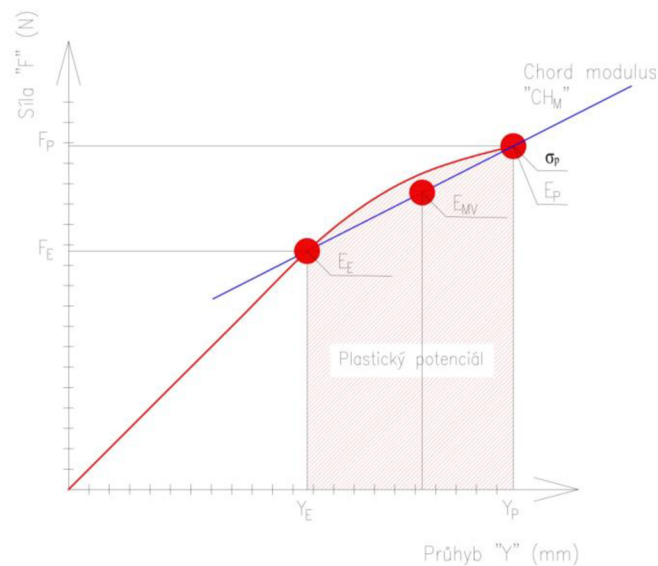
$\Delta W$  – chyba aproximace (%),

$y_E$  – průhyb na mezi úměrnosti (mm),

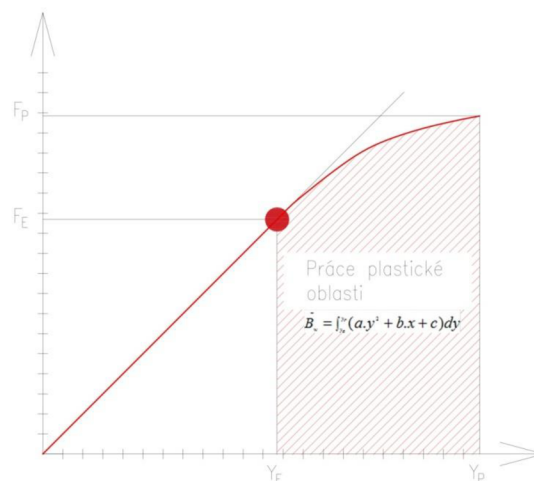
$y_P$  – průhyb na mezi pevnosti (mm),

$F_E$  – síla na mezi úměrnosti (N),

$F_P$  – síla na mezi pevnosti (N).



**Obr. 5 Silově-průhybový diagram – plastické vlastnosti materiálu:  $\sigma_P$  – mez pevnosti; tangent moduly: EE – na mezi úměrnosti, EMV – na střední hodnotě plasticity, EP – na mezi pevnosti; CHM – přímka sečnicového modulu (Gaff & Babiak, 2018)**



**Obr. 6 Silově-průhybový diagram dřeva při ohýbání – celková práce plastické oblasti (Gaff a Babiak, 2017)**

Jednodušší metodou je lineární aproximace s použitím sečnicového modulu mezi mezní hodnotou  $F_E$  a mezní hodnotou  $F_P$ . Aproximovaná plastická práce se vypočte podle rovnice (9).

$$A_W = \frac{F_P + F_E}{2} \cdot (y_P - y_E) \quad (9)$$

kde:

$F_P$  – síla v mezní hodnotě na mezi pevnosti v (N)

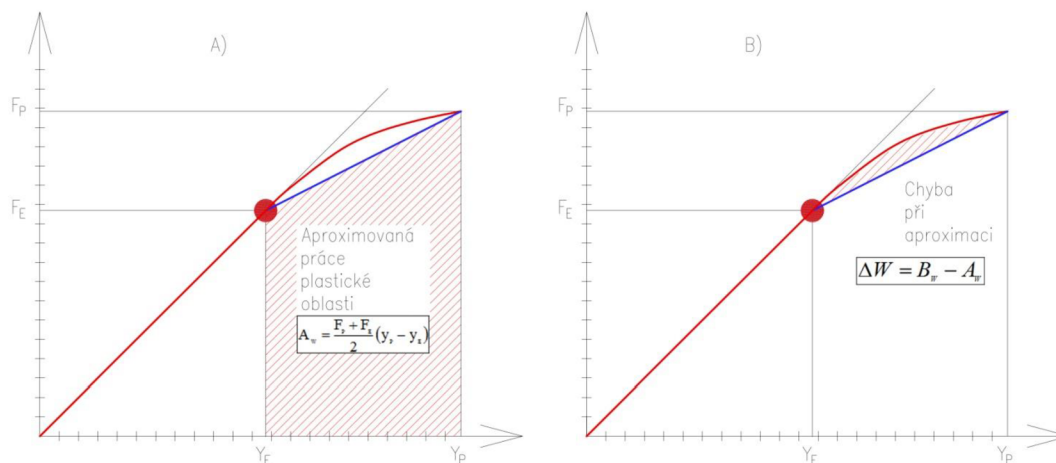
$F_E$  – síla na mezi úměrnosti (N)

$y_P$  – průhyb na mezi pevnosti (mm)

$y_E$  – průhyb na mezi úměrnosti (mm)

Vypočtené hodnoty aproximované práce (obrázek 7a) se liší od skutečných hodnot (obrázek 7a) takzvanou aproximační chybou (obrázek 7b), která může být vyjádřena v procentech podle rovnice (10).

$$\Delta W = \frac{B_W - A_W}{B_W} \cdot 100\% \quad (10)$$



**Obr. 7 Silově-průhybový diagram dřeva při ohýbání: A) přibližná práce plastické oblasti, B) přibližná chyba (Gaff & Babiak, 2017)**

### 1.6.3.3 Sečnicový modul a modul tangenty

Existence modulu v plastickém rozsahu není nic nového. Několik jmen pro modul v plastickém rozsahu lze nalézt v literatuře (Ramberg & Osgod, 1943; Hiroshi & Atsushi, 2002). Podle (Požgaj, et al., 1993) je modul plasticity vztah mezi namáháním a deformací v určitém bodě na křivce mezi mezí úměrnosti a mezí pevnosti. Jiní autoři používají termíny jako např. modul tangenty nebo sečnicový modul, které se obvykle používají častěji k plastické deformaci tuhých materiálů (jako je kov), ale ne vždy pro dřevo.

Modul tangenty je definován jako sklon napětově-deformační křivky při jakémkoli specifikovaném namáhání nebo deformaci. Pod mezí úměrnosti je modul tangenty identický s Youngovým modulem (Gaff, et al., 2017b; Gaff, et al., 2017a; Kamke, 2006; Reginač, et al., 1985). Za mezí úměrnosti se změní modul tangenty v závislosti na namáhání a napětí (Yoshihara, et al., 1998; Schneider, et al., 2005; ASTM E111-04, 2010). Modul tangenty je možné popsat i jako první derivaci křivky popisující vztah mezi napětím a deformací. Při zatížení ohybem měříme vztah mezi silou a průhybem (Požgaj, et al., 1993; Bodig & Jayne, 1982).

Sečnicový modul je poměr síly a průhybu v libovolném bodě na křivce v plastické oblasti silově-průhybového diagramu. Jedná se o sklon čáry mezi počátkem a libovolným bodem na silově-průhybovém diagramu (Yoshihara, et al., 1998; Schneider, et al., 2005; ASTM E111-04, 2010).

Schopnost materiálu vydržet namáhání v plastické oblasti silově-průhybového diagramu může být také popsána na základě chord modulu, který lze získat vnesením



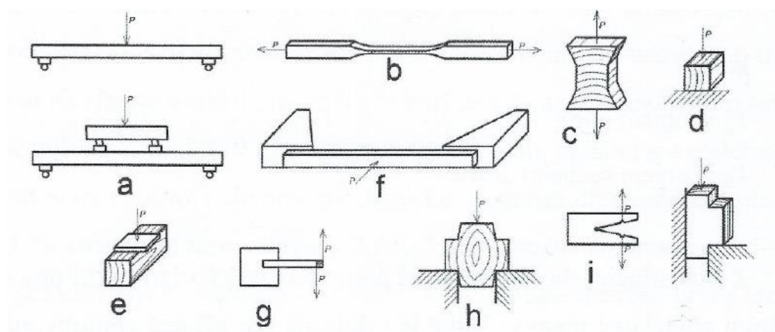
přímky mezi body pro mez úměrnosti ( $F_E$ ,  $Y_E$ ) a mez pevnosti ( $F_P$ ,  $Y_P$ ) na silově – průhybového diagramu (obrázek 5).

## 2 Mechanické namáhání

Mechanickým namáhání se rozumí působení všech vnějších sil na materiál. V důsledku mechanického namáhání vzniká v tělese napětí. Napětí ve dřevě představuje míru vnitřních sil, které se v tělese objevují jako odpověď na působení vnějších mechanických sil (Gandelová, et al., 2009).

Napětí definujeme jako velikost vnitřní síly, která je vztažena na jednotku plochy tělesa. Jestliže síly působí kolmo na průřezovou plochu tělesa, jedná se o normálové napětí. Klasickým příkladem normálových napětí je napětí v tahu a tlaku. Působí-li síly v rovině průřezu, vzniká tangenciální (smykové) napětí. Příkladem tangenciálního napětí je napětí ve smyku. Kombinaci normálového a tangenciálního napětí představuje ohyb a napětí v krutu (Gandelová, et al., 2009).

Základními druhy mechanického namáhání jsou tah, tlak, ohyb, smyk a krut. Tato namáhání zobrazuje Obr. 8, znázorňuje ohyb (a), tah ve směru vláken (b), tah kolmo na vlákna (c), tlak (d), tlak kolmo na vlákna (e), zkouška přerážením (f), krut (g), smyk (h), rozštípnutí (i) (Hájek, et al., 2018).



Obr. 8 Způsoby mechanického namáhání (Hájek, et al., 2018)

Kromě rozdělení na základní druhy mechanického namáhání můžeme stav napjatosti definovat počtem, druhem a průběhem napětí v objemu dřeva a jejich vzájemnými vztahy. Podle počtu působících hlavních napětí může být tento stav napjatosti jednoosý, dvouosý nebo víceosý. S ohledem na zavedené tři roviny pružné symetrie vystačíme u dřeva v nejobecnějším případě s trojosým stavem napjatosti (Gandelová, et al., 2009). Namáhání dřeva v zásadě můžeme rozdělit podle:

- Stav napjatosti – jednoosý a víceosý
- Způsobu zatížení – tlak, tah, ohyb, krut a smyk
- Časového průběhu zatížení – statické a dynamické
- Účinků zatížení na dřevo – destruktivní a nedestruktivní způsob

Při působení již zmíněných druhů napětí ve vztahu k deformovatelnosti tělesa jsou pro pevná tělesa charakteristické dvě základní vlastnosti – pružnost a pevnost. Pružnost dřeva je charakterizována jako schopnost dřeva dosahovat původní rozměry po uvolnění vnějších sil. Pevnost dřeva charakterizuje odolnost dřeva proti trvalému porušení (Gandelová, et al., 2009).

Pokud zatížíme materiál dlouhodobě a nedojde přitom k porušení materiálu, mluvíme pak o trvalé pevnosti dřeva. Mezní napětí označujeme jako mez trvalé pevnosti. Průměrná hodnota meze trvalé pevnosti je 60 – 70 % meze pevnosti, při působení statického krátkodobého zatížení, udává (Hájek, et al., 2018; Matovič, 1993).

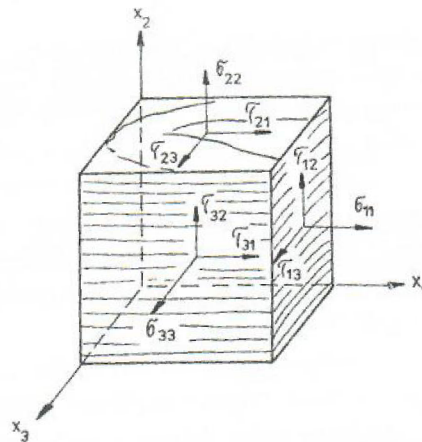
Je dokázáno, že ve dřevě vzniknou nevratné trvalé deformace, kdy kmitavá zatížení mohou měnit svůj směr a svoji velikost. Velké množství cyklických zatížení při nižší síle, má větší vliv než zatížení statické s nižší silou. Toto je stav, který nazýváme, únava materiálu. Mezní stav této únavy pojmenujeme mez únavy. Je to mez, při které nedojde k porušení materiálu ani při nekonečném počtu cyklů (Hájek, et al., 2018).

Při kmitavém namáhání, které je trvalé, klesne mez únavy na 22 – 38 % meze pevnosti statického ohybu. U dřeva, které je vystavené tlaku, probíhají deformace podle Hookova zákona. Hookův zákon popisuje vztah mezi napětím a deformací (Hájek, et al., 2018).

## 2.1 Napětí a deformace

Při formulaci problémů pružnosti a pevnosti je vhodné použít tenzorovou symboliku pro anizotropní tělesa. Každý stav napětí v libovolném tělese může být reprezentován pravoúhlým prvkem jako je krychle tak, že jeho hrany jsou rovnoběžné se zvoleným kartézským souřadnicovým systémem viz. obrázek 9. U anizotropního dřeva je stav tříosého napětí spíše pravidlem než výjimkou. Příkladem takového stavu jsou pnutí způsobená ve dřevě nerovnoměrným bobtnáním a vysycháním s jinou rozměrovou změnou v každém ze tří základních směrů. Při takovém prostorovém stavu napjatosti je

především potřeba vědět, jaká napětí a deformace jsou přítomna a jaký je mezi nimi vztah (Gandelová, et al., 2009).



Obr. 9 Složky napětí na základních plochách dřevěné kostky v kartézském pravoúhlém systému (Požgaj, et al., 1993)

### 2.1.1 Vztah napětí a deformace

Předpokladem, pro vhodný výběr a použití dřeva či materiálů na bázi dřeva pro konstrukční materiály, je porozumění vztahům mezi napětím a deformacemi (Požgaj, et al., 1993). Od roku 1678 je znám Hookeův zákon. Ten lze vyjádřit, že každá složka je přímo úměrná každé složce deformace. Aplikujeme-li Hookeův zákon na dřevo, u kterého jsme stav napjatosti popsali devíti složkami napětí a devíti složkami deformací, můžeme symbolicky zápis vyjádřit tenzorem (11):

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \cdot \varepsilon_{kl} \quad (11)$$

kde:

$C_{ijkl}$  – elastické koeficienty

$\varepsilon_{kl}$  – koeficienty deformace

Uvedené vztahy snižují v nejobecnějším případě počet neznámých koeficientů na 21. Předpokládáme dále, že během normálových napětí nevzniká napětí smyková a že smyková napětí nezpůsobují normálové deformace. Smyková napětí vyvolávají smykové

deformace jen ve stejné rovině, jako působí. Za těchto podmínek můžeme všeobecný Hookeův zákon u dřeva formulovat v maticovém tvaru pomocí rovnice (12).

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_L \\ \varepsilon_R \\ \varepsilon_T \\ \gamma_{RT} \\ \gamma_{LT} \\ \gamma_{LR} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & & & \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & & & \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & & & \\ & & & S_{44} & & \\ & & & & S_{55} & \\ & & & & & S_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_L \\ \sigma_R \\ \sigma_T \\ \tau_{RT} \\ \tau_{LT} \\ \tau_{LR} \end{bmatrix} \quad (12)$$

### 2.1.2 Deformace

Deformace jsou změny, které způsobují změnu tvaru materiálu. Těleso mění tvar v důsledku působení sil. Může dojít k prodloužení, zkrácení, nebo ke změně tvaru, např. kosodélník. Normálovým napětím vzniká prodloužení nebo zkrácení. Při tangenciálním napětí vzniká zkosení a označujeme jej jako smyková, nebo tangenciální deformace (Hájek, et al., 2018). Deformace se dělí na pružné deformace, deformace pružné v čase a plastické deformace (Požgaj, et al., 1993).

### 2.1.3 Napětí

Při zatěžování materiálu silou vzniká napětí. Dřevo do značné míry odolává vnějším silám, např. zatížení, namáhání tlakem nebo ohybem, díky svým mechanickým vlastnostem. Napětí jsou síly v molekulách dřeva, které působí proti vnějším silám. Síly působící na těleso jsou v prostoru orientovány v různých směrech. K vystižení působení vektorových sil na těleso potřebujeme šest vzájemně kolmých rovin. Napětí vypočteme podle rovnice (13) (Gandelová, et al., 2009; Hájek, et al., 2018).

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (13)$$

kde:

$\sigma$  – napětí [MPa]

F – síla [N]

S – plocha [mm<sup>2</sup>]

## 2.2 Tah a tlak

Pro využití dřeva je velmi významná jeho vysoká pevnost v tlaku podél vláken. Tato pevnost je v praxi oceňována především u různých vzpěr, částí nosníků, konstrukcí apod. Závisí především na pevnosti jednotlivých stavebních elementů dřeva při zatížení v tomto směru, ale i na pevnosti jejich vzájemného spojení. V případě tlakové pevnosti kolmo na dřevní vlákna dochází k postupné deformaci. Nedochází k výraznému rozdělení, ale naopak ke zhušťování dřevní struktury v celém objemu. Pevnost dřeva v tlaku napříč vláken, je potom označována jako konvenční. V tomto případě nelze totiž prakticky dosáhnout jasného konečného porušení zkušebního tělesa. Průměrná mez pevnosti v tlaku dřeva podél vláken je okolo 45 MPa. Při působení tlaku ve směni kolmém na dřevní vlákna jsou s ohledem na makroskopickou stavbu letokruhu možné dva průběhy závislosti napětí. U jehličnatých a většiny listnatých kruhovitě pórovitých dřev probíhá deformace při tlaku kolmo na vlákna v tangenciálním směru dvoufázově, při čemž se elementy jarního i letního dřeva se stlačují v obou fázích současně. Při tlaku napříč vláken v radiálním směru je pro všechna naše dřeva s výjimkou dubu charakteristická třífázová deformace. V první fázi deformace dochází ke stlačování jarního dřeva v jednotlivých letokruzích. Na konci této fáze je dosaženo meze úměrnosti. V další fázi začíná stlačování anatomických elementů. Proces probíhá vlivem působení stejného nebo mírně vzrůstajícího napětí a postupně se rozvíjejí plastické deformace. Druhá fáze končí postupnou deformací obou vrstev v rámci letokruhu. Poslední fáze je charakterizována zvýšením zatížení a dalším stlačováním dřeva. Při působení tlaku kolmo na dřevní vlákna nedochází ve většině případů k celkovému porušení zkušebního tělesa (Kollmann, 1951; Požgaj, et al., 1993; Horáček, 2008).

Tahová pevnost se u dřeva rozděluje na pevnost v tahu ve směru dřevních vláken a pevnost v tahu napříč vláken ve směru radiálním nebo ve směru tangenciálním. Pevnost dřeva v tahu ve směru vláken (rovnoběžně s dřevními vlákny) je největší. Průměrná hodnota tahové pevnosti ve směru vláken pro naše dřeva se udává 120 MPa. Pevnost dřeva v tahu podél vláken je dána především vláknitým tvarem buněk a strukturou buněčných stěn. Z makroskopického hlediska je pevnost dřeva v tahu snížena přítomností dřeňových paprsků. Dřevo zatěžované v tahu napříč vláken vykazuje jednu z nejmenších pevností vůbec (Kollmann, 1951; Požgaj, et al., 1993; Horáček, 2008).

Tabulka 6 uvádí průměrné hodnoty pevnosti v ohybu při tangenciálním a radiálním zatížení.

**Tab. 6 Pevnost v tlaku bukového dřeva (Kúdela & Čunderlík, 2012)**

Pevnost v tlaku				
Základní statistické charakteristiky	Rovnoběžně s vlákny	Kolmo na vlákna		Autor
		Radiální směr	Tangenciální směr	
$\bar{x}$ [MPa]	62,7	12,6	7,4	(Kúdela & Čunderlík, 2012)
$s$ [MPa]	4,4	0,7	0,7	
$n$	30	31	32	
	35-53-84	9-10		(Lexa, et al., 1952)
	51,5	7,8	5,2	(Perelygin, 1965)
	60,2	13,3	8,4	(Kúdela, 1990)
	56,7	12,9	8,5	(Požgaj, et al., 1993)
	41-62-99	11,5-14,0	5,0-9,5	(Wagenführ, 2007)
	53	11,4	10,8	(Ugolev, 2007)

## 2.3 Smyk

Dřevo má poměrně nízkou pevnost ve smyku kolmo na vlákna. To má za následek snižování odolnosti dřeva při tlakovém zatížení. Působením vnitřních sil v ohýbaném materiálu vzniká smykové napětí ve vertikálním a horizontálním směru. Při ohýbání materiálu vzniká ke stavu napjatosti, vertikální smykové napětí je důsledkem posouvání vláken vlivem tlakového napětí. Horizontální smykové napětí je důsledkem normálového napětí v průřezu, které posouvá jednotlivé vrstvy materiálu. (Babiak, et al., 2018; Gaff, et al., 2015; Hýsek, et al., 2018).

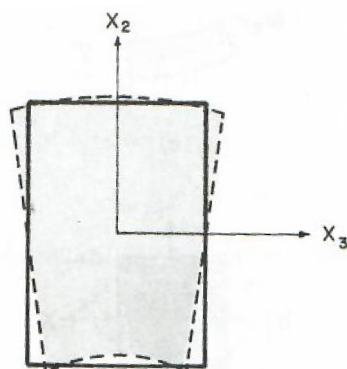
Kolísání ohybového momentu po délce nosníku vede ke smykovému napětím. Protože ohybový moment je zřídka konstantní, jsou smyková napětí přítomna prakticky u každého nosníku. V některých případech mohou být smyková napětí limitující

skutečností v konstrukci. Například u relativně hlubokých dřevěných nosníků dochází k selhání smykového napětí (Bodig & Jayne, 1982).

Při namáhání na smyk působí síly proti sobě, ale jsou posunuty. Deformace tělesa se projevuje posunutím vrstev. Při zatížení ve smyku zohledňujeme kromě tří základních směrů také rovinu porušení. Dostáváme tak šest případů smykového namáhání. Výsledky smykové pevnosti jsou uvedeny v tabulce 7. Nejvyšší pevnosti ve smyku se dosahovaly ve stříhu, při kterém nastává porušení dřeva v příčné rovině (Kúdela & Čunderlík, 2012).

**Tab. 7 Smyková pevnost bukového dřeva (Kúdela & Čunderlík, 2012)**

Pevnost ve smyku							Autor
Základní statistické charakteristiky	Rad. rov.	Tang. rov.	Rad. rov.	Tang. rov.	Rad. směr	Tang. směr	
$\bar{x}$ [MPa]	12,2	15,7	7,8	7,5	40,9	37,2	(Kúdela & Čunderlík, 2012)
$s$ [MPa]	1,2	1,3	1,1	0,9	6,8	3,5	
$n$	33	32	33	30	32	39	
	6,5-8,0-19,0		-	-	-	-	(Lexa, et al., 1952)
	9,9	13,1	-	-	-	-	(Perelygin, 1965)
	11,4	13,9	-	-	-	-	(Kúdela, 1990)
	12,6	15,1	7,7	7,6	52,3	47,1	(Požgaj, et al., 1993)
	6,5-8,0-19,0		-	-	-	-	(Wagenführ, 2007)
	12,1	14,0	-	-	-	-	(Ugolev, 2007)



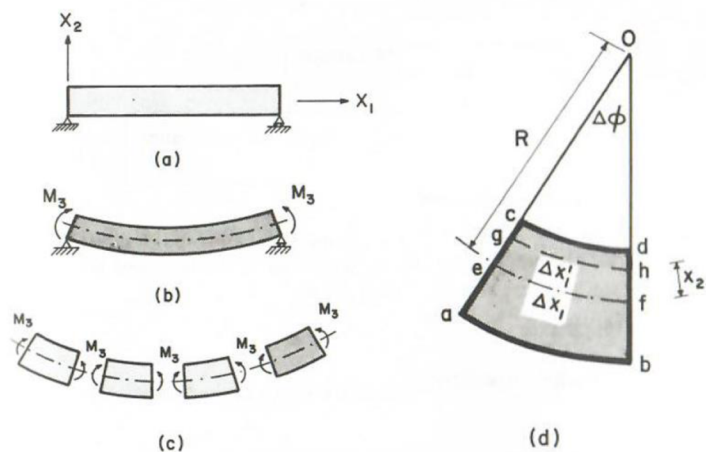
**Obr. 10 Původní a deformovaný průřez nosníku v čistém ohybu (Bodig & Jayne, 1982)**

### 3 Jednoduchý ohyb dřeva

Pevnost dřeva v ohybu je v praxi využívána zejména v oblasti nosníků a trámů. Hlavní uplatnění má pevnost dřeva zatíženého kolmo na dřevní vlákna v radiálním nebo tangenciálním směru. Ostatní případy zatížení jsou méně významné. Při zatěžování dřevěného tělesa ve statickém ohybu vznikají na vnitřní straně ohybu (ze strany působící síly) tlaková napětí a na vnější straně napětí tahová. Díky tomu můžeme na čele hranolu na tahové vnější straně pozorovat zmenšení šířky tělesa a na tlakové straně naopak zvětšení šířky. Místo na průřezu, kde se rozměry nemění je označováno jako neutrální vrstva. Pevnost dřeva v ohybu závisí na poměru vzdálenosti podpěr a tloušťky zatěžovaného tělesa (štíhlost). U malých průřezů se obvykle dosahuje větší ohybové pevnosti než u průřezů velkých. Mez pevnosti v ohybu u našich dřevin dosahuje až 90 MPa (Matovič, 1993; Horáček, 2008).

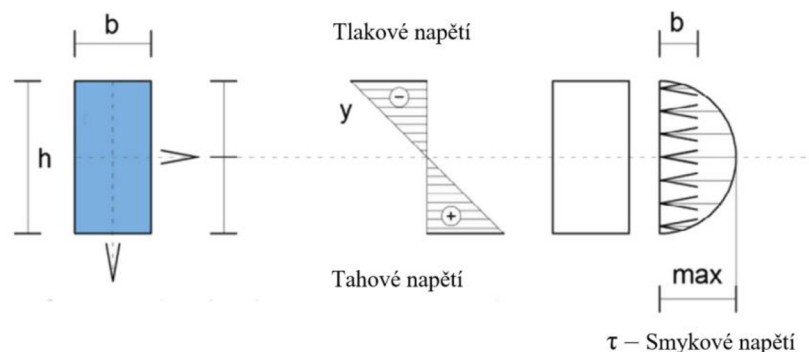
Při namáhání v ohybu vzniká v průřezu těles tahovému a tlakovému napětí, ale také se zde vyskytuje také smykové napětí. Deformace je výsledkem smykového a normálového napětí v průřezu nosníku (Bodig & Jayne, 1982). Je-li dřevo zatěžováno svislými silami, vznikají v průřezu příčné posuvné síly  $F_t$  a ohybový moment  $M$ , viz. obrázek 13. Normálové napětí, které vzniká v průřezu ohýbaného dřeva, je způsobeno právě ohybovým momentem. Změna točivého momentu vede k posuvným silám, které se snaží posunout jednu část dřevěného nosníku k druhé, což má za následek smykové napětí v průřezu. 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 průřez, 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 (14) (Babiak, et al., 2018; Gaff, et al., 2015; Hýsek, et al., 2018). Na základě tohoto tvrzení lze říct, že poměrná deformace v ohybu při tlakovém zatížení přímo závisí od vzdálenosti od neutrální osy a je nepřímo úměrná poloměru zakřivení.





**Obr. 11 Jednoduchý ohyb nosníku: (a) nedeformovaný nosník, (b) deformovaný nosník, (c) schéma volné části profilů nosníku (d) diferenciální průřez (Bodig & Jayne, 1982)**

Podle (Požgaj, et al., 1993; Blomberg, 2006; Chao, et al., 2017) krátké nosníky vystavené ohybu jsou často porušeny ve smyku, převážně nosníky s vyšší výškou. V případě nosníku obdélníkového tvaru v průřezu je rozdělení smykového napětí parabolické podél výšky nosníku (obrázek 12) (Sikora, 2021).



**Obr. 12 Rozložení napětí v průřezu namáhaného prvku (Babiak, et al., 2018)**

kde:

$h$  – výška tělesa (mm)

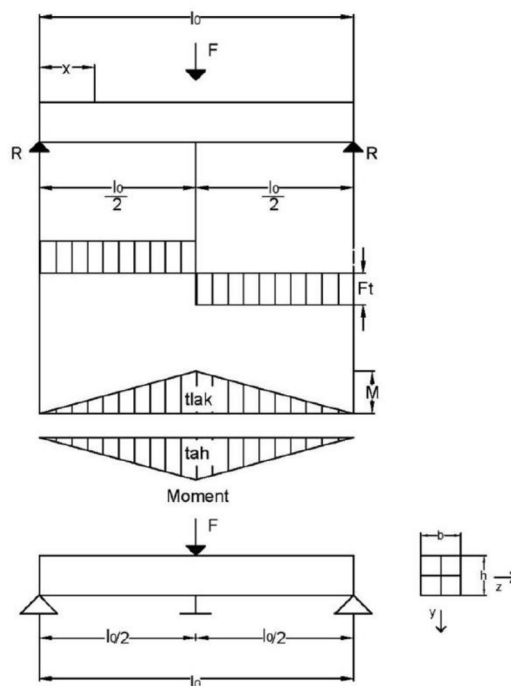
$b$  – šířka tělesa (mm)

$y(-)$  –  $\sigma$  tlakové napětí (MPa)

$y(+)$  –  $\sigma$  tahové napětí (MPa)

$\tau$  – smykové napětí (MPa)

Je-li nosník zatížen příčnými silami, pak se v průřezu nosníku tvoří posuvné síly „ $F_t$ “ a ohybový moment „ $M$ “ Obr. 13. Ohybový moment způsobuje normálové napětí v průřezu. Změna krouticího momentu vede k posuvným silám, které se snaží posunout jednu část nosníku směrem k druhé, což má za následek smykové napětí v průřezu. Při ohybu navíc vzniká smykové napětí, které se snaží posouvat jednotlivé vrstvy vláken za sebou ve směru rozpětí podpory (Babiak, et al., 2018).



Obr. 13 Posuvné síly vzniklé tří bodovým ohybem (Babiak, et al., 2018)

kde:

$F$  – působící síla (tlak) (MPa)

$l_0$  – délka tělesa (mm)

$b$  – šířka (mm)

$x$  – vzdálenost podpěr od konce tělesa (mm)

$M$  – ohybový moment (mm)

$F_t$  – posuvné síly (N)

Velikost příčných sil lze vyjádřit pomocí rovnice (14)

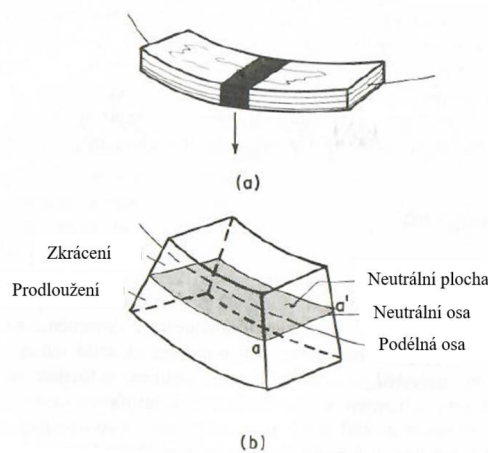
$$F_t = \frac{dM}{dx} \quad (14)$$

kde:

$F_t$  – příčná posuvná síla, příčná smyková síla

$dM$  – změna ohybového momentu

$dx$  – změna ohybového momentu  $x$ .



**Obr. 14 Schéma ohybu jednovrstvého tělesa: a) deformovaný tvar, b) průřez deformovaného nosníku (Bodig & Jayne, 1982)**

Na základě schématu jednoduchého ohybu na obrázku 11, je možné matematicky vyjádřit deformace a napětí podle rovnice 15-17

$$\varepsilon = \frac{l' - l_0}{l_0} = \frac{\pi \cdot (R + x) - \pi \cdot R}{\pi \cdot R} \quad (15)$$

$$\varepsilon = \frac{x}{R} \quad (16)$$

$$\sigma = \frac{E \cdot x_2}{R} \quad (17)$$

kde:

$R$  – vyjadřuje poloměr ohybu vzhledem k neutrální ose (mm)

$E$  – vyjadřuje celkový modul pružnosti tělesa (MPa)

$dx$  – změna ohybového momentu  $x$ .

### 3.1 Faktory ovlivňující ohyb

Vlastnosti dřeva jsou podstatně ovlivňovány řadou faktorů, kterými jsou druh dřeviny, struktura dřeva, jeho chemické složení, vlhkost a technologie přípravy k ohýbání (Křupalová, 2002). Druh dřeviny je promítnut do makroskopické stavby, kde největší roli hraje anatomický směr, odklon vláken, přítomnost jádra a běle, reakční dřevo apod., dále jsou vlastnosti ovlivněny na mikroskopické úrovni, kde je důležitá např. tloušťka buněčné stěny a v poslední řadě jsou vlastnosti ovlivněny také na submikroskopické úrovni, kde má vliv fibrilární struktura a orientace, lignifikace buněčné stěny a další (Horáček, 2008).

Na základě již zmíněných skutečností lze tvrdit, že jeden výřez ze stejného stromu není totožný, jak ten druhý. Z toho vyplývá, že vlastnostem dřeva nelze přiřadit jednoznačnou hodnotu z průměrných hodnot uvedených v tabulkách pro daný druh. S dostatečnou znalostí vnitřních faktorů ovlivňujících výsledky je možné ze vzhladu materiálu odvodit jeho pravděpodobnou odchylku od průměru (Samuel, 1914).

Tab. 8 Vliv vybraných anatomických parametrů na vlastnosti dřeva (Horáček, 2008)

Anatomický parametr	Hustota dřeva ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	Pevnost dřeva (MPa)
Anatomický směr	1 <sup>*)</sup>	2
Odklon vláken	1	3
Jádro/ běl	2	2
Šířka letokruhů	2	2
Reakční dřevo	2	2
Délka vláken	1	2
Odklon mikrofibril v $S_2$ vrstvě	1	2

\*) relativní vliv: 1 – malý, 2 – velký, 3 – zásadní

#### 3.1.1 Vliv struktury dřeva

Dřevo vhodné na ohyb musí mít rovná vlákna, bez suků, trhlin a jiných vad, které snižují jeho pevnost (Křupalová, 2002). Ohýbatelnost zlepšují dlouhá vlákna s minimálním odklonem od podélné osy (Gandelová & Šlezingerová, 2014). Vhodnější je dřevo, které pochází ze zimní těžby a také lepší dřevo ze spodní části kmene než z horní díky tomu, že dřevo ve spodní části je kvalitnější a obsahuje méně suků. Zatím co nevhodně ovlivňuje nepravé jádro, které. Dílce určené k ohýbání mohou obsahovat tyto vady:

**Odklon vláken** – v podélném směru je tolerován odklon vláken pouze do 1/4 délky dílce, a to do 10° pro mírné ohyby. Pro náročnější ohyby je tato hodnota 5°.

**Odklon dřevných paprsků** – dovolený odklon od roviny ohybu je maximálně 30°. Pokud je tato hodnota větší, dochází při ohýbání ke vzniku trhlin kolem dřevných paprsků.

**Trhlínky** – dovolené jsou vlasové trhlíny (do 0,5mm)

**Ostatní vady** – zde se jedná zejména o suky, které jsou povoleny pouze v místech, která nebudou přímo v ohybu, nebo při opracování odpadnou (Křupalová, 2002).

Odklon vláken je velmi častou vadou dřeva. K tomu převážně dochází tam, kde se kmen značně zužuje. Řezivo s diagonální strukturou má vždy horší mechanické vlastnosti než materiál s rovnými vlákny, rozsah defektu se mění se stupněm úhlu, který vlákna svírají s osou nosníku. V blízkosti velkých suků bude vlákno pravděpodobně křížové. Vada je nejzávažnější tam, kde je dřevo vystaveno ohybu, jako u trámů (Samuel, 1914).

Spirálovitý odklon vláken je velmi běžnou vadou stromu, a když je příliš velké, dřevo se stává bezcenným pro použití s výjimkou kulatiny. Tvoří se uspořádáním dřevěných vláken ve spirálovitém směru kolem osy namísto přesně vertikálního. Tato točivost snižuje mechanické vlastnosti dřeva (Samuel, 1914).

Vlivem struktury dřeva na mechanické vlastnosti dřeva je v průběhu posledních let významně zkoumán. Výsledky testů ukazují, že mechanické vlastnosti dřeva jsou ovlivněny i chemickým složením dřeva a vlastností buněčné stěny. Podle (Bergander & Salmén, 2002) má celulóza významný vliv na mechanické vlastnosti v podélném směru, zatím co příčný směr ovlivňuje spíše hemicelulóza. Dále se ukázalo, že značný vliv pro příčné vlastnosti má tloušťka a úhel fibril buněčné vrstvy S1 a S3. Dřevo je materiál s hierarchickou buněčnou strukturou se specifickou pevností a specifickým modulem pružnosti. Každá buňka dřeva se obvykle skládá z celulózových makromolekul, respektive fibril, které se točí kolem směru makroskopického vlákna (Sikora, 2021).

(Reiterer, et al., 1998), popisují tento vztah pro tenké (200 μm) části dřeva, což poskytuje silný důkaz pro skutečnost, že úhel mikrofibril optimalizuje roztažitelnost dřeva. V kombinaci tahových zkoušek se strukturálními zkouškami pomocí malého úhlu rentgenového rozptylu bylo zjištěno výrazné zvýšení maximálního napětí se zvyšujícím se úhlem mikrofibril a také změnu elastických modulů.

### 3.1.1.1 Druh dřeva

Na ohyb lze použít všechny druhy dřevin, listnaté jsou ale pro ohyb vhodnější. Jehličnaté dřeviny se ohýbají hůře zejména díky velkému rozdílu mezi jarním a letním dřevem, kdy jarní dřevo je více stlačováno než letní. Díky tomu se vrstvy jarního a letního dřeva mají snahu se po sobě posouvat a následkem nerovnoměrného stlačování dřevo při větším ohybu praská (Křupalová, 2002). Z listnatých dřevin je na ohýbání nejvíce vhodný buk, dub a jasan (Gandelová & Šlezingerová, 2014).

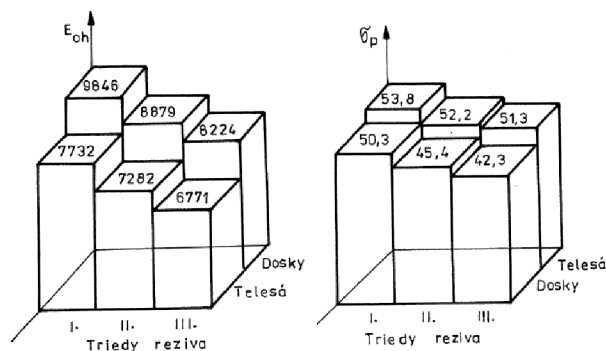
### 3.1.1.2 Hustota a hmotnost

Za stejných podmínek měření pevnosti v tlaku rovnoběžná s vlákny, napětí vlákna na hranici pružnosti v ohybu a pevnost ve smyku podél vlákna dřeva platí přímá úměra hmotnosti suchého dřeva na jednotku objemu v čerstvém stavu. Jiné hodnoty pevnosti se řídí jinými zákony. Modul lomu v ohybu leží mezi první mocninou a druhou mocninou hustoty. To samozřejmě platí pouze v případě, že větší hmotnost je způsobena zvýšením množství dřevní hmoty. Pokud jsou rozdíly v hmotnosti způsobeny relativním množstvím obsažené vody, výše uvedená pravidla samozřejmě nebudou platit, protože pevnost roste se suchostí (Samuel, 1914).

Vlivem hustoty v závislosti na rychlosti růstu dřevin se zabýval (Zhang, 1995). Výzkum ukázal, že u jehličnatých dřevin se významně snížili mechanické vlastnosti vlivem nižší hustoty materiálu. Na rozdíl u listnatých dřevin fyzikálně-mechanické vlastnosti pozoruhodně méně ovlivněny. Rychlost růstu dřevin nejméně ovlivňuje listnaté dřeviny s roztroušeně pórovitou strukturou, jak hustotu, tak i mechanické vlastnosti. Naopak listnaté dřeviny s kruhovitě pórovitou strukturou mají tendenci zvyšovat hustotu i mechanické vlastnosti vlivem rychlosti přírůstku (Samuel, 1914).

## 3.1.2 Geometrie

(Požgaj, et al., 1993) porovnával modul pružnosti a pevnost v ohybu smrkového dřeva mezi normalizovanými tělesy a velkorozměrovými tělesy (řezivem). Grafické porovnání můžeme vidět na obrázku 15. Hodnoty v rámci rozdělení do kvalitativních tříd dřevní suroviny jsou v tabulce 9.



Obr. 24.24 Priemerné hodnoty modulov pružnosti  $E$  a pevnosti v ohybe  $\sigma_{oh}$  řeziva a normalizovaných těles.

Obr. 15 Vliv geometrie na modul pružnosti a pevnost ohybu (Požgaj, et al., 1993)

Tab. 9 Vliv geometrie na modul pružnosti a pevnost ohybu (Požgaj, et al., 1993)

Třídy řeziva			
Vlastnosti	I.	II.	III.
Modul pružnosti	1,27	1,22	1,21
Pevnost	0,94	0,87	0,82

Je evidentní, že mezi normalizovanými tělesy a deskami jsou významné rozdíly. Větší hodnoty modulů pružnosti jsou u desek, zatímco větší pevnost u normalizovaných těles. Tyto rozdíly platí v rámci sledovaných tří kvalitativních tříd řeziva. Vyloučíme-li faktor vlhkosti, můžeme zjištěné rozdíly přisoudit tloušťce. Změna tloušťky z 15 na 44 mm způsobí zvětšení modulu pružnosti průměrně o 20,5 %, zatímco ohybové pevnosti jen 92,2 %. Vliv tloušťky je ve zkoumaných třídách řeziva stejný. Z experimentů vyplývá, že změna tloušťky se významně projeví především na změně modulů pružnosti. Dalším faktorem může být také hustota dřeva (Požgaj, et al., 1993).

Nezanedbatelný vliv na posuzování vlastnosti malých a velkých těles mají vady dřeva a jeho struktura. Vidíme, že moduly pružnosti jsou vyšší u velkorozměrových těles, ale pevnost zase u malých těles. V makrostruktuře a mikrostruktuře dřeva se vlivem vad dřeva nad mezí úměrnosti pravděpodobně významněji rozvíjejí plastické deformace. Nemůžeme jednoznačně konstatovat, že pružností a pevnostní vlastnosti v ohybu velkých těles jsou nižší než u normalizovaných těles. Vady dřeva, případně změny ve struktuře mají významnější vliv až při zatíženích nad mez úměrnosti (Požgaj, et al., 1993).

### 3.1.3 Jarní letní dřevo

Za běžných podmínek jedna vrstva vzniká každý rok a v příčném řezu. Na konci kulatiny se jeví jako prstence – často se o nich mluví jako o letokruzích. Tyto růstové vrstvy jsou tvořeny dřevěnými buňkami různého druhu, ale z větší části vláknitými (Samuel, 1914).

Pokud se podíváte na hladce řezaný konec kmene téměř jakéhokoli druhu dřeva, všimnete si, že každý růstový prsteneček se skládá ze dvou více či méně podobných částí. Vnitřní část se vytvořila brzy v sezóně, kdy byl růst poměrně rychlý a je známá jako rané dřevo (také jarní dřevo); vnější část je pozdní dřevo, které se vyrábí v létě nebo na začátku podzimu (Samuel, 1914).

Porovnáme-li například těžký kus borovice se světlým exemplářem, okamžitě zjistíme, že těžší kus obsahuje větší podíl pozdního dřeva než ten druhý, a proto je podstatně tmavší. Pozdní dřevo všech druhů je hustší než dřevo vytvořené na začátku sezóny, takže čím větší je podíl pozdního dřeva, tím větší je hustota a pevnost. Při zkoumání pod mikroskopem jsou buňky pozdního dřeva vidět jako velmi tlustostěnné a s velmi malými dutinami, zatímco buňky vytvořené jako první v sezóně mají tenké stěny a velké dutiny. Síla je ve stěnách, ne v dutinách (Samuel, 1914).

### 3.1.4 Vlhkost

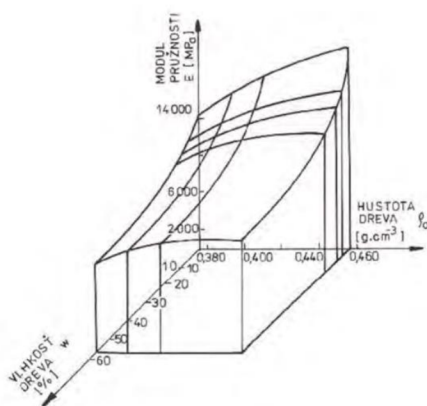
Při posuzování změn vlastností dřeva platí, že se stoupající vlhkostí do meze hygroskopicity se pružností a pevnostní vlastnosti dřeva snižují a vlhkost nad mezí hygroskopicity (voda volná) mechanické vlastnosti dřeva neovlivňuje (Horáček, 2009). Vliv vody vázané sledujeme hlavně při užití dřeva na konstrukční účely a technologického zpracování dřeva. Dřevěné konstrukce bývají během své životnosti často vystaveny různým povětrnostním podmínkám a rovnovážná vlhkost se pohybuje v rozsahu 9 až 22 %. Při změně vlhkosti o 1 % v rozsahu vody vázané se pevnost dřeva změní průměrně o 3 – 4 % (Horáček, 1998).



Podle, část (ČSN EN 1995-1-1, 1995) Eurokódu 5 (EC5) existují tři kategorie popisující vztah hustoty, pružnosti a vlhkosti ve dřevě.

- Vlhkost menší jak 12 %
- Vlhkost mezi 12 % až 20 %
- Vlhkost nad 20 %

Vyššího modulu pružnosti dosáhneme snížením vlhkosti ve dřevě. Závislost modulu pružnosti na vlhkosti a hustotě je možné vidět na obrázku 16,



Obr. 16 Model závislosti modulu pružnosti na hustotě a vlhkosti (Požgaj, et al., 1993)

## 4 Metodika

Metodika této diplomové práce se zabývá zabývat ohybovou zkouškou bukového dřeva. Pro porovnání účinku tloušťky a vzdálenosti podpěr na sledované charakteristiky jsou pro test zvoleny bukové vzorky různých formátů.

Rozdělení metodiky do jednotlivých bodů:

1. Příprava zkušebních vzorků
2. Klimatizace vzorků
3. Mechanické testování
4. Sušení vzorků
5. Výpočet sledovaných charakteristik
6. Vyhodnocení

### 4.1 Zkušební tělesa

Pro výrobu vzorků bylo pořízeno bukové truhlářské řezivo, ze kterého byly vytvořeny soubory zkušebních těles pro ohybovou zkoušku. Každý soubor se skládal ze 30 kusů zkušebních vzorků. Pro úspěšnost testování bylo řezivo vybíráno na základě kvality.

#### 4.1.1 Buk lesní

Buk lesní latinsky (*Fagus sylvatica*) je krytosemenná opadavá rostlina z čeledi bukovité (Fagaceae). Roste v celé Evropě a pokrývá přibližně plochu o 50 milionů hektarů, od oblastí Skandinávie až k Jižní Evropě a od Ukrajiny ke Španělsku. Podle zprávy o stavu lesa a lesního hospodářství České republiky v roce 2019 buk zaujímal 8,8% plochy z celkové porostní plochy. Prospívá mu vápnitá půda v nadmořských výškách 300 – 1 000 m n. m. V našich podnebných podmínkách se mu daří nejlépe v nadmořských výškách 500—800 m nad mořem (Hejný & Slavík, 2003). Buk dorůstá výšky 30 – 40 metrů a průměr kmene se při této výšce pohybuje okolo 1,5 m).

Buk díky svým pozitivním vlastnostem patří mezi nejvíce využívanou dřevinu při výrobě ohýbaného nábytku. Také je využíván na výrobu lamel a loupaných dýh. Barva

dřeva je bílá až lehce narůžovělá, patrný je barevný rozdíl dřeva a běli, která má vyšší vlhkost. Vysušením se tyto barevné odlišnosti sjednotí na světle hnědou až narůžovělou barvu. Kůra je na povrchu hladká, barva je šedá až bělošedá (Hejný & Slavík, 2003; Fellner, et al., 2007)

Správná doba těžby bukového dřeva je v zimních měsících. Hlavními výhodami těžby dřeva v zimních měsících jsou ztuhlá míza, menší praskání čel kulatiny a menší riziko napadení dřeva biologickými škůdci – hniloba, zapaření atd. (Pánek & Reinprecht, 2016).

**Tab. 10 Mechanické a fyzikální vlastnosti buku (Wagenführ, 1974; Sarvaš, et al., 2010)**

Vlastnosti	Rovnoměrné 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]	1600	-
Houževnatost [J/cm <sup>2</sup> ]	-	8,04
Tvrdost podle Brinella [Mpa]	72	34
Sesychání [%]	0,3	5,8

#### 4.1.2 Výběr suroviny

Výběr suroviny je jednou z nejdůležitějších částí výrobního procesu. Kvalita zhotoveného výrobku je ovlivněna vstupní surovinou. Dřevo je nehomogenní materiál a může obsahovat vady či odchylky od pravidelné stavby. Vady lze rozdělit na přirozené vady a technologické vady. Mezi přirozené vady patří suky, růstové trhliny, nepravé jádro, svalovitost, závitky vláken, hniloba, plíseň, reakční dřevo. Strukturální odchylky mohou ovlivnit vlastnosti dřeva a proto se jim snažíme vyhnout vhodným výřezem nebo tříděním.

#### 4.1.3 Zpracování suroviny

Pomocí stolové kotoučové pily SCM Class 300 byly z bukového řeziva nařezány dílce o šířce 23 mm včetně nadmíry. Řezivo bylo řezáno v radiálním směru kolmo na vlákna. Následně byly dílce srovnány na srovnávací frézce ze dvou na sebe kolmých ploch pro zajištění rovnosti vzorku. Srovnané dílce byly upraveny na finální šířku a tloušťku na tloušťkovací frézce. Dílce v požadované tloušťce a šířce byly kvalitativně tříděny. V případě nálezu vad, jako jsou například suky nebo trhlínky byly na kotoučové

pile odstraněny a následně veškeré dílce bez vad byli naformátováni na požadovanou délku. Výstupní rozměry testovacích sad jsou uvedeny v tabulce 11.

**Tab. 11** Rozměry zkušebních těles (vlastní zdroj)

Tloušťka (mm)	Šířka (mm)	Délka (mm)
15	20	230
20	20	280
25	20	330
45	20	530
50	20	580
55	20	630
60	20	680
80	20	880
85	20	930
90	20	980

#### 4.1.4 Značení těles

Pro identifikaci vzorků měl každý svůj identický kód, který obsahoval tloušťku vzorku, délku vzorku a své vlastní označení od čísla 1-30. Vybraná testovaná tělesa byly v rozmezí BK-15-150 až BK-90-900. Kde BK znamená druh dřeviny buk. Značení můžete vidět na obrázku 17.



**Obr. 17** Značení zkušebních těles (vlastní zdroj)

#### 4.1.5 Klimatizace

Před samotnou zkouškou byly vzorky umístěny v klimatizační komoře. Komora byla nastavená na 20 °C a relativní vlhkost 65 %, po takovou dobu dokud se vlhkost

vzorků neustálila na rovnovážnou vlhkost 12 %. Před zkouškou byly vzorky zváženy a hodnoty zaznamenány pro výpočet přesné vlhkosti při testu. Z toho důvodu po zkoušce byly vzorky vysušeny na možnou nulovou vlhkost. Klimatizační zařízení lze vidět na obrázku 18.



Obr. 18 Klimatizační zařízení (vlastní zdroj)

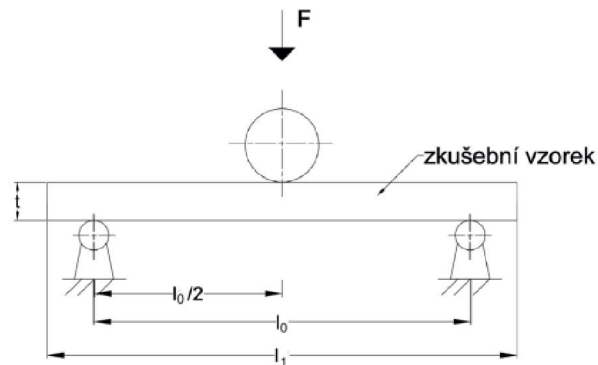
#### 4.1.6 Mechanické testování

Zkušební vzorky se testovali třibodovou ohybovou zkouškou. Hlavními pozorovanými charakteristikami byly pevnost v ohybu „MOR“, modul plasticity „E“, plastická práce „W<sub>A</sub>“, aproximovaná práce „W<sub>B</sub>“, sečnicový modul „CH<sub>M</sub>“, tangentský modul na mezi pevnosti „E<sub>P</sub>“, tangentský modul středový „E<sub>MW</sub>“, tangentský modul na mezi úměrnosti „E<sub>E</sub>“, síla na mez pevnosti „F<sub>P</sub>“, síla na mez úměrnosti „F<sub>E</sub>“, průhyb na mez pevnosti „Y<sub>P</sub>“, průhyb na mez úměrnosti „Y<sub>E</sub>“.

Měření ohybových charakteristik probíhalo na zařízení UTS Tira, třibodovým ohybem. Zkušební těleso bylo umístěno na 2 podpěry v radiálním směru vláken. Veškeré hodnoty byly zaznamenávány do software Tira.

Před startem každé nové sady vzorků bylo nezbytné upravit vzdálenost podpěr, aby vzdálenost splňovala předpisy normy EN 310. Vzdálenost odpovídá 10-ti násobku tloušťky zkušebního tělesa. Zkušební těleso bylo nutné umístit přesně, aby střed tělesa byl mezi podpěrami. Válcová zatěžovací hlava musí být umístěna rovnoběžně s podpěrami a ve stejné vzdálenosti mezi nimi. Po umístění tělesa na podpěry se nastavila válcová hlava těsně nad testované těleso a zkouška spustila. Měření dat začíná zatížením vzorku, které působí přímo v jeho středu. Rychlost zatěžování při ohybové zkoušce je konstantní. Rychlost byla upravována u každého sady vzorků, tak aby se maximální čas zatížení odpovídal od 30 s do 90 s normy (EN 310, 1993).

Delší zkušební sady s vyšší délkou vyžadovaly nastavení podpěr dál od sebe, tím se dosahováno většího průhybu a bylo nutné zvýšit rychlost testu abychom splnili normou daný čas zkoušky. Zkoušky probíhaly v laboratoři, při teplotě 22 °C a vlhkosti vzduchu 65 %. Při ohybové zkoušce jsou vzorky zatěžovány až do té doby, dokud nedojde k poklesu síly o 10 % (EN 310, 1993).



**Obr. 19** Schéma zkušebního zařízení (EN 310, 1993)

kde:

$F$  – působící síla (tlak) (MPa)

$t$  – tloušťka zkušebního tělesa (mm)

$l_1 = 10 \cdot t$

$l_2 = 10 \cdot t + 40$  (mm)

Při zkoušce je na zkušební těleso vyvíjena síla  $F_{max}$ , která je potřebná k porušení tělesa. Na základě hodnot naměřených při porušení tělesa jsme schopni zjistit modul pružnosti v ohybu a mez pevnosti ohybu. Hraniční body se získají ze silově-deformačního diagramu pomocí software MATESS, hlavní body se stanovili pomocí hranice mezi lineární a nelineární částí diagramu, tedy od meze úměrnosti. Získaný průhybový diagram byl vyhodnocen pomocí software MATESS. Tento software nám umožňuje velmi přesné identifikace hraničních bodů silově průhybového diagramu, čímž dokážeme velmi přesně identifikovat jednotlivé charakteristiky ohybu.

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, 1993). Dále se sleduje maximální průhyb tělesa, kterého se dosáhlo ve středu zkušební tělesa.



Obr. 20 Ohybová zkouška (vlastní zdroj)

## 4.2 Výpočet sledovaných charakteristik

Výpočet ohybových charakteristik byl vyhodnocován softwarem MATESS. Tímto softwarem můžeme velmi přesně stanovit hraniční body silově průhybového diagramu. Program pracuje v pěti bodech a to:

- Vyčištění datových sad s interpolací chybějících hodnot
- Vyhlažování pracovního diagramu
- Detekce meze pevnosti
- Detekce meze úměrnosti
- Kvantifikace charakteristik pracovního diagramu

Hodnoty pro výpočet meze pevnosti v ohybu „MOR“ v tříbodovém ohybu byly dosazeny do vzorce (18), na základě (ISO 13061-2, 2014).

$$MOR_w = \frac{3F_{MAX} \cdot l_0}{2bh^2} \quad (18)$$

kde:

MOR – mez pevnosti v ohybu (MPa),

F – maximální hodnota zatížení (N),

$l_0$  – vzdálenost středů podpěr (mm),

b – šířka zkušebního tělesa (šířka radiální plochy) (mm),

h – výška zkušebního tělesa (šířka tangenciální plochy) (mm)

Dle normy (EN 310, 1993) byl pro výpočet ohybového modulu pružnosti, vyjadřující odolnost proti pružné deformaci vzorec (19).

$$E = \frac{l_0^3(F_2 - F_1)}{4bh^3(y_2 - y_1)} \quad (19)$$

kde:

E – modul pružnosti (MPa),

$l_0$  – rozpětí spodního suportu testovacího zařízení (mm),

b – šířka (mm),

h – tloušťka (mm),

$F_2 - F_1$  je přírůstek zatížení v lineární části pracovního diagramu ( $F_1$  je 10 % a  $F_2$  je 40 % z maximálního zatížení (N),

$y_2 - y_1$  je přírůstek průhybu (mm) pod zatěžující silou (odpovídající  $F_2 - F_1$ )

Výpočet tangetových a sečnicového modulu byly vypočteny podle vzorce (20, (21, (22, (23) (Sikora, et al., 2018).

$$E_E = \frac{F_E}{Y_E} \cdot \frac{l_0^3}{48l} \quad (20)$$

$$E_{MW} = \frac{F_{MV}}{Y_{MV}} \cdot \frac{l_0^3}{48l} \quad (21)$$



$$E_P = \frac{F_P}{Y_P} \cdot \frac{l_0^3}{48l} \quad (22)$$

$$CH_M = \frac{F_P - F_E}{Y_P - Y_E} \cdot \frac{l_0^3}{4bh^3} \quad (23)$$

kde:

$F_P$  – síla na elastickém limitu (N),

$F_E$  – síla na mezi úměrnosti (N),

$y_P$  – průhyb na elastickém limitu (mm),

$y_E$  – průhyb na mezi pevnosti (mm),

$y_{MV}$  – průhyb vyjádřený jako průměr mezi  $y_E$  a  $y_P$  (mm),

$l_0$  – rozpětí spodního suportu testovacího zařízení (mm),

$b$  (šířka) a  $h$  (tloušťka) – průřezové rozměry testovaného zkušebního tělesa (mm).

Výpočet plastického a elastického potenciálu byl vypočítán podle vzorce (24)(25) (Gaff, et al., 2017a; Gaff, et al., 2017b).

$$P_E = \frac{3Fy_E}{2bhl_0} \quad (24)$$

$$P_P = \frac{\overline{W_A}}{bhl_0} \quad (25)$$

kde:

$P_E$  – elastický potenciál (MPa),

$P_P$  – plastický potenciál (MPa),

$F$  – síla (N),

$y_E$  – průhyb na mezi úměrnosti,

$W_A$  – práce ve vizko-plastické oblasti (mJ),

$l_0$  – rozpětí spodního suportu testovacího zařízení (mm),

$b$  (šířka) a  $h$  (tloušťka) – průřezové rozměry testovaného zkušebního tělesa (mm).

Plastická práce může být vypočítána pomocí regresní rovnice (26) nebo zjednodušenou variantou pomocí lineární aproximace (27). Na základě těchto přístupů lze vyjádřit chybu aproximace (28), viz vzorec (25):

$$\overline{W}_A = \frac{a}{3}(Y_P^3 - Y_E^3) + \frac{b}{2}(y_P^2 - Y_E^2) + c(y_P - y_E) \quad (26)$$

$$\overline{W}_B = \frac{(F_P + F_E)}{2}(y_P - y_E) \quad (27)$$

$$\Delta W = \frac{\overline{W}_A - \overline{W}_B}{\overline{W}_A} \cdot 100 \quad (28)$$

kde:

$W_A$  – práce (mJ),

$W_B$  – aproximovaná práce (mJ),

$\Delta W$  – chyba aproximace (%),

$y_E$  – průhyb na mezi úměrnosti (mm),

$y_P$  – průhyb na mezi pevnosti (mm),

$F_E$  – síla na mezi úměrnosti (N),

$F_P$  – síla na mezi pevnosti (N).

## 5 Vyhodnocení a výsledky

Naměřené hodnoty sledovaných charakteristik byly statisticky vyhodnoceny v programu Statistica 13. Pro vyhodnocení byla použita jednosměrná analýza rozptylu. Jednosměrná analýza odchylky je test hypotéz, při kterém se zvažuje pouze jedna kategorická proměnná nebo jediný faktor. Slouží k nalezení rozdílu mezi jeho různými kategoriemi s několika možnými hodnotami. Dále jsme ke zhodnocení použili Duncanův test s mírou významnosti 0,05, ten nám říká, jak je sledovaný faktor statisticky významný. Hladina významnosti „P“ určuje uspořádání souborů zkušebních těles podle míry působení sledovaného faktoru.

Kritéria hodnocení „P“

$P = 0$  – pravděpodobnost, že faktor nepůsobí, je nulová,

$P = (0; 0,001)$  – vliv faktorů je statisticky velmi významný,

$P = (0,001; 0,1)$  – vliv faktorů je středně významný,

$P < 0,05$  – vliv faktoru je statisticky významný,

$P < 0,01; 0,05)$  – vliv faktorů je statisticky málo významný,

$P = 0,05$  – vliv faktoru je na hranici statistické významnosti,

$P > 0,05$  – vliv faktoru není statisticky významný (Gaff & Gáborík, 2009).

## 5.1 Výsledky a diskuze

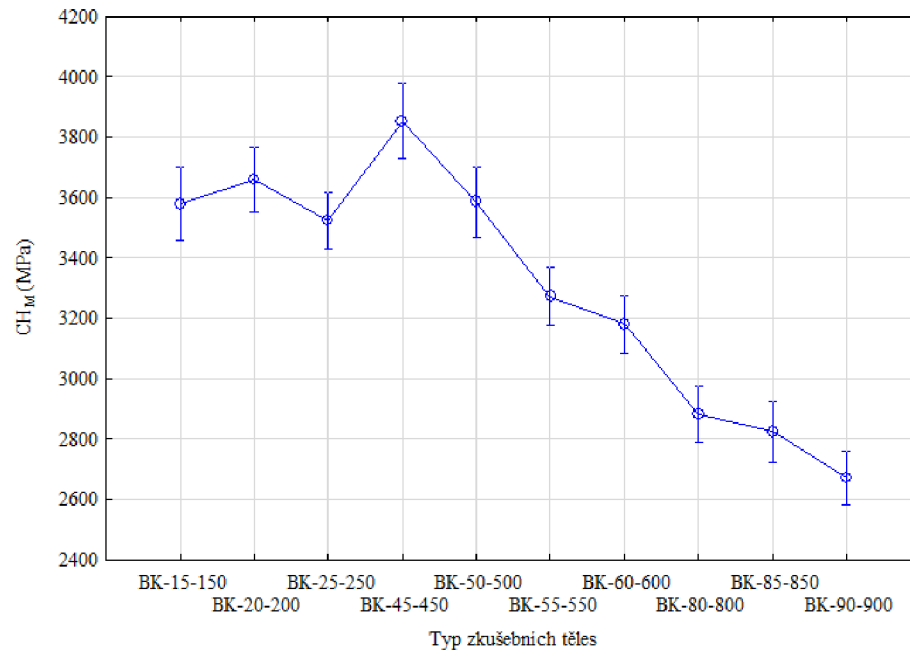
Tato kapitola představuje souhrnné výsledky sledovaných ohybových charakteristik diplomové práce. Naměřené hodnoty zkoumaných charakteristik a jejich změny jsou podrobně popsány a diskutovány s vědeckými články, tabulky naměřených hodnot s Duncanovými testy jsou v přílohách.

Vlastnosti bukového dřeva lze ovlivnit geometrickými parametry. Zaměřili jsme se na zkoumání vlivu tloušťky materiálu a vzdálenosti podpěr ohybových charakteristik silově – průhybového diagramu. Požítá síla na mezi pevnosti (tabulka 12) těles BK-90-900 je o 394 % vyšší jak u těles BK-15-150. Podobný trend pozorujeme u použité síly na mez úměrnosti (tabulka 12), kde nárůst hodnot mezi tělesy BK-15-150 a BK-90-900 je o 526%. Toto potvrzuje i (Svoboda, et al., 2007) ve své studii, kde hodnotí sílu na mez pevnosti a sílu mez úměrnosti v závislosti na tloušťce materiálu a vzdálenosti podpor. Větší hodnoty u delších zkušebních těles můžou být způsobeny nižším smykovým napětím, které podle (Požgaj, et al., 1993; Blomberg, 2006; Chao, et al., 2017) působí více na kratší tělesa.

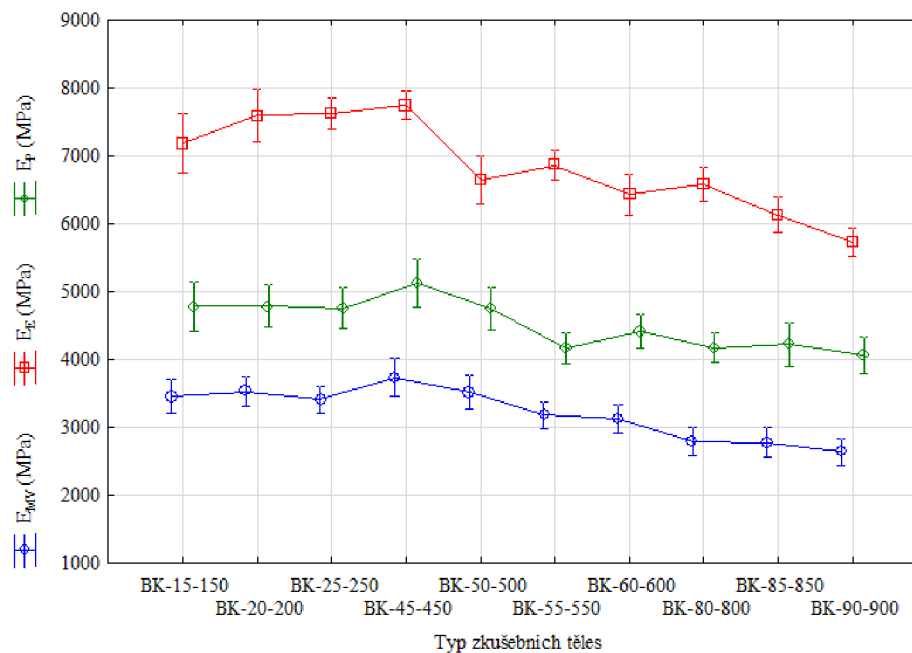
Dále jsem se zaměřili na průhyb zkoumaných těles na mez pevnosti a mez úměrnosti. Významný byl vliv změn geometrických parametrů těles na průhyb mezi pevnosti (tabulka 13), kde byly hodnoty o 484 % vyšší u těles BK-90-900. Podobný trend byl i u průhybu na mezi úměrnosti (tabulka 13), kde byl nárůst 645 % oproti tělesům s nižší tloušťkou materiálu a vzdáleností podpěr. Výsledky můžeme pozorovat se studií (Sikora, et al., 2017). Zde předpokládáme, že vyšší hodnoty ovlivňuje délka zkušebního tělesa. Delší tělesa jsou schopná lépe odolávat síle než kratší tělesa, která jsou ovlivněna smykovým napětím.

Sledované charakteristiky v tabulce 14 představují hodnoty sečnicového modulu a tangentových modulů. Pro lepší přehlednost jsou hodnoty sečnicového modulu graficky zpracované na obrázku 21 a tangentové moduly na obrázku 22. Hodnoty sečnicového modulu u těles s nižší tloušťkou materiálu a vzdáleností podpěr vykazují významně vyšší hodnoty u těles s vyšší tloušťkou materiálu a vzdáleností podpěr. Pokles hodnot sečnicového modulu u zkušebních těles BK-90-900 je 44 %. K porovnání můžeme použít studii (Sikora, 2021), kde tělesa o rozměru 5x 35 x 400 mm dosahovala hodnot 6314 MPa. Vyšší naměřené hodnoty mohly ovlivnit tělesa s větší délkou. Na základě takového porovnání můžeme říct, že vzdálenost podpěr by mohla zvýšit hodnoty sečnicového modulu. Hodnoty tangentového modulu (tabulka 14) nejsou tak významné jak hodnoty

sečnicového modulu. U tangentového modulu na mezi úměrnosti (obrázek 22) tělesa BK-90-900 mají o 35 % nižší hodnotu jak tělesa BK-15-150. Tangentový modul na střední hodnotě vykazuje pokles o 41 % a tangentový modul na mezi pevnosti 17 %. Ve studii (Sikora, 2021) u těles 5 x 35 x 400 mm byly naměřeny hodnoty  $E_E$  10761 MPa,  $E_{MV}$  6193 MPa a  $E_P$  5116 MPa



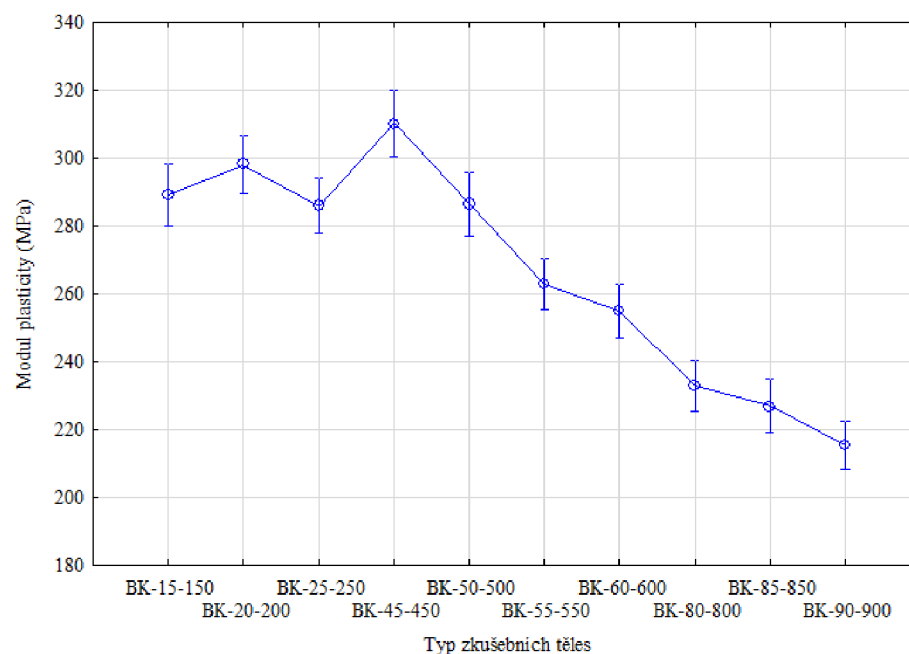
**Obr. 21 Sečnicový modul v závislosti na tloušťce a vzdálenosti podpěr**



**Obr. 22 Tangentové moduly v závislosti na tloušťce a vzdálenosti podpěr**

U sečnicového modulu podle Duncanova testu na základě hladiny významnosti můžeme pozorovat statisticky velmi významný rozdíl mezi nejvyšší a nejnižšími hodnoty těles BK-45-450/BK-90-900. Dále můžeme sledovat statisticky významné hodnoty mezi tělesy BK-25-250/BK-45-450 a BK-60-600/BK-80-800. Tangentové moduly vykazují minimální pokles hodnot vlivem vyšší tloušťky a délky materiálu, to může zapříčinit struktura dřeva (trhlínky, odklon vláken atd.). Při větších rozměrech tělesa je větší pravděpodobnost nepravidelné struktury zkušebních těles, z toho důvodu hodnoty mohou být nižší.

Další sledovanou charakteristikou byl modul plasticity (obrázek 23), kde z naměřených hodnoty (tabulka 15) vyplývá, že vlivem vyšší tloušťky materiálu a vzdálenosti podpěr hodnoty modulu plasticity klesají. Pokles průměrných hodnot zkušebních těles byl o 44 %.

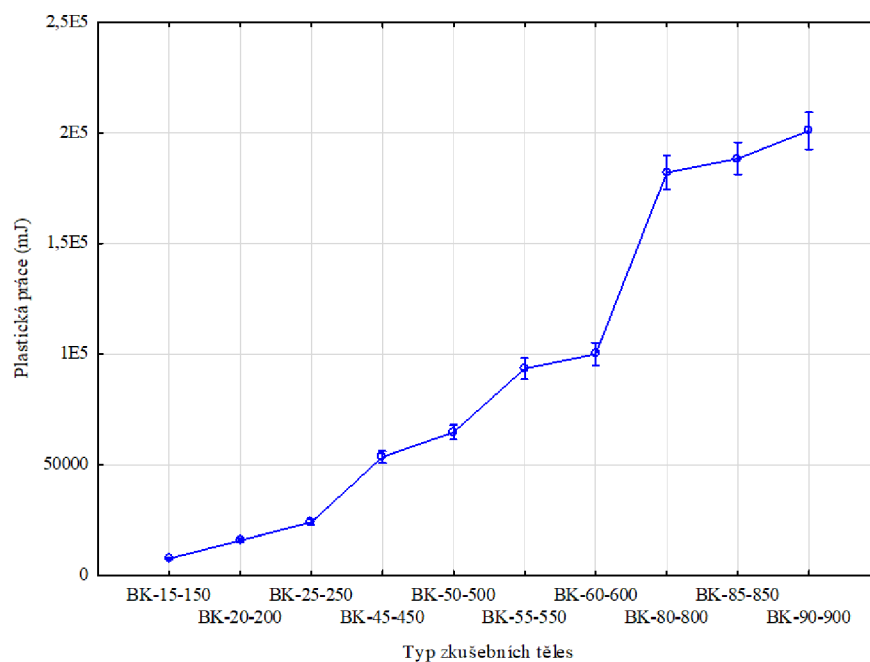


**Obr. 23 Modul plasticity v závislosti na tloušťce a vzdálenosti podpěr**

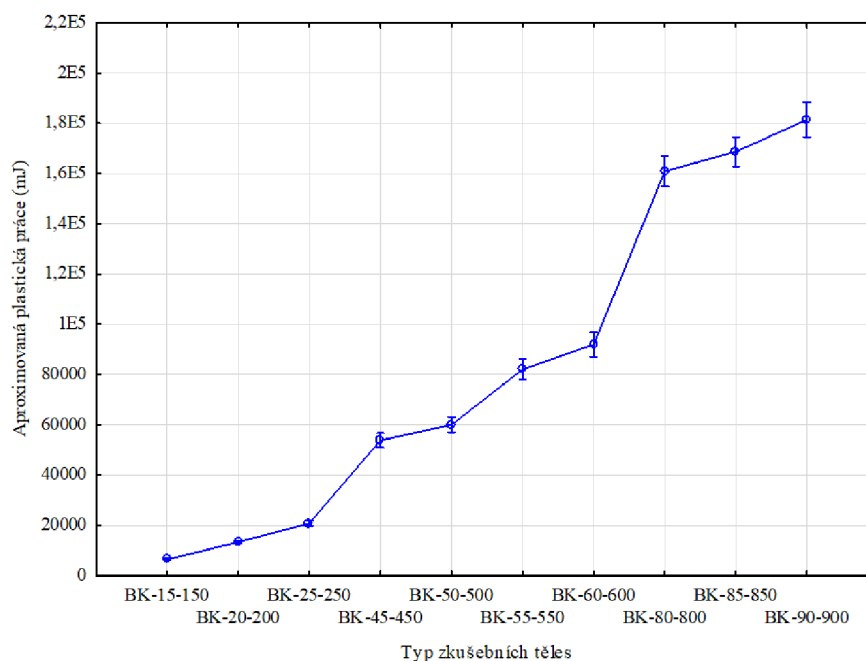
Vyhodnocení podle Duncanova testu je zobrazeno v příloze 12. Tloušťka materiálu a vzdálenost podpěr má na modul plasticity statisticky velmi významný vliv. Nejvyšší hodnoty pozorujeme u těles BK-45-450 a nejnižší hodnotou BK-90-900. Výzkum můžeme porovnat se studií (Gaff, et al., 2016), kde výsledek studie ukázal snížení modulu plasticity se zvyšující se tloušťkou materiálu. Studie porovnávala tělesa

rozměrů 4, 6, 10, 18 x 30 x 600 mm, kde tělesa s tloušťkou 4 mm dosahovali hodnot 167 N/mm<sup>2</sup>. Procentuální pokles k nejnižší hodnotě modulu plasticity těles 18 mm byl 11,3 %.

Při zkoumání plastické a aproximované práce došlo k zjištění, že se zvyšující se tloušťkou materiálu a vzdáleností podpěr dochází ke zvyšování naměřených průměrných hodnot. Na obrázku 24 můžeme pozorovat chování plastické práce, kde došlo ke zvýšení o 2616 % a u aproximované práce o 2734 % viz. obrázek 25. Podle (Matovič, 1993; Horáček, 2008) tělesa o větším průřezu odolávají lépe působení vnějších sil, než tělesa menšího průřezu to mohlo způsobit vyšší hodnoty u těles s vyšší tloušťkou. Stejný trend můžeme pozorovat ve studii (Gaff & Babiak, 2018), kde byly testovány tělesa 4, 6, 10, 18 x 35 x 600 mm. Ve studii byl pokles hodnot těles tloušťky 4 mm k tělesům tloušťky 18 mm plastické práce 83 % a u aproximované práce 75 %. To potvrzuje, že se zvýšením tloušťky materiálu a vzdálenosti podpěr rostou hodnoty plastické a aproximované práce.



**Obr. 24** Plastická práce v závislosti na tloušťce a vzdálenosti podpěr

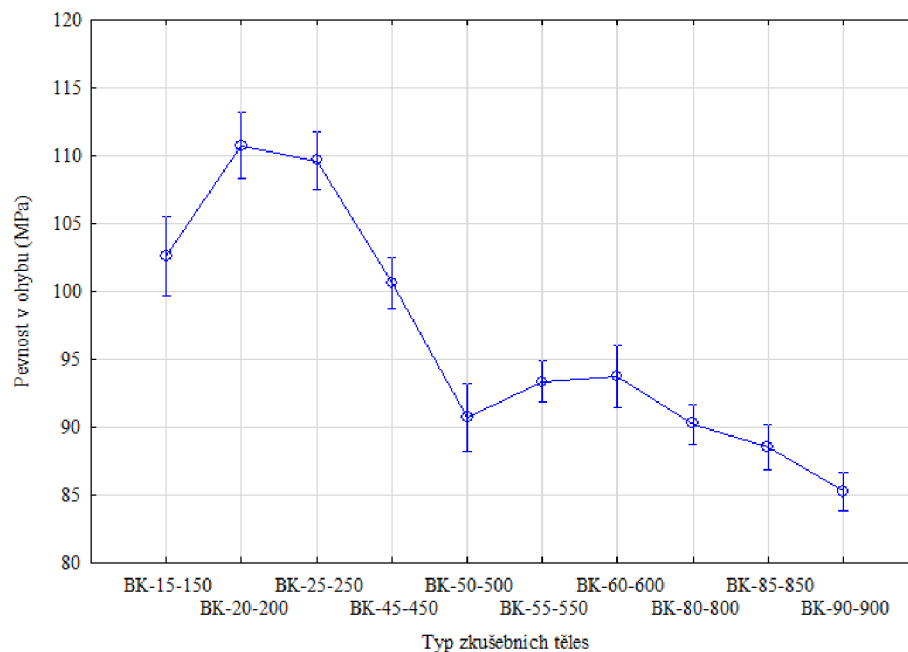


**Obr. 25 Aproximovaná práce v závislosti na tloušťce a vzdálenosti podpěr**

Plastická práce podle Duncanova testu (Příloha 14) a hladiny významnosti konstatovat, že statisticky velmi významný zvýšení plastické práce je mezi hodnotami těles BK-15-150 a BK-90-900 v důsledku větší tloušťky a délky zkušebních těles. Další velmi významné hodnoty dle hladiny významnosti jsou mezi BK-25-250, BK-40-400 a také mezi BK-60-60 a BK-80-800. U aproximované práce viz. Příloha 15 pozorujeme statisticky velmi významné hodnoty aproximované práce mezi tělesy BK-25-250, BK-45-450 a tělesy BK-60-600, BK-80-800, kde mezi zkušebními tělesy je větší rozdíl tloušťky a délky zkušebních těles. Další velmi významný rozdíl hodnot je mezi tělesy BK-50-500 a BK-55-550. Zásadní je statisticky velmi významný nárůst hodnot mezi BK-15-150 a BK-90-900, kde je zřejmý růst hodnot v závislosti tloušťky a délky materiálu.

Zkoumáním pevnosti v ohybu jsme z naměřených hodnot došli k závěru, že vlivem větší tloušťky materiálu a vzdálenosti podpěr dochází ke snížení pevnosti v ohybu. Procentuální pokles hodnot byl o 29 %.





**Obr. 26 Pevnost v ohybu v závislosti na tloušťce a vzdálenosti podpěr**

Podle Duncanova testu v Příloha 17 a hladiny významnosti, můžeme určit statisticky velmi významný nárůst hodnot mezi BK-20-200 a BK-90-900. Pokles pevnosti v ohybu od těles BK-20-200 až po nejnižší hodnoty je procentuálně o 29,8 %. Můžeme tedy konstatovat, vliv zvýšení tloušťky materiálu a vzdálenosti podpěr má za následek snížení hodnot pevnosti v ohybu. Toto tvrzení potvrzuje studie (Gaff, et al., 2016), kde hodnotí pevnost v ohybu v závislosti na tloušťce materiálu a vzdálenosti podpěr. Tělesa zkoumaná ve studii (Gaff, et al., 2016) Měli rozměr 4, 6, 10, 18 x 30 x 600 mm. Kde pokles hodnot těles s tloušťkou 4 mm až 18 mm byl o 13,2 %. Ačkoliv obě studie mají jiné rozměry, můžeme porovnat tělesa se stejnou vzdáleností podpěr 600 mm. U těles BK-60-600 a 18 x 30 x 600, můžeme porovnat vliv tloušťky materiálu. BK-60-600 s 93,70 MPa má o 21 % nižší pevnost v ohybu než těleso 18 x 30 x 600 mm. U malých průřezů se obvykle dosahuje větší ohybové pevnosti než u průřezů velkých (Matovič, 1993; Horáček, 2008).

## 6 Závěr

Výzkum diplomové práce přinesl poznatky o chování ohybových charakteristik při využití různých stupních geometrických parametrů dřevěného materiálu. Naměřená data popisují vlivy tloušťky a vzdálenosti podpěr na charakteristiky v plastické oblasti silově – průhybového diagramu. Většina výzkumů je zaměřena na elastické vlastnosti materiálu (modul pružnosti, elastické deformace) na mezi úměrnosti, zatímco malá část se zabývá deformací v plastickém rozsahu. Informace o chování materiálu při různých tloušťkách a délkách pomohou zvolit optimální geometrické parametry pro konstrukční účely. Z vědeckého hlediska je to aktuální problematika. V dnešní době se vyvíjejí nosníky z kompozitních materiálů, které obsahují masivní prvky různých délek a tlouštěk. Proto je zajímavé téma pro výzkum porovnání stejných tlouštěk materiálu s rozdílnými délkami nebo naopak rozdílné délky materiálu se stejnými tloušťkami. Tím bychom ucelili znalosti o vlivu geometrických parametrů na ohybové charakteristiky.

V experimentální části jsme vyhodnotili naměřené hodnoty těles z bukového materiálu s různými geometrickými parametry a jejich vliv na ohybové charakteristiky. Při sledování měnicí se tloušťky materiálu a vzdálenosti podpěr můžeme konstatovat, že geometrické parametry mají velmi významný vliv na sledované ohybové charakteristiky.

Z výsledných hodnot vyplývá, že mezní síly jsou významně ovlivněny vyšší tloušťkou materiálu a vzdáleností podpěr ve prospěch odolnosti. Síla na mez pevnosti zkoumaných těles vzrostla o 394 % a síla na mez úměrnosti o 526 %. Stejný trend představovali hodnoty průhybů, kde tělesa s vyšší tloušťkou a délkou zvládali větší průhyb. Hodnoty průhybu na mezi pevnosti testovaných těles se lišili o 484 % a u průhybu na mez úměrnosti o 645 %.

Dalšími ovlivněnými charakteristikami byl sečnicový modul a moduly tangentové, kde s vyšší tloušťkou materiálu a vzdáleností podpěr hodnoty naopak klesaly. Zatím co u tangentových modulů nebyl významný rozdíl, tak u sečnicového modulu jsme mohli pozorovat pokles o 44 %. Grafické znázornění modulu plasticity bylo téměř totožné, jak sečnicového modulu. Hodnoty modulu plasticity měli tedy stejný trend. Pokles modulu plasticity od tělesa BK-45-450 byl o 44 %.

Sledované charakteristiky práce silově – průhybového diagramu vlivem vyšší tloušťky materiálu a vzdálenosti podpěr stoupaly, tudíž materiál větší tloušťky a délky

pohltil více síly. U plastické práce jsme pozorovali cca 26ti násobný nárůst hodnot a u aproximované byly hodnoty cca o 27x vyšší oproti nejnižší hodnotě testovaných těles.

Poslední sledovanou charakteristikou byla pevnost v ohybu. Ta se obecně udává kolem 120 MPa, kdy výzkum dosáhnul nejvyšší hodnoty 110,71 MPa a se zvyšující se tloušťkou materiálu a vzdáleností podpěr hodnoty klesly až o 29 %. Veškeré charakteristiky byli vlivem geometrie tělesa ovlivněny.

## Seznam použité literatury

- ASTM E111-04, 2010. *Standard Test Method for Young's Modulus, Tangent Modulus, and Chord Modulus*. ASTM International, West Conshohocken: PA, USA.
- Babiak, M., Gaff, M., Sikora, A. & Hýsek, Š., 2018. *Modulus of elasticity in three- and four-point bending of wood*. *Composite Structures*, 204(15): 454-465. DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.07.113.
- Bergander, A. & Salmén, L., 2002. *Cell wall properties and their effects on the mechanical properties of fibers*. *Journal of Material Science* 37, 151-156: DOI: 10.1023/A:1013115925679.
- Blomberg, J., 2006. *Mechanical and physical properties of semi-isostatically densified wood*. Sweden: Doctoral thesis, Luleå University of Technology, pp. 62. ISSN 1402-1544.
- Blomberg, A., 2005. *Effects of semi-isostatic densification of wood on the variation in strength properties in density*. *Wood Science and Technology*: 39(5), 339-350. DOI: 10.1007/s00226-005-0290-8.
- Bodig, J. & Jayne, B. A., 1982. *Mechanics of wood and wood composites*. New York: Van Nostrand Reinhold. ISBN: 0-89464-777-6.
- ČSN EN 1995-1-1, 1995. *Eurocode 5 (EC5)*. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- Čunderlík, I., 2009. *Štruktúra dreva*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvole. ISBN 978-80-228-2061-5.
- EN 310, 1993. *Wood-based panels - Determination of modulus of elasticity in bending and of bending strength*. Brussels, Belgium: European Committee for Standardization.
- Fellner, J., Teischinger, A. & Zschokke, W., 2007. *Spektrum dřevin*. Vídeň: proHolz Austria. ISBN 978-3-902320-44-5.
- Gaff, M. & Babiak, M., 2017. *Composite Structures*. [Online] Available at: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.11.036>
- Gaff, M. & Babiak, M., 2018. *Methods for determining the plastic work in bending and impact of selected factors on its value*. Praha: Czech university of Life Sciences in Prague. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.11.036>.
- Gaff, M. & Babiak, M., 2018. *Tangent modulus as a function of selected factors*. *Composite Structures*: DOI 10.1016/j.compstruct.2018.02.052.
- Gaff, M. a další, 2017a. *Bending characteristics of hardwood lamellae in elastic region*. *Composites Part B* 116, 61 - 75: DOI: 10.1016/j.compositesb.2016.12.058.
- Gaff, M. & Gáborík, J., 2009. *Vlastnosti povrchu dreva modifikovaného reliéfováním*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene.

- Gaff, M., Gašparík, M., Babiak, M. & Vokatý, V., 2016. *Bendability characteristics of wood lamellae in plastic region*. Prague: Czech University of Life Sciences Prague. dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.12.052.
- Gaff, M., Gašparík, M., Babiak, M. & Vokatý, V., 2017b. *Bending characteristics of wood lamellae in plastic region*. *Composite Structures* 163: 410-422. DOI: 10.1016/j.compstruct.2016.12.052.
- Gaff, M., Gašparík, M. & Borůvka, M., 2015. *Simulating stresses associated with the bending of wood using a finite element method*. *BioResources*: 2009-2019. ISSN: 1930-2126.
- Gandelová, L., Horáček, P. & Šlezingerová, J., 2009. *Nauka o dřevě*. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita. ISBN 978-80-7375-312-2.
- Gandelová, L. & Šlezingerová, J., 2014. *Stavba dřeva*. ISBN 978-80-7375-966-7 editor Brno: Mendelova univerzita v Brně.
- Hájek, M. a další, 2018. *Lesnická bioekonomika*. ISBN 978-80-213-2838-9 editor Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, Fakulta lesnická a dřevařská.
- Hejny, S. & Slavík, B., 2003. *Květina České republiky*. ISBN 80-200-1090-4 editor Praha: Academia.
- Hiroshi, Y. & Atsushi, I., 2002. *Influence of large deflection on the measurement of bending properties of veneer by three-point static bending test*. *Wood and Fiber science* 35 (2): 293-300.
- Horáček, P., 2008. *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva*. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita. ISBN 978-80-7375-169-2.
- Hüber, B. & Prütz, G., 1938. *Über den Anteil von Fasern, Gefäßen und Parenchym am Aufbau verschiedener Hölzer*. *Holz als Roh- u editor Werkstoff*, 1(10): 377-381.
- Hýsek, Š., Gaff, M., Síkora, A. & Babiak, M., 2018. *New composite material based on winter rapeseed and his elasticity properties as a function of selected factors*. *Composites Part B Engineering*: DOI:10.1016/j.compositesb.2018.07.042.
- Chao, X. a další, 2017. *Numerical evaluation of the influence of porosity on bending properties of 2D carbon/carbon composites*. *Composites Part B* 136: 72-80. DOI: 10.1016/j.compositesb.2017.10.027.
- ISO 13061-2, 2014. *Physical and mechanical properties of wood – test methods for small clear wood specimens – Part 2: Determination of density for physical and mechanical tests*. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization.
- Janotka, I. & Kurjatko, S., 1978. *Premenlivost' hustoty bukového dřeva*. *Dřevářský výzkum* 23(1): 25-40.
- Kačíková, D., 2001. *Makromolekulové vlastnosti hlavních složek bukového dřeva z hládiska sulfátových buničín*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 84 p.
- Kamke, F. A., 2006. *Densified radiate pine for structural composites*. *Maderas. Ciencia y Tecnología* 8(2): 83-92. DOI: 10.4067/S0718-221X2006000200002.

- Keller, R., 1981. *Le bois de hetere*. Paris: Institut National de la Rescherche Agronomique Departement des Recherches Forestieres, p.367-444.
- Knigge, W. & Schulz, H., 1961. *Einfluss der Jahrswitterunh 1959 auf Zellartverteilung Faserlänge und Gefäsweite verschiedener Holzarte*. Holz Roh- u editor Werkstoff, 19(8): 293-303.
- Kollmann, F., 1939. *Holzeigenschaftstafeln: Rotbuche*. Holz Roh- u editor Werkstoff, 2(2): 95-96.
- Kollmann, F. F. P., 1951. *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe*. ISBN 978-3-642-49474-1 editor Berlín: Springer Verlag.
- Křupalová, Z., 2002. *Technologie: pro II. ročník SOU oboru truhlář pro výrobu*. Praha: Sobotáles, 115 s. ISBN 80-85920-91-3.
- Kúdela, J., 1990. *Vplyv vlhkosti a teploty na mechanické vlastnosti bukového dřeva [kandidátská dizertácia]*. 150 P editor Zvolen: VŠLD.
- Kúdela, J. & Čunderlík, I., 2012. *Bukové drevo štruktúra, vlastnosti, použitie*. ISBN 978-80-228-2318-0 editor Zvole: Technická univerzita vo Zvole.
- Kurjatko, 2010. *Parametre kvality dreva určujúce jeho finálne použitir*. Zvolen: Technická univerzita ve Zvolene, 352 p.
- Kvietková, M. S., 2015. *Obrábění dřeva*. Praha: Česká zemědělská univerzita.
- Kyanka, G. H., 1980. *Fatigue properties of wood and wood conposites*. International Journal of Fracture : 16(6), 609-616. DOI: 10.1007/BF02265220.
- Leclercq, A., 1977. *Relations entre la croissance, la structure at la densité du bois de hetre*. Gembloux: Bull.rech.Argon.
- Lexa, J. a další, 1952. *Mechanické a fyzikálne vlastnosti dreva*. Bratislava: Práca - ROH, p. 323-327.
- Matovič, A., 1993. *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva a materiálů na bázi dřeva*. ISBN 80-7157-086-9 editor Brno: Vysoká škola zemědělská v Brně.
- Pánek, M. & Reinprecht, L., 2016. *Trvanlivost a ochrana dřeva*. Praha: Česká zemědělská univerzita.
- Perelygin, L. M., 1965. *Náuka o dreve*. Bratislava: Alfa 1965. 448 p.
- Požgaj, A., Chovanec, D., Kurjatko, S. & Babiak, M., 1993. *Štruktúra a Vlastnosti Dřeva*. Bratislava: Príroda a. s. ISBN: 80-07-00960-4.
- Ramberg, W. & Osgod, W. R., 1943. *Description of stress-strain curves by three parameters*. NACA: TN- 902.
- Reginač, L. a další, 1985. *Náuka o dreve II (Wood Sciences II)*. Slovakia: Vysoká škola lesnícka a drevárska vo Zvolene.
- Reinprecht, L., 2008. *Ochrana dřeva*. Zvolen: Technická univerzita.

- Reiterer, A., Jakob, H. F., Stanzl-Tschegg, S. E. & Fratzl, P., 1998. *Spiral angle of elementary cellulose fibrils in cell walls of Picea abies determined by small-angle X-ray scattering*. Wood Science and Technology 32 (5): 335-345.
- Samuel, J. R., 1914. *The Mechanical Properties Of Wood. Including a Discussion of the Factors Affecting the Mechanical Properties, and Methods of Timber Testing*. USA: Yale forest school.
- Sarvaš, M. a další, 2010. *Základné charakteristiky lesných drevín*. ISBN 978-80-8093-112-4 editor Zvolen: NVL, 2010. 82 s.
- Schneider, S., Schneider, S. G., da Silva, H. M. & de Moura Neto, C., 2005. *Study of the non-linear stress-strain behaviour in Ti-Nb-Zr alloys*. Materials Research 8(4), 435-438: DOI: 10.1590/S1516-14392005000400013.
- Siau, J. F., 1984. *Transport processes in Wood..* New York: Springer Verlag.
- Sikora, A. a další, 2017. *Deflection of Densified Beech and Aspen Woods as a Function of Selected Factors*. Czech University of Life Sciences in Prague: DOI: 10.15376/biores.12.2.3192-3210, Dostupné z <https://www.researchgate.net/publication/314888949>.
- Sikora, A., 2021. *Základní mechanické charakteristiky kompozitních materiálů na bázi dřeva a nedřevěných kompozitů*. V Praze Disertační práce: Česká zemědělská univerzita v Praze.
- Sikora, A., Gaff, M., Hýsek, Š. & Babiak, M., 2018. The plasticity of composite material based on winter rapeseed as a function of selected factors. *Composite Structures* 202, Issue DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.04.019, pp. 783-792.
- Svoboda, T. a další, 2007. *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>.
- Ugolev, B. N., 2007. *Drevesinovedenie i lesnoe tovarovedenie*. Moskva: Izdovatestvo Moskovskogo Gostdarstvenogo universiteta lesa, 351 p.
- Wagenführ, R., 1974. *Holz atlas..* Leipzig: VEB Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag.
- Wagenführ, R., 1989. *Anatomie des Holzes. Holz atlas*. Leipzig editor VEB Fachbuchverlag: 334 p.
- Wagenführ, R., 2007. *Holz atlas*. Leipzig: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 816 p.
- Yoshihara, H., Masamitsu, O. & Yoshitaka, K., 1998. *Prediction of the buckling stress of intermediate wooden columns using the secant modulus*. Journal of Wood Science 44(1), 69-72. DOI: 10.1007/BF00521877: Journal of Wood Science 44(1), 69-72. DOI: 10.1007/BF00521877.

Zhang, S. I., 1995. *Effect of growth rate on wood specific gravity and selected mechanical properties in individual species from distinct wood categories*. Wood Science and Technology, 29, 451-465. : <http://dx.doi.org/10.1007/BF00194204> .



## Příloha 1 Síla na mez pevnosti

**Tab. 12 Porovnání vlivu tloušťky zkušební těles a vzdálenosti podpěr na sílu meze pevnosti pomocí Duncanova testu**

Typ zkušebních těles	F <sub>P</sub> (N)									
	1 2100,9	2 3031,0	3 3743,7	4 6101,0	5 6077,3	6 6916,2	7 7578,1	8 9771,2	9 10163,	10 10390,
BK-15-150		0,000011	0,000011	0,000004	0,000003	0,000004	0,000004	0,000005	0,000001	0,000001
BK-20-200	0,000011		0,000277	0,000003	0,000011	0,000004	0,000004	0,000004	0,000005	0,000001
BK-25-250	0,000011	0,000277		0,000011	0,000009	0,000003	0,000004	0,000004	0,000004	0,000005
BK-45-450	0,000004	0,000003	0,000011		0,903561	0,000039	0,000011	0,000003	0,000004	0,000004
BK-50-500	0,000003	0,000011	0,000009	0,903561		0,000036	0,000003	0,000004	0,000004	0,000004
BK-55-550	0,000004	0,000004	0,000003	0,000039	0,000036		0,000725	0,000011	0,000003	0,000004
BK-60-600	0,000004	0,000004	0,000004	0,000011	0,000003	0,000725		0,000009	0,000011	0,000003
BK-80-800	0,000005	0,000004	0,000004	0,000003	0,000004	0,000011	0,000009		0,045324	0,002232
BK-85-850	0,000001	0,000005	0,000004	0,000004	0,000004	0,000003	0,000011	0,045324		0,245481
BK-90-900	0,000001	0,000001	0,000005	0,000004	0,000004	0,000004	0,000003	0,002232	0,245481	

## Příloha 2 Síla na mez úměrnosti

**Tab. 13 Porovnání vlivu tloušťky zkušební těles a vzdálenosti podpěr na sílu meze úměrnosti pomocí Duncanova testu**

F <sub>E</sub> (N)										
Typ zkušebních těles	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
BK-15-150		0,065825	0,000069	0,000004	0,000004	0,000003	0,000004	0,000005	0,000001	0,000001
BK-20-200	0,065825		0,023695	0,000003	0,000004	0,000011	0,000004	0,000004	0,000005	0,000001
BK-25-250	0,000069	0,023695		0,000011	0,000003	0,000009	0,000004	0,000004	0,000004	0,000005
BK-45-450	0,000004	0,000003	0,000011		0,341832	0,528791	0,000011	0,000003	0,000004	0,000004
BK-50-500	0,000004	0,000004	0,000003	0,341832		0,136347	0,000009	0,000011	0,000003	0,000004
BK-55-550	0,000003	0,000011	0,000009	0,528791	0,136347		0,000003	0,000004	0,000004	0,000004
BK-60-600	0,000004	0,000004	0,000004	0,000011	0,000009	0,000003		0,000009	0,000011	0,000003
BK-80-800	0,000005	0,000004	0,000004	0,000003	0,000011	0,000004	0,000009		0,000812	0,000011
BK-85-850	0,000001	0,000005	0,000004	0,000004	0,000003	0,000004	0,000011	0,000812		0,033992
BK-90-900	0,000001	0,000001	0,000005	0,000004	0,000004	0,000004	0,000003	0,000011	0,033992	

## Příloha 3 Naměřené hodnoty $F_P$ , $F_E$

**Tab. 14** Tabulka naměřených hodnot  $F_P$  a  $F_E$

h (mm)	$l_0$ (mm)	$F_P$ (N)	$F_E$ (N)
15	150	2 100,87 (15,51)	897,76 (22,39)
20	200	3 031,03 (12,16)	1 199,71 (28,30)
25	250	3 743,74 (10,66)	1 571,02 (22,19)
45	450	6 100,97 (10,26)	2 592,81 (20,49)
50	500	6 077,25 (15,36)	2 748,83 (17,58)
55	550	6 916,17 (8,71)	2 489,42 (22,54)
60	600	7 578,05 (13,75)	3 591,30 (15,73)
80	800	9 771,20 (8,75)	4 722,54 (10,54)
85	850	10 162,95 (10,10)	5 272,47 (22,64)
90	900	10 390,25 (8,86)	5 620,48 (17,27)

Hodnoty v závorkách jsou variační koeficienty (%)

## Příloha 4 Průhyb na mez pevnosti

**Tab. 15 Porovnání vlivu tloušťky zkušební těles a vzdálenosti podpěr na průhyb na mezi pevnosti pomocí Duncanova testu**

Typ zkušebních těles	Y <sub>P</sub> (mm)									
	1 5,5599	2 7,9823	3 9,9534	4 15,509	5 16,587	6 21,226	7 21,863	8 29,406	9 30,793	10 32,509
BK-15-150		0,009538	0,000014	0,000003	0,000004	0,000004	0,000004	0,000005	0,000001	0,000001
BK-20-200	0,009538		0,034890	0,000011	0,000003	0,000004	0,000004	0,000004	0,000005	0,000001
BK-25-250	0,000014	0,034890		0,000009	0,000011	0,000003	0,000004	0,000004	0,000004	0,000005
BK-45-450	0,000003	0,000011	0,000009		0,248391	0,000011	0,000003	0,000004	0,000004	0,000004
BK-50-500	0,000004	0,000003	0,000011	0,248391		0,000009	0,000011	0,000003	0,000004	0,000004
BK-55-550	0,000004	0,000004	0,000003	0,000011	0,000009		0,495676	0,000011	0,000003	0,000004
BK-60-600	0,000004	0,000004	0,000004	0,000003	0,000011	0,495676		0,000009	0,000011	0,000003
BK-80-800	0,000005	0,000004	0,000004	0,000004	0,000003	0,000011	0,000009		0,137882	0,001297
BK-85-850	0,000001	0,000005	0,000004	0,000004	0,000004	0,000003	0,000011	0,137882		0,066204
BK-90-900	0,000001	0,000001	0,000005	0,000004	0,000004	0,000004	0,000003	0,001297	0,066204	

## Příloha 5 Průhyb na mez úměrnosti

**Tab. 16 Porovnání vlivu tloušťky zkušební těles a vzdálenosti podpěr na průhyb na mezi úměrnosti pomocí Duncanova testu**

Typ zkušebních těles	$Y_E$ (mm)									
	1 1,2914	2 1,6561	3 2,0958	4 3,4600	5 4,3082	6 3,8269	7 5,7076	8 7,2373	9 8,4862	10 9,6244
BK-15-150		0,133130	0,001337	0,000003	0,000004	0,000004	0,000004	0,000005	0,000001	0,000001
BK-20-200	0,133130		0,070259	0,000011	0,000004	0,000003	0,000004	0,000004	0,000005	0,000001
BK-25-250	0,001337	0,070259		0,000009	0,000003	0,000011	0,000004	0,000004	0,000004	0,000005
BK-45-450	0,000003	0,000011	0,000009		0,000702	0,130894	0,000003	0,000004	0,000004	0,000004
BK-50-500	0,000004	0,000004	0,000003	0,000702		0,047562	0,000009	0,000011	0,000003	0,000004
BK-55-550	0,000004	0,000003	0,000011	0,130894	0,047562		0,000011	0,000003	0,000004	0,000004
BK-60-600	0,000004	0,000004	0,000004	0,000003	0,000009	0,000011		0,000009	0,000011	0,000003
BK-80-800	0,000005	0,000004	0,000004	0,000004	0,000011	0,000003	0,000009		0,000009	0,000011
BK-85-850	0,000001	0,000005	0,000004	0,000004	0,000003	0,000004	0,000011	0,000009		0,000011
BK-90-900	0,000001	0,000001	0,000005	0,000004	0,000004	0,000004	0,000003	0,000011	0,000011	

## Příloha 6 Naměřené hodnoty $Y_P$ a $Y_E$

Tab. 17 Tabulka naměřených hodnot  $Y_P$  a  $Y_E$

h (mm)	$l_0$ (mm)	$Y_P$ (mm)	$Y_E$ (mm)
15	150	5,56 (18,12)	1,29 (16,47)
20	200	7,98 (18,62)	1,66 (28,39)
25	250	9,95 (17,05)	2,10 (22,31)
45	450	15,51 (27,39)	3,46 (23,73)
50	500	16,59 (24,54)	4,31 (17,91)
55	550	21,23 (18,27)	3,83 (25,66)
60	600	21,86 (18,67)	5,71 (13,65)
80	800	29,41 (13,01)	7,24 (14,01)
85	850	30,79 (15,06)	8,49 (19,42)
90	900	32,51 (14,55)	9,62 (13,85)

Hodnoty v závorkách jsou variační koeficienty (%)

## Příloha 7 Sečnicový modul

**Tab. 18 Porovnání vlivu tloušťky zkušební těles a vzdálenosti podpěr na sečnicový modul pomocí Duncanova testu**

CH <sub>M</sub> (MPa)										
Typ zkušebních těles	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	3579,0	3658,4	3524,2	3853,5	3585,2	3272,6	3179,6	2881,3	2823,5	2671,6
BK-15-150		0,618351	0,712574	0,091839	0,966668	0,050218	0,012198	0,000010	0,000005	0,000004
BK-20-200	0,618351		0,418408	0,189103	0,622210	0,018247	0,003230	0,000005	0,000005	0,000001
BK-25-250	0,712574	0,418408		0,046550	0,702395	0,090395	0,026911	0,000032	0,000010	0,000004
BK-45-450	0,091839	0,189103	0,046550		0,087631	0,000261	0,000023	0,000005	0,000001	0,000001
BK-50-500	0,966668	0,622210	0,702395	0,087631		0,053442	0,012662	0,000010	0,000005	0,000005
BK-55-550	0,050218	0,018247	0,090395	0,000261	0,053442		0,530966	0,011559	0,004469	0,000128
BK-60-600	0,012198	0,003230	0,026911	0,000023	0,012662	0,530966		0,044727	0,022077	0,001178
BK-80-800	0,000010	0,000005	0,000032	0,000005	0,000010	0,011559	0,044727		0,696945	0,184519
BK-85-850	0,000005	0,000005	0,000010	0,000001	0,000005	0,004469	0,022077	0,696945		0,306835
BK-90-900	0,000004	0,000001	0,000004	0,000001	0,000005	0,000128	0,001178	0,184519	0,306835	

## Příloha 8 Tangentový modul na mezi úměrnosti

**Tab. 19 Porovnání vlivu tloušťky zkušební těles a vzdálenosti podpěr na tangentový modul meze úměrnosti pomocí Duncanova testu**

E <sub>E</sub> (MPa)										
Typ zkušebních těles	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
BK-15-150		0,042146	0,038147	0,009232	0,011537	0,117335	0,000531	0,005256	0,000005	0,000004
BK-20-200	0,042146		0,883434	0,482026	0,000008	0,000473	0,000004	0,000006	0,000004	0,000005
BK-25-250	0,038147	0,883434		0,544155	0,000008	0,000351	0,000004	0,000005	0,000005	0,000001
BK-45-450	0,009232	0,482026	0,544155		0,000004	0,000036	0,000005	0,000004	0,000001	0,000001
BK-50-500	0,011537	0,000008	0,000008	0,000004		0,285354	0,323422	0,735965	0,019457	0,000019
BK-55-550	0,117335	0,000473	0,000351	0,000036	0,285354		0,051130	0,186349	0,000780	0,000004
BK-60-600	0,000531	0,000004	0,000004	0,000005	0,323422	0,051130		0,472989	0,143562	0,000798
BK-80-800	0,005256	0,000006	0,000005	0,000004	0,735965	0,186349	0,472989		0,038003	0,000060
BK-85-850	0,000005	0,000004	0,000005	0,000001	0,019457	0,000780	0,143562	0,038003		0,046166
BK-90-900	0,000004	0,000005	0,000001	0,000001	0,000019	0,000004	0,000798	0,000060	0,046166	



## Příloha 9 Tangentový modul na střední hodnotě

**Tab. 20 Porovnání vlivu tloušťky zkušební těles a vzdálenosti podpěr na tangentový modul na střední hodnotě pomocí Duncanova testu**

E <sub>MW</sub> (MPa)										
Typ zkušebních těles	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
BK-15-150		0,648228	0,770600	0,096359	0,659293	0,091683	0,047529	0,000046	0,000039	0,000005
BK-20-200	0,648228		0,484507	0,182213	0,961146	0,040797	0,017980	0,000010	0,000009	0,000001
BK-25-250	0,770600	0,484507		0,058261	0,494210	0,135622	0,077678	0,000130	0,000113	0,000005
BK-45-450	0,096359	0,182213	0,058261		0,193757	0,000842	0,000227	0,000005	0,000001	0,000001
BK-50-500	0,659293	0,961146	0,494210	0,193757		0,040455	0,018247	0,000010	0,000009	0,000005
BK-55-550	0,091683	0,040797	0,135622	0,000842	0,040455		0,710314	0,016388	0,016310	0,000991
BK-60-600	0,047529	0,017980	0,077678	0,000227	0,018247	0,710314		0,032609	0,035206	0,002975
BK-80-800	0,000046	0,000010	0,000130	0,000005	0,000010	0,016388	0,032609		0,940255	0,343653
BK-85-850	0,000039	0,000009	0,000113	0,000001	0,000009	0,016310	0,035206	0,940255		0,348695
BK-90-900	0,000005	0,000001	0,000005	0,000001	0,000005	0,000991	0,002975	0,343653	0,348695	

## Příloha 10 Tangentový modul na mezi pevnosti

**Tab. 21 Porovnání vlivu tloušťky zkušební těles a vzdálenosti podpěr na tangentový modul meze pevnosti pomocí Duncanova testu**

E <sub>P</sub> (MPa)										
Typ zkušebních těles	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
BK-15-150		0,989473	0,895943	0,113668	0,870529	0,007319	0,102481	0,007483	0,012536	0,001486
BK-20-200	0,989473		0,893408	0,096361	0,866721	0,007715	0,109201	0,008018	0,013644	0,001559
BK-25-250	0,895943	0,893408		0,099595	0,964628	0,009670	0,116933	0,009669	0,015466	0,002106
BK-45-450	0,113668	0,096361	0,099595		0,100076	0,000017	0,001395	0,000018	0,000038	0,000002
BK-50-500	0,870529	0,866721	0,964628	0,100076		0,009685	0,105876	0,009368	0,014281	0,002166
BK-55-550	0,007319	0,007715	0,009670	0,000017	0,009685		0,277181	0,965057	0,804692	0,604595
BK-60-600	0,102481	0,109201	0,116933	0,001395	0,105876	0,277181		0,275609	0,346492	0,126768
BK-80-800	0,007483	0,008018	0,009669	0,000018	0,009368	0,965057	0,275609		0,824480	0,600601
BK-85-850	0,012536	0,013644	0,015466	0,000038	0,014281	0,804692	0,346492	0,824480		0,483259
BK-90-900	0,001486	0,001559	0,002106	0,000002	0,002166	0,604595	0,126768	0,600601	0,483259	

## Příloha 11 Naměřené hodnoty $CH_M$ , $E_E$ , $E_{MW}$ , $E_P$

Tab. 22 Tabulka naměřených hodnot  $CH_M$ ,  $E_E$ ,  $E_{MW}$ ,  $E_P$

h (mm)	$l_0$ (mm)	$CH_M$ (MPa)	$E_E$ (MPa)	$E_{MW}$ (MPa)	$E_P$ (MPa)
15	150	3 578,96 (18,71)	7 177,14 (16,20)	3 448,05 (19,43)	4 776,84 (20,14)
20	200	3 658,37 (16,09)	7 590,48 (13,43)	3 523,62 (17,15)	4 779,55 (17,51)
25	250	3 524,22 (14,83)	7 620,30 (8,06)	3 403,04 (15,72)	4 750,00 (16,74)
45	450	3 853,49 (17,59)	7 743,68 (6,94)	3 729,51 (19,88)	5 120,69 (18,38)
50	500	3 585,17 (18,20)	6 641,27 (14,01)	3 516,10 (19,23)	4 740,91 (17,62)
55	550	3 272,64 (15,81)	6 858,59 (8,52)	3 172,71 (16,96)	4 161,52 (15,31)
60	600	3 179,55 (16,81)	6 426,71 (12,79)	3 115,38 (17,60)	4 409,15 (14,98)
80	800	2 881,33 (17,75)	6 572,68 (10,33)	2 785,55 (19,14)	4 170,51 (14,40)
85	850	2 823,47 (19,61)	6 129,20 (11,27)	2 773,98 (20,60)	4 216,01 (20,14)
90	900	2 671,65 (18,18)	5 723,63 (10,00)	2 629,34 (19,60)	4 055,29 (18,24)

Hodnoty v závorkách jsou variační koeficienty (%)

## Příloha 12 Modul plasticity

**Tab. 23 Porovnání vlivu tloušťky zkušební těles a vzdálenosti podpěr na modul plasticity pomocí Duncanova testu**

E (N/mm <sup>2</sup> )										
Typ zkušebních těles	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	289,22	298,02	285,86	310,14	286,43	262,65	254,88	232,79	226,86	215,30
BK-15-150		0,454919	0,790149	0,093035	0,812524	0,037497	0,007354	0,000009	0,000005	0,000005
BK-20-200	0,454919		0,353668	0,303251	0,357130	0,005644	0,000678	0,000004	0,000005	0,000001
BK-25-250	0,790149	0,353668		0,065234	0,961207	0,048731	0,011638	0,000015	0,000006	0,000004
BK-45-450	0,093035	0,303251	0,065234		0,065056	0,000158	0,000013	0,000005	0,000001	0,000001
BK-50-500	0,812524	0,357130	0,961207	0,065056		0,055276	0,012484	0,000017	0,000005	0,000004
BK-55-550	0,037497	0,005644	0,048731	0,000158	0,055276		0,508978	0,015176	0,004235	0,000141
BK-60-600	0,007354	0,000678	0,011638	0,000013	0,012484	0,508978		0,060657	0,023075	0,001442
BK-80-800	0,000009	0,000004	0,000015	0,000005	0,000017	0,015176	0,060657		0,614460	0,162043
BK-85-850	0,000005	0,000005	0,000006	0,000001	0,000005	0,004235	0,023075	0,614460		0,326169
BK-90-900	0,000005	0,000001	0,000004	0,000001	0,000004	0,000141	0,001442	0,162043	0,326169	

## Příloha 13 Neměřené hodnoty E

**Tab. 24** Tabulka naměřených hodnot E

h (mm)	l <sub>0</sub> (mm)	E (MPa)
15	150	289,22 (17,47)
20	200	298,02 (15,77)
25	250	285,86 (15,40)
45	450	310,14 (17,47)
50	500	286,43 (17,72)
55	550	262,65 (15,57)
60	600	254,88 (16,74)
80	800	232,79 (17,43)
85	850	226,86 (19,26)
90	900	215,30 (18,19)

Hodnoty v závorkách jsou variační koeficienty (%)

## Příloha 14 Plastická práce

**Tab. 25 Porovnání vlivu tloušťky zkušební těles a vzdálenosti podpěr na plastickou práci pomocí Duncanova testu**

Bw (mJ)										
Typ zkušebních těles	1 7417,8	2 15719,	3 23948,	4 53447,	5 64620,	6 93353,	7 99995,	8 1821E2	9 1884E2	10 2010E2
BK-15-150		0,243152	0,026616	0,000003	0,000004	0,000004	0,000004	0,000005	0,000001	0,000001
BK-20-200	0,243152		0,247251	0,000011	0,000003	0,000004	0,000004	0,000004	0,000005	0,000001
BK-25-250	0,026616	0,247251		0,000041	0,000011	0,000003	0,000004	0,000004	0,000004	0,000005
BK-45-450	0,000003	0,000011	0,000041		0,116187	0,000011	0,000003	0,000004	0,000004	0,000004
BK-50-500	0,000004	0,000003	0,000011	0,116187		0,000061	0,000012	0,000003	0,000004	0,000004
BK-55-550	0,000004	0,000004	0,000003	0,000011	0,000061		0,350290	0,000011	0,000003	0,000004
BK-60-600	0,000004	0,000004	0,000004	0,000003	0,000012	0,350290		0,000009	0,000011	0,000003
BK-80-800	0,000005	0,000004	0,000004	0,000004	0,000003	0,000011	0,000009		0,371340	0,010642
BK-85-850	0,000001	0,000005	0,000004	0,000004	0,000004	0,000003	0,000011	0,371340		0,076944
BK-90-900	0,000001	0,000001	0,000005	0,000004	0,000004	0,000004	0,000003	0,010642	0,076944	

## Příloha 15 Aproximovaná práce

**Tab. 26 Porovnání vlivu tloušťky zkušební těles a vzdálenosti podpěr na aproximovanou práci pomocí Duncanova testu**

Aw (mJ)										
Typ zkušebních těles	1 6400,3	2 13284,	3 20788,	4 53792,	5 59982,	6 82071,	7 91970,	8 1609E2	9 1687E2	10 1814E2
BK-15-150		0,247823	0,021008	0,000003	0,000004	0,000004	0,000004	0,000005	0,000001	0,000001
BK-20-200	0,247823		0,207688	0,000011	0,000003	0,000004	0,000004	0,000004	0,000005	0,000001
BK-25-250	0,021008	0,207688		0,000009	0,000011	0,000003	0,000004	0,000004	0,000004	0,000005
BK-45-450	0,000003	0,000011	0,000009		0,298681	0,000014	0,000003	0,000004	0,000004	0,000004
BK-50-500	0,000004	0,000003	0,000011	0,298681		0,000215	0,000011	0,000003	0,000004	0,000004
BK-55-550	0,000004	0,000004	0,000003	0,000014	0,000215		0,096537	0,000011	0,000003	0,000004
BK-60-600	0,000004	0,000004	0,000004	0,000003	0,000011	0,096537		0,000009	0,000011	0,000003
BK-80-800	0,000005	0,000004	0,000004	0,000004	0,000003	0,000011	0,000009		0,190533	0,000855
BK-85-850	0,000001	0,000005	0,000004	0,000004	0,000004	0,000003	0,000011	0,190533		0,033292
BK-90-900	0,000001	0,000001	0,000005	0,000004	0,000004	0,000004	0,000003	0,000855	0,033292	

## Příloha 16 Naměřené hodnoty $A_w$ , $B_w$

Tab. 27 Tabulka naměřených hodnot  $A_w$ ,  $B_w$

h (mm)	$l_0$ (mm)	$A_w$ (mJ)	$B_w$ (mJ)
15	150	6 400,29 (29,51)	7 417 (28,58)
20	200	13 283,52 (26,26)	15 718 (29,14)
25	250	20 787,97 (26,31)	23 947 (29,17)
45	450	53 791,56 (28,86)	53 446 (27,45)
50	500	59 981,56 (28,10)	64 619 (28,06)
55	550	82 071,26 (27,08)	93 352 (28,36)
60	600	91 969,97 (28,99)	99 995 (28,42)
80	800	160 923,45 (20,62)	182 071 (23,03)
85	850	168 720,11 (18,87)	188 429 (21,16)
90	900	181 398,34 (20,86)	201 008 (22,87)

Hodnoty v závorkách jsou variační koeficienty (%)



## Příloha 17 Pevnost v ohybu

**Tab. 28 Porovnání vlivu tloušťky zkušební těles a vzdálenosti podpěr na pevnost v ohybu pomocí Duncanova testu**

MOR (MPa)										
Typ zkušebních těles	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	102,55	110,71	109,61	100,63	90,705	93,343	93,700	90,199	88,478	85,234
BK-15-150		0,007341	0,015947	0,511321	0,000127	0,003007	0,003534	0,000073	0,000009	0,000005
BK-20-200	0,007341		0,704757	0,001068	0,000004	0,000004	0,000004	0,000005	0,000001	0,000001
BK-25-250	0,015947	0,704757		0,003068	0,000004	0,000004	0,000003	0,000004	0,000005	0,000001
BK-45-450	0,511321	0,001068	0,003068		0,001304	0,017274	0,017946	0,000849	0,000097	0,000005
BK-50-500	0,000127	0,000004	0,000004	0,001304		0,367547	0,338337	0,862707	0,477435	0,087972
BK-55-550	0,003007	0,000004	0,000004	0,017274	0,367547		0,902863	0,314594	0,131063	0,011304
BK-60-600	0,003534	0,000004	0,000003	0,017946	0,338337	0,902863		0,281647	0,113639	0,009021
BK-80-800	0,000073	0,000005	0,000004	0,000849	0,862707	0,314594	0,281647		0,556470	0,109268
BK-85-850	0,000009	0,000001	0,000005	0,000097	0,477435	0,131063	0,113639	0,556470		0,267803
BK-90-900	0,000005	0,000001	0,000001	0,000005	0,087972	0,011304	0,009021	0,109268	0,267803	

## Příloha 18 Naměřené hodnoty MOR

**Tab. 29** Tabulka naměřených hodnot MOR

h (mm)	l <sub>0</sub> (mm)	MOR (MPa)
15	150	102,55 (15,52)
20	200	110,71 (12,09)
25	250	109,61 (10,58)
45	450	100,63 (10,16)
50	500	90,71 (14,99)
55	550	93,34 (8,69)
60	600	93,70 (13,38)
80	800	90,20 (8,95)
85	850	88,48 (10,20)
90	900	85,23 (9,02)

Hodnoty v závorkách jsou variační koeficienty (%)

## Seznam příloh

Příloha 1 Síla na mez pevnosti.....	81
Příloha 2 Síla na mez úměrnosti .....	82
Příloha 3 Naměřené hodnoty $F_P$ , $F_E$ .....	83
Příloha 4 Průhyb na mez pevnosti .....	84
Příloha 5 Průhyb na mez úměrnosti .....	85
Příloha 6 Naměřené hodnoty $Y_P$ a $Y_E$ .....	86
Příloha 7 Sečnicový modul .....	87
Příloha 8 Tangentový modul na mezi úměrnosti .....	88
Příloha 9 Tangentový modul na střední hodnotě .....	89
Příloha 10 Tangentový modul na mezi pevnosti .....	90
Příloha 11 Naměřené hodnoty $CH_M$ , $E_E$ , $E_{MW}$ , $E_P$ .....	91
Příloha 12 Modul plasticity.....	92
Příloha 13 Neměřené hodnoty $E$ .....	93
Příloha 14 Plastická práce.....	94
Příloha 15 Aproximovaná práce .....	95
Příloha 16 Naměřené hodnoty $A_w$ , $B_w$ .....	96
Příloha 17 Pevnost v ohybu .....	97
Příloha 18 Naměřené hodnoty MOR .....	98