

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA PRAHA

FAKULTA LESNICKÁ A DŘEVAŘSKÁ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2022

Bc. Ondřej Slavík

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA PRAHA

FAKULTA LESNICKÁ A DŘEVAŘSKÁ

**GEOMETRICKÉ PARAMETRY PŘI OHÝBÁNÍ DŘEVA A
JEJICH VLIV NA CHARAKTERISTIKY OHÝBÁNÍ**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Studijní program:	Dřevařské inženýrství
Pracoviště (katedra/ústav):	Katedra zpracování dřeva a biomateriálů
Vedoucí diplomové práce:	Ing. Adam Sikora, Ph.D.
Konzultant diplomové práce:	Ing. Petr Paul

Praha 2022

Bc. Ondřej Slavík

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta lesnická a dřevařská

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Ondřej Slavík

Dřevařské inženýrství

Název práce

Geometrické parametry při ohýbání dřeva a jejich vliv na charakteristiky ohýbání

Název anglicky

Geometrical parameters during wood bending and their influence on bending characteristics

Cíle práce

Práce se bude věnovat hlubšímu zkoumání ohybových charakteristik masivního dřeva s ohledem na jejich potenciální využití při tvorbě nových technologií ve vzájemné interakci s aktuálními omezenými přírodními zdroji a apelací na jejich efektivnější využívání. Prioritou je správně analyzovat vliv geometrie ohýbání na vybrané charakteristiky ohybových vlastností, které budou ovlivněny různými faktory a odlišným způsobem zkoušení. Pro výzkum jsme zvolili dřevo Buku lesního (*Fagus sylvatica* L.). Charakteristiky ohybových vlastností budou ovlivněny faktory jako je tloušťka materiálu (h) a vzdálenost podpěr (l_0). Dalším sledovaným faktorem bude způsob měření (aplikované metody na identifikaci hraničních bodů). Výsledky získané ohybovou zkouškou při tří bodovém ohybu budou porovnány s výsledky získanými ultrazvukovou metodou. Při destruktivní zkoušce tří bodovým ohybem, bude na identifikaci a kvantifikaci použita norma EN 310 (1993), takto získané výsledky budou porovnané s výsledky analýzy silově deformačního diagramu pomocí nástroje MATESS.

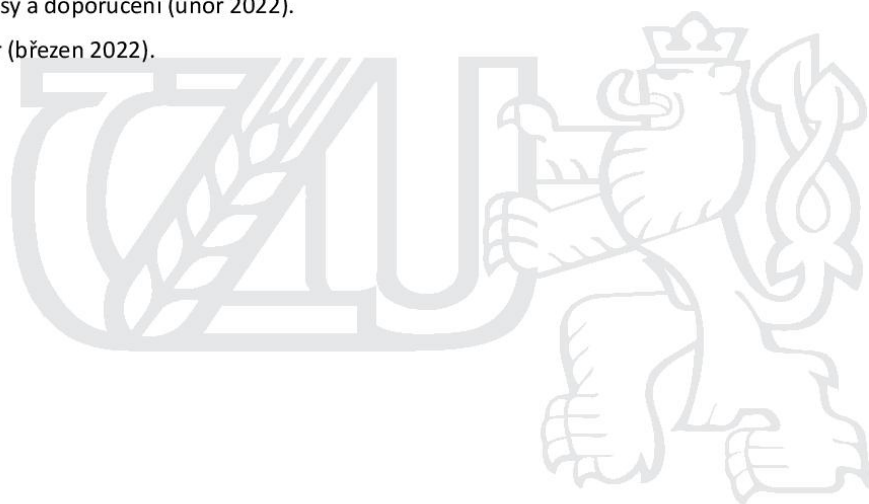
Metodika

1. Literární rozbor problematiky vlivu geometrie ohybu a metody stanovení mechanických vlastností.
2. Navržení metodiky tvorby zkušebních těles a jejich testování.
3. Experimentální zjištění vlivu geometrie ohybu na mechanické vlastnosti.
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 stran

Klíčová slova

Geometrie ohybu, trojbodový ohyb, nedestruktivní zkoušky

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
- Zemiar, J., Gáborík, J., Solár, M., a Kotrady, M. (2000). "Tvárnenie dreva ohýbaním," Technická Univerzita vo Zvolene, Zvolen, 70 pp. ISBN: 8022809306
-

Předběžný termín obhajoby

2021/22 LS – FLD

Vedoucí práce

Ing. Adam Sikora, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů

Konzultant

In. Petr Paul

Elektronicky schváleno dne 23. 9. 2021

doc. Ing. Roman Fojtík, Ph.D.

Vedoucí ústavu

V Praze dne 10. 12. 2021

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „Geometrické parametry při ohýbání dřeva a jejich vliv na charakteristiky ohýbání“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Adama Sikory, Ph.D. a použil jsem prameny, které uvádím v seznamu použitých zdrojů. Jsem si vědom, že zveřejněním diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách v platném znění, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Praze 7. dubna 2022

.....*Slavík*.....

Bc. Ondřej Slavík

Poděkování

Touto cestou bych chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce Ing. Adamovi Sikorovi Ph.D., za velkou ochotu a pomoc při zpracování této práce. Dále bych chtěl poděkovat doc. Ing. Milanovi Gaffovi PhD. a Ing. Petrovi Paulovi za nápomocné konzultace, za čas, který mi věnovali a za jejich cenné rady, které mi velmi pomohly vytvořit konečnou podobu této diplomové práce. Na závěr bych chtěl velmi poděkovat své rodině za podporu a trpělivost při studiu a vypracování této práce.

Abstrakt

Geometrie ohýbání se využívá při procesu tvarování dřeva. Metoda ohýbání je často používanou technologií ve stavebním a nábytkářském průmyslu, kterou můžeme vypořádat již z historie. V dnešní době, díky nové špičkové technologii, máme lepší možnosti a přesnější analýzy, z nichž se dozvídáme více informací ze získaných výsledků. Vhodnost dřeva k ohýbání můžeme hodnotit na základě různých kritérií, nejpodstatnější z nich jsou strukturální vlastnosti dřeva, geometrie a druh vstupního dřeva, jež vedou ke schopnosti daného prvku odolávat zatížení a z toho vyplývající ohybatelnosti. Ohýbatelnost dřeva můžeme vyjádřit prostřednictvím koeficientu ohybatelnosti, jehož vztah závisí na poloměru ohybu a na tloušťce materiálu. Teoretické vyjádření ohledně ohybatelnosti dřeva je stále v procesu studií a četných výzkumů. Tato práce byla zaměřena na aplikaci různých definic koeficientu ohybatelnosti a na analyzování vlivu vybraných geometrických parametrů na ohýbání jako je tloušťka tělesa a vzdálenost podpěr na jeho výslednou hodnotu.

Experimentální část práce se zabývá měřením nedestruktivní zkouškou, provedenou ultrazvukovým šířením vln, s následným výpočtem dynamického modulu pružnosti. Na základě dynamického modulu pružnosti bylo provedeno kvalitativní třídění. Následně byla zkušební tělesa vystavena destruktivnímu zkoušení. Práce je primárně zaměřena na destruktivní zkoušku provedena pomocí tříbodového ohybu. Výstupem této zkoušky byly pracovní diagramy, ze kterých byly následně vypočítány jednotlivé koeficienty ohybatelnosti na základě minimálního poloměru ohybu. Tyto vlastnosti byly zjišťovány na tělesech buku lesního (*Fagus sylvatica* L.) o tloušťkách materiálu (10 až 100 mm) s nastavením vzdálenosti podpěr, která odpovídala deseti násobku daného souboru těles. Z výsledků práce vyplývá, že úměrně měnící vzdálenost podpěr v interakci s tloušťkou měla vliv na hodnoty meze úměrnosti a pevnosti. Vliv na hodnoty koeficientu ohybatelnosti se projevil pouze do určité tloušťky zkušebních těles.

Klíčová slova: Geometrie ohybu, bukové dřevo, koeficient ohybatelnosti, tříbodový ohyb, nedestruktivní zkouška

Abstract

Bending geometry is used in the wood bending process. The bending method is a frequently used technology in the civil engineering and furniture industry, which is also apparent from history. Nowadays, thanks to state-of-the-art technology, we have access to more feasible opportunities to acquire more accurate analyses, and obtain more information from the results. The wood suitability for bending can be assessed by various criteria. The most fundamental of which are the structural properties of wood, geometry and type of the wood given. This helps us to learn more about the ability of a tested element to withstand the load, and further to observe and distinguish its bendability. The wood bendability can be expressed by the bendability coefficient that depends on the bending radius and material thickness. Theoretical formulation regarding the wood bendability is still under research. This thesis is to employ various definitions of the bendability coefficient and to analyse the effect of the selected geometrical parameters on the bending, such as the thickness of an element, and the support distance on its final value. The experimental part of this thesis deals with the measuring done through the non-destructive examination, carried out by the ultrasonic waves, with the following calculation of the dynamic bendability module. The calculation is though not the primary topic of this thesis, and it is mentioned but as a supportive feature. This measuring method was used for the qualitative selection of the experimental elements that were examined through the destructive examination. This work is primarily focused on a destructive examination performed by three-point bend. The outputs of this examination were working diagrams, from which the individual flexibility coefficients were subsequently calculated on the basis of the minimum bending radius. These properties were derived from beech specimens (*Fagus sylvatica* L.) with material thickness (10 to 100 mm) with the distance set between the supports. That corresponded to a tenfold of the given set of elements. The results of this thesis show that the proportionally changing distance of the supports in interaction with the thickness had an effect on the values of the limits of proportionality and firmness. The effect on the values of the bending coefficient became evident but to the extent of the certain thickness of the tested elements.

Keywords: Bending geometry, beech wood, bending coefficient, three-point bending, non-destructive test

Obsah

Úvod.....	16
1 Cíl práce	18
2 Historie a vývoj ohýbání dřeva.....	19
3 Plastifikace dřeva.....	22
3.1 Výběr vstupního sortimentu pro technologii ohýbání	22
3.2 Varianty procesů plastifikace.....	22
3.3 Vliv plastifikace na deformaci	24
3.4 Technologické podmínky plastifikace.....	24
3.5 Základní metody plastifikace	25
3.6 Hydrotermická úprava dřeva.....	25
3.7 Termická úprava dřeva	26
4 Technologie ohýbání	27
4.1 Ruční ohýbání	27
4.2 Strojní ohýbání.....	28
4.2.1 Ohýbačka s otočnou tvárnici	28
4.2.2 Rámová ohýbačka	29
4.2.3 Navíjecí stroj.....	30
5 Teorie ohybu dřeva.....	31
5.1 Ohýbatelnost dřeva.....	32
5.1.1 Koeficient ohybatelnosti.....	33
5.1.2 Minimální poloměr ohybu	34
5.1.3 Mez úměrnosti	35
5.1.4 Mez pevnosti.....	36
5.2 Vliv geometrie na ohyb	36
5.3 Pružnost dřeva.....	39
5.4 Pevnost dřeva	40
5.4.1 Pevnost v tlaku.....	41
5.4.2 Pevnost ve smyku.....	42
5.4.3 Pevnost v ohybu.....	42
5.4.4 Pevnost v tahu.....	44
5.5 Vliv struktury dřeva.....	44
5.6 Vliv hustoty na ohyb	45

5.7	Vliv vlhkosti dřeva namáhaného na ohyb	46
6	Rozměrová stabilizace	48
6.1	Změna objemové hmotnosti.....	48
6.2	Změna rovnovážné vlhkosti.....	48
6.3	Proces zvýšení rozměrové stability	49
6.4	Stabilizace a sušení.....	49
7	České dřeviny a jejich využití.....	51
7.1	Charakteristika Buku lesního (<i>Fagus sylvatica</i> L.).....	51
7.2	Vlastnosti bukového dřeva.....	52
7.3	Mikroskopická stavba testované dřeviny buku.....	53
7.4	Hospodářský význam Buk lesního	53
8	Metodika experimentální části	54
8.1	Výroba a příprava zkušebních těles.....	54
8.2	Klimatizace zkušebních těles	57
8.3	Měření šíření ultrazvukových vln	58
8.4	Ohybová zkouška	60
8.5	Výpočet daných charakteristik.....	62
8.5.1	Koeficient ohýbatelnosti.....	62
8.5.2	Minimální poloměr ohybu $R_{\min C}$	63
8.5.3	Minimální poloměr ohybu $R_{\min B}$	63
8.5.4	Síla na mezi úměrnosti	64
8.5.6	Síla na mezi pevnosti.....	65
9	Výsledky a diskuse.....	66
9.1	Výsledné hodnoty destruktivní a nedestruktivní metody	68
9.1.1	Napětí na mezi úměrnosti a pevnosti	69
9.1.2	Síly na mezi úměrnosti a pevnosti	70
9.1.3	Průhyb na mezi úměrnosti a pevnosti	72
9.2	Koeficient ohýbatelnosti a minimální poloměr ohybu	74
9.2.1	Koeficient ohýbatelnosti.....	74
9.2.2	Minimální poloměr ohybu.....	76
10	Závěr	78
11	Seznam použité literatury.....	82
12	Seznam příloh	89

Seznam ilustrací

Obrázek 1 Drezína, Německo - první záznamy 1818 (www.sterba-bike.cz, 2020)	19
Obrázek 2 Experimentální židle Thonet 1867 (thon.eu, 2020)	20
Obrázek 3 Továrna na ohýbaný nábytek v Koryčanech (www.truhlarskyportal.cz, 2020)	20
Obrázek 4 Klasifikace způsobů plastifikace podle druhu plastifikačního prostředku (Hlásková, 2018)	23
Obrázek 5 Deformační diagram - neplastifikované dřeva a plastifikované dřeva (Gandelová, 2005).....	24
Obrázek 6 Výroba ručně ohýbaného dílce (Ton.eu, 2020).....	27
Obrázek 7 Schéma ohýbacího stroje s otočnou tvárnicí (Vinter, 2014).....	28
Obrázek 8 Rámová ohýbačka (Hlásková, 2018).....	29
Obrázek 9 Ohýbací stroj k vytvoření uzavřených ohybů (Hlásková, 2018).....	30
Obrázek 10 Napětí a deformace při ohýbání dřeva (Hlásková, 2018).....	31
Obrázek 11 a) Napěťový deformační diagram; b) Plastická oblast (Gaff <i>et al.</i> , 2017a).....	33
Obrázek 12 Zásadní faktory ovlivňující ohyb (Jarošová, 2016).....	37
Obrázek 13 A) Testované těleso na ohyb, B) Těleso při zatížení,.....	37
Obrázek 14 Průměrné hodnoty modulů pružnosti a pevnosti ohybu řeziva a normalizovaných těles podle Požgaje (1997).....	38
Obrázek 15 Typy zatížení a) Tlak na celou plochu, b) podvalový tlak, c) tlak na část délky a šířky tělesa (Borůvka <i>et al.</i> , 2016).....	42
Obrázek 16 Zatížení dřeva v ohybu a - kolmo na vlákna v radiálním směru, b - kolmo na osu tělesa, c - podél vláken (Požgaj <i>et al.</i> , 1997)	43
Obrázek 17 Napětí na výšku tělesa (Požgaj <i>et al.</i> , 1997).....	44
Obrázek 18 Model závislosti modulu pružnosti na hustotě a vlhkosti (Požgaj <i>et al.</i> , 1997).....	47
Obrázek 19 Mikroskopická stavba buku - Příčný, tangenciální a radiální řez (Vavrčík, 2002).....	53
Obrázek 20 Řez zkušebních těles (Autor)	55
Obrázek 21 Schématické zobrazení tříbodového ohybu (Autor).....	56
Obrázek 22 Značení zkušebních těles (Autor).....	56
Obrázek 23 Klimatizační komora a pohled na zkušební tělesa (Autor).....	57
Obrázek 24 FAKOPP Ultrasonic Timer (Autor)	59
Obrázek 25 Schéma tříbodového ohybu podle EN 310	60
Obrázek 26 Trhací stroj Instrom v procesu zkoušky (Autor)	61

Obrázek 27 Znázornění meze úměrnosti (Autor)	64
Obrázek 28 Znázornění meze pevnosti (Autor).....	65
Obrázek 29 Interakce tloušťky a vzdálenosti podpěr na hodnoty meze úměrnosti	70
Obrázek 30 Interakce tloušťky a vzdálenosti podpěr na hodnoty síly na mezi úměrnosti a pevnosti (N)	71
Obrázek 31 Interakce tloušťky a vzdálenosti podpěr na hodnoty průhybu na mezi úměrnosti a pevnosti (mm).....	73
Obrázek 32 Interakce tloušťky a vzdálenosti podpěr na hodnoty koeficientu ohybatelnosti.....	75
Obrázek 33 Interakce tloušťky a vzdálenosti podpěr na hodnoty minimálního poloměru ohybu R_{minC} a R_{minB}	77
Obrázek 34 Vliv vzdálenosti podpěr (l_0) na hodnoty meze úměrnosti (MPa).....	95
Obrázek 35 Vliv vzdálenosti podpěr (l_0) na hodnoty meze pevnosti (MPa).....	95
Obrázek 36 Vliv vzdálenosti podpěr (l_0) na hodnoty síly meze úměrnosti (N).....	96
Obrázek 37 Vliv vzdálenosti podpěr (l_0) na hodnoty síly meze pevnosti (N).....	96
Obrázek 38 Vliv vzdálenosti podpěr (l_0) na hodnoty průhybů meze úměrnosti (mm).....	97
Obrázek 39 Vliv vzdálenosti podpěr (l_0) na hodnoty průhybů meze pevnosti (mm).....	97
Obrázek 40 Vliv vzdálenosti podpěr (l_0) na hodnoty koeficientu ohybatelnosti K_{ohC}	98
Obrázek 41 Vliv vzdálenosti podpěr (l_0) na hodnoty koeficientu ohybatelnosti K_{ohB}	98
Obrázek 42 Vliv vzdálenosti podpěr (l_0) na hodnoty minimálního poloměru ohybu R_{minC}	99
Obrázek 43 Vliv vzdálenosti podpěr (l_0) na hodnoty minimálního poloměru ohybu R_{minB}	99

Seznam tabulek

Tab. 1 Sesychání Buku lesního (<i>Fagus sylvatica</i> L.) (Křupalová, 2003).....	46
Tab. 2 Porovnání hodnot hustoty a sesychání buku.....	52
Tab. 3 Schéma zkušebních těles (Autor).....	55
Tab. 4 Průměrné hodnoty destruktivní a nedestruktivní metody.....	68
Tab. 5 Koeficient ohýbatelnosti Koh a minimální poloměr ohybu Rmin.....	74
Tab. 6 Porovnání účinků vzdálenosti podpěr pomocí Duncanova testu na hodnoty meze úměrnosti.....	90
Tab. 7 Porovnání účinků vzdálenosti podpěr pomocí Duncanova testu na hodnoty meze pevnosti.....	90
Tab. 8 Porovnání účinků vzdálenosti podpěr pomocí Duncanova testu na hodnoty síly meze úměrnosti.....	91
Tab. 9 Porovnání účinků vzdálenosti podpěr pomocí Duncanova testu na hodnoty síly meze pevnosti.....	91
Tab. 10 Porovnání účinků vzdálenosti podpěr pomocí Duncanova testu na hodnoty průhybu na mezi úměrnosti.....	92
Tab. 11 Porovnání účinků vzdálenosti podpěr pomocí Duncanova testu na hodnoty průhybu na mezi pevnosti.....	92
Tab. 12 Porovnání účinků vzdálenosti podpěr pomocí Duncanova testu na hodnoty koeficientu ohybu KohC.....	93
Tab. 13 Porovnání účinků vzdálenosti podpěr pomocí Duncanova testu na hodnoty koeficientu ohybu KohB.....	93
Tab. 14 Porovnání účinků vzdálenosti podpěr pomocí Duncanova testu na hodnoty minimálního poloměru ohybu RminC.....	94
Tab. 15 Porovnání účinků vzdálenosti podpěr pomocí Duncanova testu na hodnoty minimálního poloměru ohybu RminB.....	94

Seznam zkratek a značek

BNV - bod nasycení vláken

ČSN - česká technická norma

EN - evropská norma

F - síla

F_E - mez úměrnosti

F_P - mez pevnosti

Y_E - průhyb na mezi úměrnosti

Y_P - průhyb na mezi pevnosti

K_{oh} - koeficient ohýbatelnosti

R_{min} - minimální poloměr ohybu

LOP - mez úměrnosti

LR - radiální rovina

LT - tangenciální rovina

MH - mez hygroskopicity

MOE - modul pružnosti

MOR - pevnost v ohybu

RT - příčná rovina

VC - variační koeficient

σ - napětí

l₀ - vzdálenost podpěr

Úvod

Člověk již od dávných věků využívá dřevo ke svým potřebám, díky jeho jedinečných vlastností a mnohostrannému využití. Větší technologický vývoj práce se dřevem, z historických záznamů, byl již ve starověkém Egyptě, kde se pomocí ohybu dřeva vyráběly, ve své době, nevídané nákladní lodě (Bodig, 1993). Technologie ohýbání se v průběhu času rozvíjela i v oblasti výroby nábytku. Už v 17. století se můžeme setkat s ohýbaným nábytkem (Uhlíř, 2001). Ohýbané prvky se vyskytly hlavně u sedacího nábytku, kde můžeme vidět zdobená ohýbaná opěradla židlí nebo nohou židlí, či stolů. Mezi nejznámější průkopnický nábytek patří Windsorské židle, které pochází z Anglie (Stevens, 2007). Typickým znakem jsou ohýbané opěrné části. Zásadní rozvoj technologie ohýbaného nábytku nastává v době Biedermeieru, kdy přicházel se svými experimenty ohýbání dřeva Michael Thonet. Počátek jeho experimentů nastal v roce 1830 a věnoval se výzkumu až do zahájení průmyslové výroby v letech 1857 až 1860 (Nemec *et al.*, 1986; Uhlíř, 2011). Zásadním revolučním prvkem, při ohýbání masivních hranolků, je využívání ocelové pásnice, která výrazně zvýšila možnosti ohybu dřeva. Toto období je pro další vývoj ohýbaného nábytku zcela zásadní, a to jak z pohledu konstrukčního, typologického, tak i z technologického hlediska. Výroba ohýbaného nábytku je i v dnešní době velmi aktuální téma (Vegesack, 1987; Šimoníková, 1992).

Mezi základní technologie ohybu patří volný ohyb neplastifikovaného, či plastifikovaného dřeva s možností ohýbání pomocí pásnice (Požgaj *et al.*, 1997). Velikost ohybu je hodnocena pomocí koeficientu ohýbatelnosti. Tato materiálová charakteristika udává minimální poloměr ohybu, kterého je možné docílit ohýbáním vzhledem k tloušťce ohýbaného materiálu. Geometrické parametry i zásadně ovlivňují hodnoty K_{oh} při ohýbání. Mezi geometrické parametry, které představují rozměr testovaného tělesa a ovlivňují výsledný ohyb, patří například rozměry a tvar testovaného tělesa, vzdálenost podpěr a zvolení místa působící síly na těleso. Ale zároveň se musí vzít do úvahy všechny faktory ovlivňující ohybové charakteristiky (makroskopické, mikroskopické, submikroskopické znaky a i chemické složení) (Bodig, 1993). Ohýbatelnost, ale zároveň ovlivňuje druh dřeva, vlhkost tělesa při tvarování, hustota dřeva a velikost působící síly. Změnou rozměrů tělesa dojde i k ovlivnění síly na mezi úměrnosti F_E (N), síly na mezi pevnosti F_P (N), průhybu na mezi úměrnosti Y_E (mm) a pevnosti Y_P (mm) (Sikora *et al.*, 2019; Gaff *et al.*, 2015).

V dřevozpracujícím průmyslu jsou neustále zkoumány technologie pro snížení nežádoucích vlastností dřeva i o rozšíření aplikovatelnosti dřeva nekonvenčními způsoby. Vstupní materiál je zásadní proměnná ovlivňující výrobní proces, protože materiál mění kvantitativní a kvalitativní vlastnosti konečného produktu (Kurjatko *et al.*, 2010).

V experimentální části práce je popisováno šíření ultrazvukových vln, pomocí přístroje Fakopp ultrasonic timer, které napomohlo při výběru zkušebních těles. Poté následovalo analyzování ohybových charakteristik pomocí destruktivní zkoušky na tělesech z buku lesního (*Fagus sylvatica* L.), které byly namáhány tříbodovým ohybem. Toto destruktivní testování probíhalo na stroji Instron. Před testováním byla nastavena vzdálenost podpěr podle velikosti testovaného souboru. Bylo vytvořeno deset souborů po třiceti kusech pro větší přesnost výsledků. Získané hodnoty byly porovnávány s různými soubory zkušebních těles a byl zkoumán vliv geometrie testovaného tělesa na ohybové charakteristiky. Hlavní přínos této práce je analyzování chování sledovaných ohybových charakteristik při úměrně se měnících rozměrech zkušebních těles.

1 Cíl práce

Hlavním cílem této diplomové práce bylo analyzování ohybu dřeva a identifikace významnosti geometrie neboli tvaru tělesa a pozice zatěžovacího břemene. K naplnění takto formulovaného cíle bylo nevyhnutelné stanovení faktorů a jejich úrovní. Sledované faktory byly tloušťka materiálu „h“ (10 - 100 mm), vzdálenost podpěr „l₀“, která odpovídala při testování desetinásobku tloušťky daného souboru. Konstantní šířka všech těles byla 20 mm. Cíle bylo dosaženo po experimentálním testování zkušebních těles rozdělených podle výše uvedených faktorů a jejich úrovní. Analýza byla provedena porovnáním parametrů ohybu, jako jsou koeficienty ohýbatelnosti, napětí na mezi úměrnosti a pevnosti a jim odpovídající průhyby a síly.

2 Historie a vývoj ohýbání dřeva

Prvotní dochované záznamy o pokusy ohýbání dřeva sahají až několik tisíc let před Kristem a vztahují se hlavně na stavby ohýbaných žeber konstrukcí lodí. Tato činnost se prováděla standardně nahříváním nad otevřeným ohněm (Nemec *et al.*, 1986).

Hlavním historickým nedostatkem bylo, že technologie ohýbání dřeva se celá staletí vůbec nedokumentovala. Dochované zmínky o pokusech aplikace ohýbaných prvků na nábytku se datují až kolem roku 1710 v Anglii. Začaly se zde objevovat tzv. Windsdorské židle. Typickým ohýbaným prvkem byly především opěradla. V této době se i údajně začínaly zkoumat způsoby změkčování dřeva, aby bylo možné většího ohybu. Mezi nejvýznamnější osobnosti této doby, zabývající se technologií ohýbání dřeva, patří například Jean Josef Chapius (Navi a Sandberg, 2011).

Pro ohýbání dřeva bylo v dřívějších dobách nejběžnější využití jasanového dřeva změkčeného horkou vodou nebo párou, ale daly se vytvořit jen velmi mírné ohyby (Dostalík *et al.*, 2011). Tato technologie našla uplatnění v kolářství. Vedla ke vzniku honosných kočárů, vozíků, tricyklů, drezín, kostitřasů a mnoha dalších předmětů své doby, kde bylo zapotřebí kolo.



Obrázek 1 Drezína, Německo - první záznamy 1818 (www.sterba-bike.cz, 2020)

Metoda, jež je známá jako ohýbání dřeva, se objevila v 19. století a je přisuzována truhlářskému mistrovi Michaeli Thonetovi. V průběhu svého života se přestěhoval z rodného Boppardu v Porýní na Moravu a zde založil továrnu na specifický a všemi v dnešní době známý nábytek z ohýbaného dřeva. Počátek této slavné firmy začínal

snahou o ohýbání svazků dříví máčených v horkém kliču Michalem Thonetem okolo 1830. Kolem roku 1850 začíná s ohýbáním bukového masivu pro výrobu židlí (Uhlíř, 2011; www.prague-art.cz, 2020). „Demonstrační“ židle vznikla jako experiment a ukázka možností Thonetových technologií pro světovou výstavu v Paříži v roce 1867 (www.czechdesign.cz, 2020; ton.eu, 2020).



Obrázek 2 Experimentální židle Thonet 1867 (thon.eu, 2020)

Této technologii předcházela způsob uchycení kovového pásu, nazývaného jako pásnice, který se přikládá zásadně na vnější stranu ohybu. Nejvíce se osvědčily kovové zarážky, které udržují vnější stranu hranolku ve vymezené délce. Thonet objevil, že nejlépe se ohýbá bukové dřevo. Vytvořil první průmyslový návrh a založil průmyslový závod pro sériovou výrobu ohýbaného nábytku na Moravě (Bystřice pod Hostýnem a Koryčany) (Nemec *et al.*, 1986; Uhlíř, 2011).



Obrázek 3 Továrna na ohýbaný nábytek v Koryčanech (www.truhlarskyportal.cz, 2020)

V dnešní době se v praxi uplatňují dva způsoby ohýbání, a to tvarování pomocí patrice a matrice, jež se využívá při tvarování dílců s mírným ohybem. Druhý způsob ohýbání se realizuje na základě patentu M. Thoneta z roku 1841, který je založen na změně vlastností dřeva vlivem plastifikace a působení čelního tlaku při použití pásnice. Díky tomuto prvku se zvýší tvarovatelnost dřeva a lze jej ohýbat při menších poloměrech ohybu (Uhlíř, 2011).

Samostatnou kapitolou pro moderní dřevěné konstrukce je lepené lamelové dřevo, které se taktéž ohýbá do různých tvarů. Pomocí tohoto materiálu je možné stavět fascinující stavby kopulovitých a obloukových tvarů. Využití lze nalézt ve stavbě menších architektonicky zajímavých staveb, jako jsou altány, mostní konstrukce a lávky. Ve stavebnictví je ohýbané dřevo využíváno hlavně na stavbu zastřešení pro obytné a průmyslové stavby. Široké uplatnění najdeme také u chrámů, paláců a jiných historicky významných staveb (Dostalík *et al.*, 2011; Křupalová, 2002).

3 Plastifikace dřeva

Plastifikace je dočasná změna fyzikálně mechanických vlastností dřeva, při kterých jsou dosaženy optimální podmínky (teplota a vlhkost) pro ohýbání dřeva. Plastifikací se tedy docílí toho, že je možné dřevo ohnout, aniž bychom jej povrchově porušili (Zemiar *et al.*, 2009). Proces plastifikace je zpravidla doprovázen nevratnými změnami vlastností dřeva vznikajícími na základě změny chemického složení dřeva při reakcích plastifikačního prostředku se dřevem v daných podmínkách (Trebula, 1989).

3.1 Výběr vstupního sortimentu pro technologii ohýbání

Výběr vhodného dřeva pro ohýbání je velice důležitá prvotní činnost. Musíme zvolit takové, jež splňuje veškeré předpoklady pro tento proces. Optimální šířka letokruhu je přibližně 2 až 3 mm, nejvhodnější je dřevo staré do 80 let. Podmínkou je i nízký obsah jarního dřeva (Trávník, 2008). Požadavky jsou například kolmost řezu u čel, minimální odklon vláken, hladkost opracování. Dřevěný prvek musí být zcela bez vad. To znamená, že nebude obsahovat zlomy, suky ani trhliny. Hraniční možnost výskytu drobných suků do průměru 5 mm, bez narušení estetických požadavků na výrobek. Odklon vláken v rovině ohybu musí být maximálně 3 až 4°, v boční rovině může být až 10°. Vlnitý průběh letokruhů nebo opravy zátkami nejsou dovoleny (Trebula, 2002).

Nepravé jádro může být až do jedné třetiny přířezu. Při ohybu by se měla bělová část nacházet na tahové straně. Další důležitá věc, na které záleží, je i druh dřeva. Jako nejvhodnější se jeví listnaté dřeviny. Mezi nejvhodnější je považováno bukové dřevo. Použit lze také dub, jasan nebo jilm. Jehličnaté dřevo se nedoporučuje, jelikož se při ohýbání často láme a nelze jej tvarovat do větších průhybů. Může za to náhlá změna mechanických vlastností tohoto druhu dřeva (Nutsch *et al.*, 1999).

3.2 Varianty procesů plastifikace

Dřevo je možné plastifikovat několika rozdílnými způsoby a prostředky. Hlavní plastifikační prostředky u klasifikovaných způsobů plastifikace jsou uvedeny v Obrázku 4. Každý ze způsobů plastifikace se provádí za specifických podmínek (teplota, tlak, rychlost proudění vzduchu, výkonová hustota elektromagnetického pole, relativní vlhkost vzduchu, atd.) (Trávník, 2008).



Obrázek 4 Klasifikace způsobů plastifikace podle druhu plastifikačního prostředku (Hlásková, 2018)

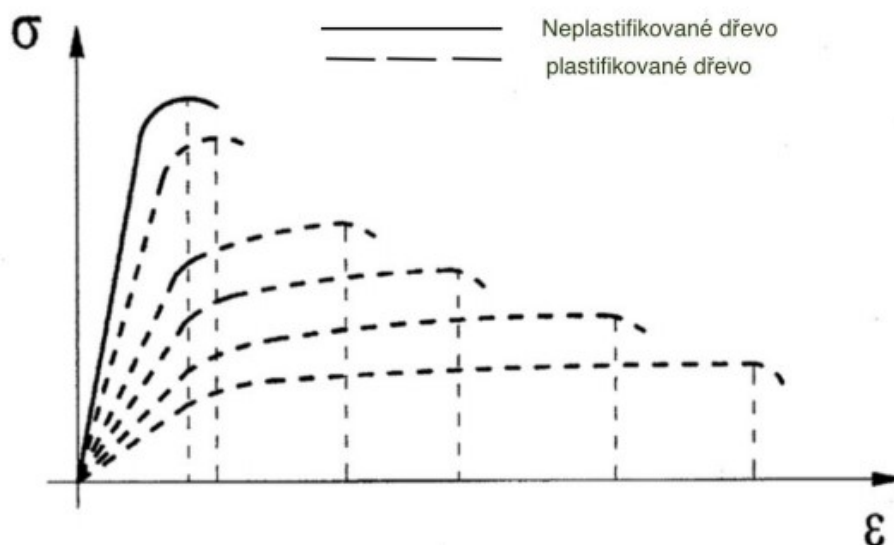
- tepelné zpracování dřeva pařením nebo vařením za zvýšené vlhkosti (nejstarší způsoby),
- aplikace chemických látek (amoniaku) do dřeva (pouze ve výjimečných případech),
- vysokofrekvenční nebo mikrovlnný ohřev dřeva (moderní metody) (Zemiar, 2009).

Mikrovlnný ohřev přináší mnoho zajímavých výhod, jež jsou například urychlení procesu, malá spotřeba energie, snadná regulace teploty, úspora místa a zároveň je i šetrnější k životnímu prostředí (Gašparík, 2008). Gašparík a Gaff (2013) zkoumali, jaký postup je lepší při procesu plastifikace. Z jejich naměřených výsledků vyplývá, že vhodnou metodou je mikrovlnný ohřev s dobou trvání v rozsahu dvou až čtyřech minutách. Při šesti minutách dochází k překročení 100 °C a dochází ke zhoršení vlastností. Z výsledků nebyl zaznamenán významný dopad orientace zkušebních těles. Obsah vlhkosti, potřebný pro plastifikaci, se zvyšoval s velikostí zkušebního tělesa. Výsledkem tohoto výzkumu bylo zjištěno, že důležitým faktorem je teplota. Optimální změkčení buku je s počáteční vlhkostí 40 % a dobou plastifikace v trvání 4 minut. Orientace zkušebních těles během procesu nebyla důležitá, jelikož nijak neovlivňovala proces plastifikace.

3.3 Vliv plastifikace na deformaci

Prodlužování času páření, tj. udržování dřevěného dílce při dané vlhkosti a teplotě, způsobuje nežádoucí ztmavnutí barvy, deformace tvaru, vyšší hodnoty bobtnání vysušených tvarovaných dílců při styku s vlhkostí (Kúdela, 2009). Podrobněji se určením doby plastifikace zabýval například Trávník (2008).

V procesu plastifikace klesá modul pružnosti a je snižována pružná deformace, zároveň dochází i ke zmenšení vnitřního napětí. Naopak dochází ke zvýšení plastické deformace. Základní cíl plastifikace je graficky znázorněn na Obrázku 5 (Gandelová, Šlezingerová, 2005). V tomto grafickém znázornění je vidět závislost napětí na deformacích. Pro porovnání je zde zohledněn rozdíl výsledných hodnot pro plastifikované a neplastifikované dřevo.



Obrázek 5 Deformační diagram - neplastifikované dřeva a plastifikované dřeva (Gandelová, 2005)

3.4 Technologické podmínky plastifikace

Nejvhodnější dřeviny pro ohýbání jsou listnáče. Nicméně plastifikovat a tvarovat se dají všechny dřeviny (listnaté i jehličnaté). Jehličnany, mají ovšem podstatně nižší možnosti tvarování a stabilizace tvarů (Gáborik *et al.*, 2004).

Jehličnaté dřeviny se vyznačují výraznými letokruhy a šířkovými rozdíly jarního a letního dřeva, což znamená rozdílnou hustotou mezi jarním a letním dřevem. Další nevýhodou jehličnatého dřeva je větší obsah ligninu, který je v procesu plastifikace

klíčový, a menším podílem pentózanů. Tyto charakteristiky jehličnatého dřeva se jeví jako méně vhodné pro proces tvarování (Horáček, 2008).

Dělení podle použité metody a charakteru plastifikačního činidla:

1. Hydrotermická plastifikace.
 - Přímé paření, nepřímé paření, vaření, vlhký vzduch.
2. Chemická plastifikace.
 - Plynný amoniak, kapalný amoniak, amoniová voda, močovina.
3. Elektromagnetická plastifikace.
 - Vysokofrekvenční elektrický proud, ultrazvuk (Trávník, 2008).

3.5 Základní metody plastifikace

Mezi základní metody procesu plastifikace patří:

- tepelné zpracování dřeva pařením nebo vařením za zvýšené vlhkosti (nejstarší způsoby),
- aplikace chemických látek (amoniaku) do dřeva (pouze ve výjimečných případech),
- vysokofrekvenční nebo mikrovlnný ohřev dřeva (moderní metody) (Požgaj *et al.*, 1997).

Pro klasickou metodu pařením je důležité, aby vlhkost odpovídala MH. Obecně lze říci, že vlhkost je jeden z nejdůležitějších parametrů. Vlhkost se při jednotlivých metodách plastifikace výrazně projevuje. Je důležitá jako plastifikační činidlo. Nevýhodami ohýbání dřeva jsou však složité technologické procesy a vysoká finanční náročnost (www.drevostavitel.cz, 2020).

3.6 Hydrotermická úprava dřeva

Do tohoto procesu úpravy dřeva vstupuje horká voda a vzduch, jež má za následek změnu objemové hmotnosti a změnu vlhkosti. Při působení tepla a vody na bukové řezivo dochází v procesu paření nebo vaření k úbytku jeho hmotnosti. Tento úbytek je vyvolán hydrolyzou hemicelulóz, extrakcí nízkomolekulárních fragmentů v ligninu

a částečně i amorfního podílu celulózy. Při chemických rozborech kondenzátu vzniklého v průběhu paření bukového řeziva byl zjištěn vysoký podíl kyseliny octové z organických kyselin a v menším množství kyseliny mravenčí. Pokles hmotnosti a změna objemové hmotnosti bukového řeziva závisí na jistých podmínkách, například na teplotě paření a času probíhajícího procesu (Trávník, 2008). Při atmosférickém paření s teplotami do 100 °C je úbytek menší, k většímu úbytku dochází při tlakovém napaření s teplotami nad 120 °C, kdy hodnoty úbytku dosahují 5 až 7 %. Obecně literatura uvádí, že k větším ztrátám hmotnosti a objemové hmotnosti dochází u tvrdého dřeva než u měkkého (Hill, 2006).

V průběhu paření se mění vlhkost dřeva a rozložení vlhkosti na průřezu. Tyto změny závisí na podmínkách paření a na vlhkosti dřeva před pařením. Pokles vlhkosti je dán hydrolyzou probíhající ve dřevě. K poklesu rovnovážné vlhkosti dochází v důsledků hydrolyzačních změn v buněčných stěnách, a to v hydrofilních substancích. V případě částečného vyluhování pektinových substancí obsahující karboxylové skupiny z primární stěny a vnější vrstvy sekundární stěny střední lamely v průběhu paření má za následek snížení hygroskopicity dřeva, díky tomu méně navlhá (Trebula, 2002).

3.7 Termická úprava dřeva

V případě volby tepelné úpravy za účelem zlepšení rozměrové stability, je důležité vědět, jakých výsledků bude dosaženo. Při samotné reakci dochází k významným změnám ve struktuře a chemickém složení dřeva za pomoci vysoké teploty v rozmezí 160 až 220 °C. Důležitým parametrem při reakci je také samotná doba reakce, která ovlivňuje výsledné vlastnosti materiálu. Tato doba se pohybuje v rozmezí 15 minut až 24 hodin (Hill, 2006). Velmi důležité během celého procesu je, aby při tepelné úpravě nedocházelo k vniknutí kyslíku do komory, protože by mohlo dojít až ke vzplanutí dřeva. Při této tepelné úpravě dochází ke snížení rovnovážné vlhkosti dřeva až o 50 %. Díky tomu dochází také k výraznému zlepšení rozměrové stability, a to v rozsahu 50 až 90 %. Je to dáno tím, že při těchto vysokých teplotách dochází ke snížení počtu hydroxylových skupin, které na sebe vážou vodu (Militz, 2002).

4 Technologie ohýbání

Rozlišují se dva základní druhy ohýbání, mezi něž patří ruční, kterým lze vytvářet nepravidelné tvary vícekrát ohnuté. Druhá metoda je strojní ohýbání, s nímž lze vytvářet jednoduché ohyby uzavřené nebo otevřené v jedné rovině (Trebula, 2002).

4.1 Ruční ohýbání

Tento způsob ohybu se provádí při výrobě složitých prostorových ohybů, které nelze strojně mechanizovat. Jedná se o velmi fyzicky namáhavou, z toho důvodu i málo produktivní techniku. K tomuto procesu je tedy zapotřebí nejen značná zkušenost a zdatnost pracovníka, ale i fyzická síla. Při ručním ohýbání se dají ohnout lišty do tloušťky cca 20 mm (Trávník, 2007). Na silnější se používají speciální přípravky s tvárnici, k níž se hranolek postupně ohýbá a připevňuje, případně se používají válcové strojní ohýbačky (Hlásková, 2018).



Obrázek 6 Výroba ručně ohýbaného dílce (Ton.eu, 2020)

4.2 Strojní ohýbání

Ohýbačky bez pásnice: Vznikají velké poloměry ohybů.

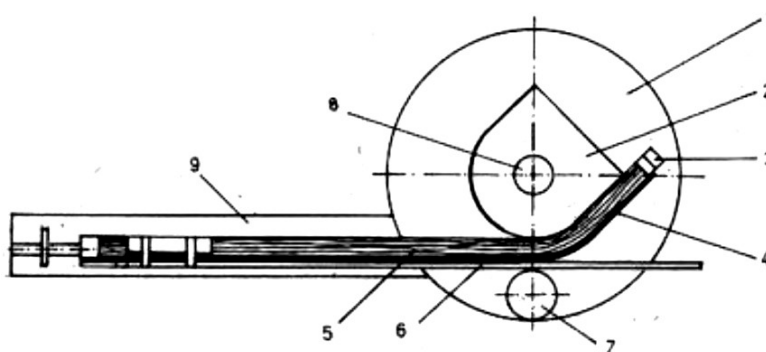
Ohýbačky s pásnicí:

- rámové (saně, hokejky, luby a trnože židlí, loketníky křesel),
- pákové (nohy židlí),
- kolenové s otočnou tvárnici (násady lopat, dužniny sudů),
- navíjecí (držadla holí, sedadlové rámy, kruhové výztuže) (Trebula, 2002).

Pásnice se napínají na vnější stranu ohybu. Tloušťka pásnice se pohybuje v rozmezí od 1,2 do 2mm a na konce pásnic se připevňují kovové zarážky, aby nedocházelo ke smykovému napětí při procesu ohýbání. Další důležitou částí stroje jsou tvárnice, ta se může označovat i za jistý druh formy, na kterou se navíjí nebo přes niž se ohýbá jeden nebo i více napařených hranolků (Trávník, 2007).

4.2.1 Ohýbačka s otočnou tvárnici

Jedná se o strojní zařízení typické pro uzavřené ohyby, zpravidla se používá na sedadlové rámy, výztuže a trnože. Stroj se skládá ze stojanu, elektromotoru, převodového mechanismu, tvárnice s možností výměny, posouvacího a ohýbacího vozíku, viz Obrázek 7. Důležitý prvek je i přitlačné zařízení. Otočná tvárnice má možnost otáčení až 400°. Díky této funkci se zajistí překrytí konců ohybu. Ohyby se rovněž po zajištění tvaru vkládají do sušárny. Pásnice se zajišťuje zajišťovací tyčí a svorkami (uzavřené ohyby) (Vinter, 2014).



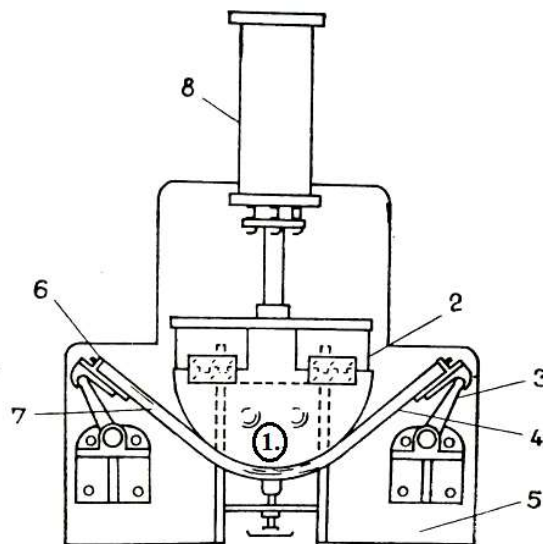
Obrázek 7 Schéma ohýbacího stroje s otočnou tvárnici (Vinter, 2014)

Popis ohýbacího stroje s otočnou tvárnicí:

- | | |
|------------------|------------------------------|
| 1. Ohýbací stůl | 6. Vodící rameno |
| 2. Tvárnice | 7. Odpružený přítlačný válec |
| 3. Zarážka | 8. Hřídel ohýbacího stroje |
| 4. Pásnice | 9. Vedení |
| 5. Ohýbaný dílec | |

4.2.2 Rámová ohýbačka

Tento druh ohýbacího stroje má velké zastoupení ve výrobě otevřeného ohybu, jež je typický pro výrobu sedáků, různých opěráků a nožních prvků (trnoží). Stroj funguje na principu přitlačení tvárnice na plastifikovaný dílec s pásnicí, a poté se provádí asymetrický ohyb. Velkou výhodou je například schopnost ohýbání více dílců najednou v široké pásnici, z důvodu využití celé pracovní šíře stroje. Pásnice se zajišťuje pomocí spon a kovových zarážek. Rám stroje se skládá ze svařované konstrukce s vodícími sloupy, po nichž se pohybuje upínací deska, která je vedena v bronzových pouzdrech. Posuv je zajištěn pomocí šroubového mechanismu a elektromotoru. Tyto tvárnice mohou být vyhřívané nebo nevyhřívané (Vaněk, 1952; Hlásková, 2018).



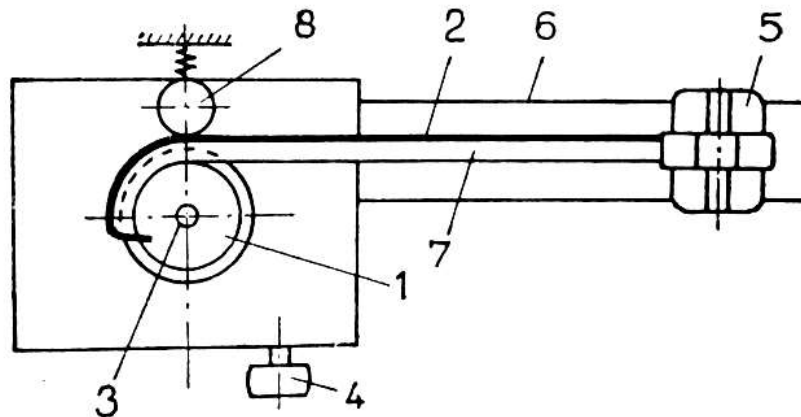
Obrázek 8 Rámová ohýbačka (Hlásková, 2018)

Popis rámové ohýbačky:

- | | |
|-------------------|----------------------------|
| 1. Tvárnice | 5. Stacionární lože stroje |
| 2. Závěs tvárnice | 6. Koncová zarážka |
| 3. Kovové rameno | 7. Ohýbaný dílec |
| 4. Pásnice | 8. Hydraulický válec |

4.2.3 Navíjecí stroj

Typické použití tohoto stroje je pro vznik uzavřených ohybů. Používá se například při výrobě sedáků a kruhových trnoží. Nevýhodou je potřeba velkého počtu tvárnice, což ovlivňuje negativně vstupní náklady a rychlost výroby (www.ton.eu, 2021).



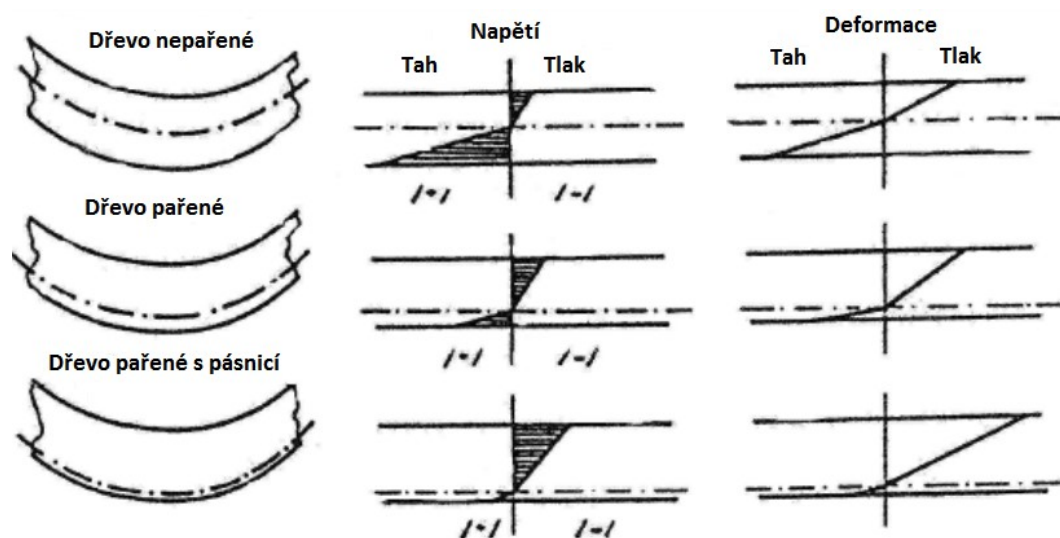
Obrázek 9 Ohýbací stroj k vytvoření uzavřených ohybů (Hlásková, 2018)

Popis navíjecího stroje:

- | | |
|---------------------|----------------------|
| 1. Tvárnice | 5. Vozík |
| 2. Pásnice | 6. Saně vozíku |
| 3. Hřídel | 7. Ohýbaný dílec |
| 4. Redukční soukolí | 8. Přítlačný váleček |

5 Teorie ohybu dřeva

Procesem ohýbání se projevují různé druhy napětí na ohýbaném prvku. Na vnější straně vzniká napětí tahové a na vnitřní napětí tlaková, viz Obrázek 10 níže. Dále se také projevují smyková napětí mezi jednotlivými letokruhy, a to mezi jarním a letním dřevem. Mezi těmito vrstvami je tzv. neutrální zóna, ve které je napětí nulové (Požgaj *et al.*, 1997). Podle působících kolmých napětí na průřezu vznikají i napětí smyková, které se snaží posunout vrstvy ohýbaného přířezu vzájemně vůči sobě. Ve vnitřní straně oblouku se dílec rozšiřuje a na straně vnější tahové se při ohýbání přířez zužuje. Tyto deformace ovlivňuje druh dřeviny, geometrie, poloměr ohybu, vlhkost přířezu. Protože má dřevo menší pevnost v tlaku než v tahu, posouvá se neutrální osa k vnější straně (Trebula, 2002).



Obrázek 10 Napětí a deformace při ohýbání dřeva (Hlásková, 2018)

Před samotným procesem tvarování je výhodnější dřevo plastifikovat. Plastifikace probíhá tak dlouho, až je dřevěný prvek zcela připraven pro ohnutí. Následuje po tomto procesu ohnutí dřeva do požadovaného tvaru. Po ukončení ohýbání je třeba dřevo stabilizovat sušením. Sušení těchto plastifikovaných dřevěných prvků zabezpečí schopnost udržet požadovaný tvar (Hájek, 1993).

V případě volného ohybu neplastifikovaného dřeva dochází k prodlužování vláken na vnější straně a vlákna na vnitřní straně ohybu se stlačují, ale pouze do určité meze.

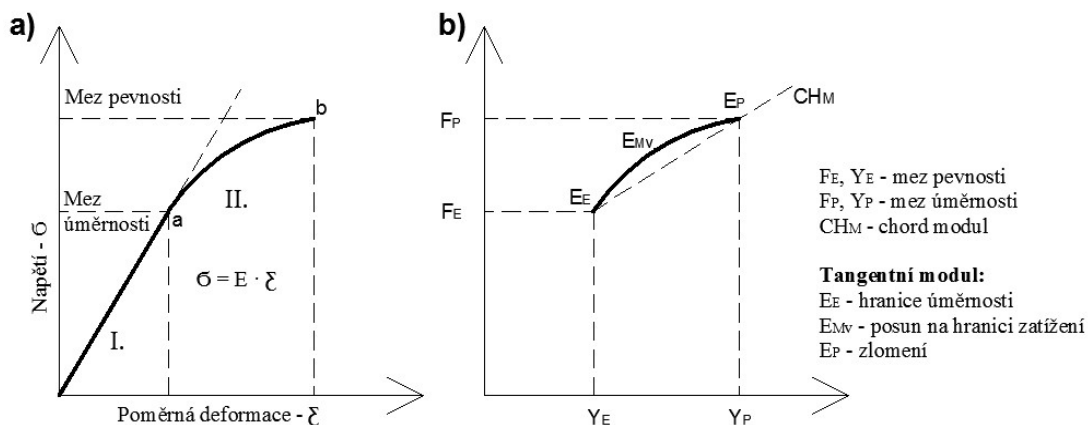
Neplastifikované dřevo není schopno prodlužovat, či zkracovat vlákna v dostatečné míře, případně odpovídajícího posuvu elementu po sobě bez porušení celistvosti testovaného tělesa. Při zátěžovém testování nastává typický deformační projev, který už není vratný do původního tvaru. Při zvýšení síly dochází k porušení celistvosti a ztráty odolnosti (Trebula, 2002; Hlásková, 2018).

5.1 Ohýbatelnost dřeva

Jedná se o beztrískový způsob tvarování, to znamená, že nedochází k odebrání materiálové hmoty. Mezi tyto způsoby se zahrnuje ohýbání, lisování a lamelování. Významnou vlastností dřeva je schopnost ohýbání. Tato vlastnost je jednou z nejvíce zkoumaných a různými modifikacemi vylepšovaná schopnost dřeva (Trávník, 2007). Míra ohýbatelnosti je vyjádřena koeficientem daným poloměrem tloušťky hranolku a poloměrem ohybu h/r . Dřevo je schopné se poměrně lehce deformovat při působení ohybového momentu (Gandelová *et al.*, 2012).

Ovlivňuje ji ale i velké řada faktorů, kterými jsou druh dřeviny, struktura dřeva, vlhkost jeho chemické složení a technologie přípravy k ohýbání (Křupalová, 2002). Ohybovou vlastnost lze zlepšit plastifikací pomocí vaření nebo paření dřeva (Gandelová *et al.*, 2012). Ohýbatelnost lze vyjádřit pomocí výpočtů ohybových charakteristik, které jsou v této práci zkoumány v experimentální části. Patří sem velikost elastické deformace (průhyb na mez úměrnosti - Y_E), úroveň maximální výchylky (průhyb na mez pevnosti - Y_P), ale i poměr elastické a maximální výchylky a napětí ($Y_E - Y_P$). Nesmí se zapomenout zohlednit síla na mez úměrnosti - F_E a síla na mez pevnosti - F_P . Ohýbatelnost dřeva je velmi závislá na tloušťce materiálu, nejčastěji se pro vyjádření této charakteristiky využívá poměr tloušťky materiálu k nejmenšímu dosažitelnému poloměru ohybu - R_{min} , který je nezbytný pro výpočet koeficientu ohýbatelnosti (Gaff *et al.*, 2015).

Tyto charakteristiky jsou znázorněny pomocí napět'ového deformačního diagramu na Obrázku 11, níže.



Obrázek 11 a) Napětí-úměrnostní diagram; b) Plastická oblast (Gaff *et al.*, 2017a)

Pro praktické zkoušky, co se ohýbání tyče, používá poměr h/r . Maximální možná veličina je označována jako kritický ohyb. Literatura nejčastěji uvádí přibližné hodnoty poměru h/r bez pásnice: $0,015 - 0,03 >$ suché nepařené dřevo; $0,02 - 0,1 >$ pařené dřevo; $0,03 - 0,13 >$ vařené dřevo. Čím větší je hodnota koeficientu, tím má dřevo vyšší schopnost k ohybu (Dejmal, 1995). Například pokud se jedná o koeficient ohýbatelnosti s výslednou hodnotou 0,1, tak lze hranolek o tloušťce 20 mm bezpečně ohnout až na poloměr 200 mm bez porušení (Křupalová, 2002).

Druhý pojem je tzv. bezpečný ohyb, jenž vyjadřuje vztah $h/2r$, který vyjadřuje jistotu, že nedojde k porušení materiálu. Hodnoty pro pařené dřevo jsou: 0,7 - buk, akát 0,5 - jilm, třešeň 0,4 - dub, jasan 0,03 - smrk. Výše uvedené hodnoty říkají, že při zvětšování tloušťky dílce se bude rádius ohybu zvětšovat (Dejmal, 1995). S větší tloušťkou materiálu klesá hodnota koeficientu ohýbatelnosti a stoupá síla potřebná k ohnutí (Gaff, 2015b). Ohýbatelnost lze vyjádřit pomocí vzorců, viz Kapitola 5.1.1.

5.1.1 Koeficient ohýbatelnosti

Literatura uvádí, že s rostoucí tloušťkou ohýbaného prvku se snižuje hodnota koeficientu ohýbatelnosti. Zároveň platí, že s rostoucí velikostí testovaného tělesa je nutno vyvinout pro docílení ohybu větší síla. Koeficient ohýbatelnosti je bezrozměrná veličina daná poměrem výšky (h) ohýbaného materiálu a minimálního poloměru ohybu R_{\min} (Požgaj *et al.*, 1997):

$$k_{oh} = \frac{h}{R_{min}} \quad (1)$$

kde:

k_{oh} ... koeficient ohýbatelnosti,

h ... výška tělesa (mm),

R_{min} ... minimální poloměr ohybu (mm).

Tato rovnice je považována za základní výpočet koeficientu ohybatelnosti. V současné době se aplikují dva způsoby pro výpočet koeficientu ohybatelnosti, viz rovnice 2 a 3 níže. Rovnice 2 vychází ze základní a rovnice ohybu a rovnice 3 vychází z geometrie ohybu (Gaff *et al.*, 2017):

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

$$K_{ohC} = \frac{h}{R_{minC}} = \frac{h}{\frac{l_0^2}{12 \cdot y_{max}}} \quad (3)$$

5.1.2 Minimální poloměr ohybu

Pro výpočet koeficientu ohýbatelnosti je třeba znát minimální poloměr ohybu R_{min} , který lze vypočítat dvěma způsoby:

1. Pro výpočet koeficientu ohybatelnosti, založeného na odvození ze základní rovnice ohybu byl použit vzorec (4), který byl převzat z práce (Gaff *et al.*, 2017):

$$R_{minB} = \frac{l_0^2}{8 \cdot y_{max}} + \frac{y_{max}}{2} - \frac{h}{2} \quad (4)$$

kde:

l_0 ... vzdálenost spodních podpěr (mm),

y_{max} ... maximální průhyb (mm),

h ... tloušťka testovaného tělesa (mm),

R_{minB} ... minimální poloměr ohybu (mm).

-
2. Další možností pro výpočet koeficientu ohybatelnosti, založeného odvozením na základě geometrie ohybu pomocí vzorce (5), který byl převzat z práce (Gaff *et al.*, 2017):

$$R_{\min c} = \frac{l_0^2}{12 \cdot y_{\max}} \quad (5)$$

kde:

l_0 ... vzdálenost spodních podpěr (mm),

y_{\max} ... maximální průhyb (mm),

$R_{\min c}$... minimální poloměr ohybu (mm).

5.1.3 Mez úměrnosti

Síla působící na těleso vytváří průhyb, jenž charakterizuje hranici, za kterou začíná mít dřevo elastickou deformaci v průběhu času a zároveň plastickou deformaci. Síla na mezi úměrnosti je taková síla, kterou je třeba vyvinout k dosažení průhybu na mezi úměrnosti. Pod pojmem mez úměrnosti si můžeme představit těleso zatížené do určitého okamžiku, aby vznikla jen pružná deformace, tedy těleso je pouze pružně namáháno bez trvalých následků (Svoboda *et al.*, 2017).

Mez úměrnosti je vypočítána podle rovnice:

$$\sigma_{\dot{u}} = \frac{3F_E l_0}{2bh^2} \quad (6)$$

Kde:

$\sigma_{\dot{u}}$... mez úměrnosti (MPa),

F_E ... síla na mez úměrnosti (N),

l_0 ... vzdálenost podpěr (mm),

b ... šířka vzorku (mm),

h ... tloušťka vzorku (mm).

5.1.4 Mez pevnosti

Mez pevnosti (σ_{max}) nastává v tělese v případě zvýšení napětí nad mez úměrnosti, tedy napětí už není v tělese rozprostřeno rovnoměrně a deformační čára zakřivuje svůj tvar. Deformace jsou stále rostoucí a důsledkem působení se stávají plastickými. Po přerušení působení vnější síly už deformace nezaniknou. Působením napětí dojde i k porušení namáhaného tělesa. Dá se tedy říci, že je to nejvyšší hodnota napětí, kterou těleso vydrží bez svého porušení (Bodig, 1993; Požgaj *et al.*, 1997). Vztah pro maximální napětí meze pevnosti vypočteme podle ISO 13061-3 (2014):

$$\sigma_{max} = \frac{3F_{max}l_0}{2bh^2} \text{ (MPa)} \quad (7)$$

Kde:

F_{max} ... maximální působící síla (N),

l_0 ... vzdálenost mezi podporami (mm),

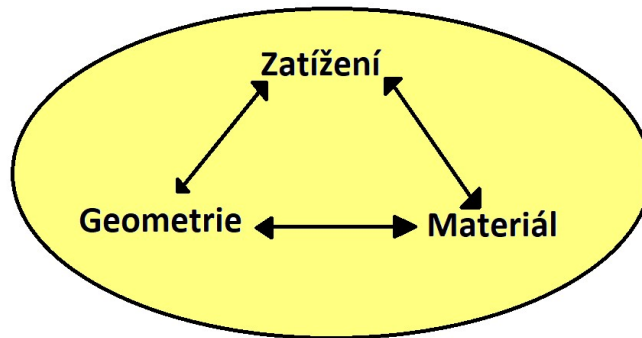
b ... šířka nosníku (mm),

h ... výška (mm).

5.2 Vliv geometrie na ohyb

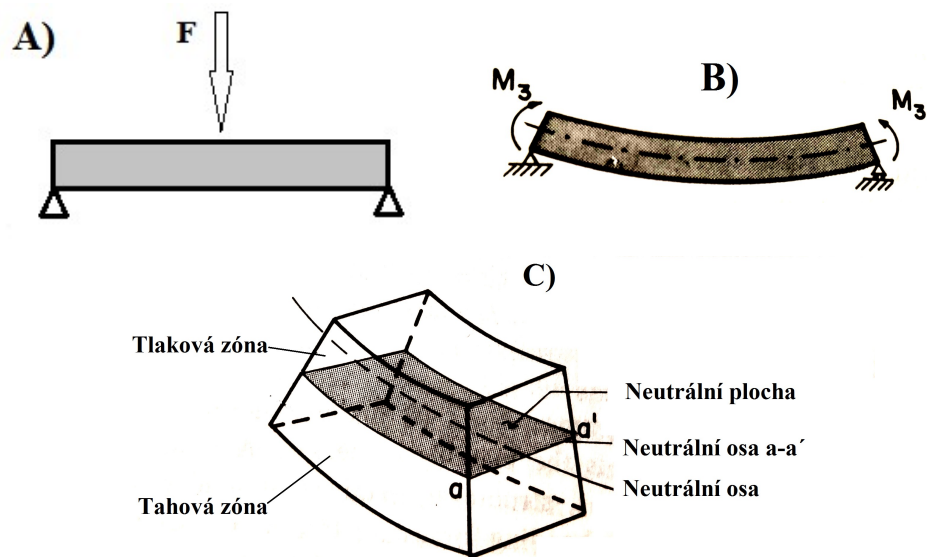
Pojem geometrie představuje rozměr testovaného tělesa, který zásadně ovlivní ohýbání. Hlavní faktory, které budou ovlivněny změnou geometrie, je například velikost síly potřebné k ohybu tělesa. Změnou rozměrů tělesa dojde i k ovlivnění síly na mezi pevnosti F_P (N), síly na mezi úměrnosti F_E (N), průhybu na mezi pevnosti Y_P (mm) a úměrnosti Y_E (mm) (Bodig, 1993).

Proces ohýbání je závislý na třech základních faktorech. Tyto proměnné můžou být nazvány jako trojúhelník stability, viz Obrázek 12, které mají statisticky významný vliv na zkoumané hodnoty při procesu ohýbání (Jarošová, 2016).



Obrázek 12 Zásadní faktory ovlivňující ohyb (Jarošová, 2016)

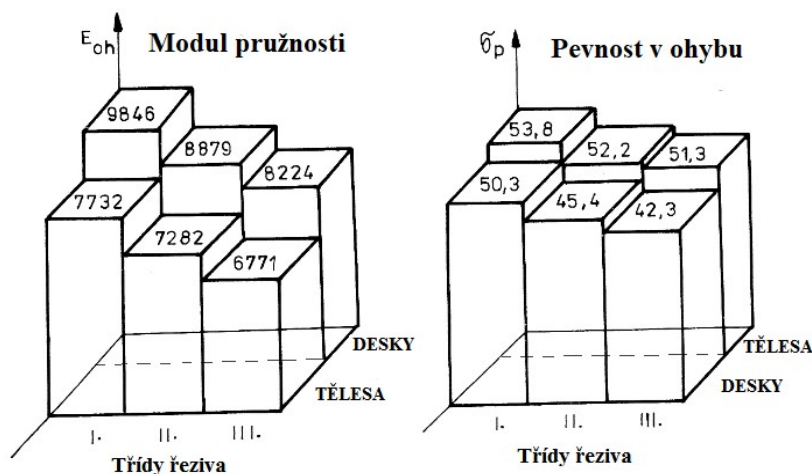
Pro lepší představu si můžeme představit libovolný nosník s požadovanými rozměry a pro porovnání nosníků o polovičních rozměrech. Z tohoto příkladu vyplývá, že bude docházet k rozdílným pevnostním charakteristikám. Musí se, ale zároveň vzít do úvahy všechny faktory ovlivňující tyto charakteristiky (struktura, materiál, rozměry testovaného prvku, tvar, atd). Při samotném procesu zatížení dochází zároveň ke změně geometrie testovaného tělesa. Vlákná na horní straně podléhají působícímu tlaku, zatímco vlákna na spodní straně jsou ve stavu tahu. U klasického ohybu se přepokládá, že každé podélné vlákno působí nezávisle na sobě. Vlivem zatížení dochází ke stavu, kdy se spodní strana testovaného tělesa začíná vychylovat ze svého původního tvaru a i ke změně tvaru neutrální osy v podélném směru, viz Obrázek 13 (c) (Bodig, 1993).



Obrázek 13 A) Testované těleso na ohyb, B) Těleso při zatížení, C) Změna geometrie tělesa (Bodig, 1993).

Zároveň s rostoucí velikostí prvku se projeví i větší pravděpodobností výskytu různých vad a strukturálních nerovností, jež významně ovlivní pevnostní charakteristiky. Menší prvky mají výhodu například v menším množství strukturálních vad, které mohou být způsobené procesem růstu dřeviny (kroucení, šikmost, velká rozdílnost mezi jarním a letním přírůstem dřeva). Jsou například i větší možnosti vzniku méně rozdílných prvků při vykrácení opticky přijatelného přířezu, z čehož vyplývá i větší přesnost výsledných sledovaných charakteristik a zároveň i vzniku menších odchylek při měření, či testování na ohyb (Bodig, 1993). Další způsob zjišťování strukturálních nedostatků může být pomocí ultrazvukové metody. Používá se například i při třídění řeziva nebo dřevotřískových desek do kvalitativních tříd (Požgaj *et al.*, 1997).

Pro detailnější porovnání byl zvolen příklad podle Požgaje (1997), srovnání normalizovaných těles a desek. Při porovnání těchto dvou prvků, jsou statisticky významné rozdíly. Z Obrázku č. 14 vyplývá, že desky mají větší hodnoty modulů pružnosti, ale naopak nižší hodnoty pevnosti v ohybu.



Obrázek 14 Průměrné hodnoty modulů pružnosti a pevnosti ohybu řeziva a normalizovaných těles podle Požgaje (1997)

Tyto rozdíly platí v porovnání těchto tří kvalitativních tříd. Při vyloučení faktoru vlhkosti při testování, jsou tyto rozdíly přisuzovány geometrii nebo také v tomto případě štíhlosti (šířce). Literatura udává, že při změně rozměrů šířky z 15 mm na 44 mm způsobí zvýšení hodnot modulu pružnosti v průměru o 20,5 %. Naopak ohybová pevnost se zvýší jen o 2,2 %. Z tohoto experimentu vyplývá, že změna rozměrů se

významně projeví na hodnotách modulu pružnosti, zatímco procentuálně méně ovlivní ohybovou pevnost (Požgaj *et al.*, 1997).

Za základní druhy mechanického namáhání je obecně považován tah, tlak, ohyb, smyk a krut. Mezi mechanické vlastnosti můžeme zařadit pružnost, pevnost, statická pevnost, pevnost v tlaku, pevnost ve smyku, pevnost v ohybu, pevnost ve vzpěru, dynamická pevnost, tvrdost dřeva, štípatelnost dřeva, ohýbatelnost dřeva, které jsou stručně popsány níže v práci (Bodig, 1993).

Z časového hlediska Babiak (2001) dělí namáhání na:

- a) statické zatížení, kdy je rychlost zatěžování menší, než rychlost šíření deformace;
- b) dynamické zatížení, kdy síla působí maximální hodnotou v krátkém časovém intervalu;
- c) kmitavé zatížení, kdy zatížení střídavě mění velikost, potažmo velikost a směr, které se dále dělí na pulzující a střídavé;
- d) trvalé zatížení, když síla působí dostatečně dlouho dobu buď konstantě, nebo kmitavě.

5.3 Pružnost dřeva

Modul pružnosti v ohybu je jednou ze základních charakteristik dřeva a parametrů pružnosti. Zjišťují se experimentálně za dodržení daných norem a na tělesech definovaných rozměrů (Požgaj *et al.*, 1997; Jarošová, 2016). Je vyjádřený mírou odporu materiálu, který klade během zatížení, a to tak, že čím vyšší je hodnota modulu pružnosti, tím je dřevo tužší a zároveň méně poddajné (Kafka, 1989). Zajímavostí je, že modul pružnosti s rostoucí vlhkostí klesá až do meze hygroskopicity. Při změně vlhkosti o 1 % se hodnota modulu v tahu a tlaku ve směru vláken změní o 2 %, v tahu a tlaku napříč vláken a ve smyku o 3 % a v ohybu o 1 % (Gandelová, 2012). Tento modul pružnosti je využíván například při určování průhybu nosníků a vzpěrné pevnosti štíhlých dřevěných sloupců (Kafka, 1989).

Deformace vzniklé pružností rozdělujeme do tří skupin:

1. Pružné deformace - ϵ_p
2. Deformace pružné v čase - $\epsilon_{\dot{c}}$
3. Plastické deformace - ϵ_{pl}

Pružná neboli vratná deformace znamená, že dřevo po ukončení procesu zatěžování se vrací částečně, ale i do původního tvaru. Modul pružnosti vyjadřuje napětí, při němž se v mezích pružnosti mění pevnostní parametry dřeva. Vyjádření působící síly je udáváno v MPa. Modul pružnosti se mění v závislosti na druhu dřeviny, vlhkosti, vadách dřeva a na objemové hmotnosti (Bodig, 1993). Zkouší se podle normy ČSN EN 408.

U pružnosti můžeme rozlišovat čtyři vlastnosti: modul pružnosti (E),
poissonovo číslo (μ),
mez úměrnosti (σ_u),
energie pružné deformace (W_p).

5.4 Pevnost dřeva

Charakterizuje odolnost dřeva vůči jeho trvalému porušení. Kvantitativně se pevnost vyjadřuje napětím, při kterém se poruší soudržnost tělesa - napětím na mezi pevnost σ_p . Pevnosti dřeva se zjišťují prostřednictvím zkoušek, kde se sleduje síla v okamžiku porušení tělesa. Jedinou výjimkou je pevnost dřeva v tlaku napříč vláken, která je definována jako konvenční pevnost, jelikož zde konečného porušení tělesa nelze dosáhnout (www.homel.vsb.cz, 2021).

Pro získání konkrétních hodnot a určení závažnosti mechanických vlastností bylo použito několik dřívějších výzkumů, které se touto problematikou zabývaly. Bylo zjištěno, že podle několika autorů mechanická vlastnost, která nejvíce klesá vlivem tepelné modifikace, je mez pevnosti v ohybu (Trebula, 2002; Čermák, 2014). Další mechanickou vlastností, na kterou má tepelná modifikace výrazný vliv je tvrdost. Standfest (2008) testoval tvrdost tepelně modifikovaného dřeva buku (*Fagus sylvatica* L.) a dubu (*Fraxinus excelsior* L.) při teplotách procesu v rozmezí 160 až 220 °C. Tvrdost byla měřena zkouškou pomocí ocelové kuličky o průměru 10 mm, při

specifické působící síle 1000 N. Výsledky ukázaly zvýšení tvrdosti při zkoušce v podélném směru u všech dřevin a všech výsledných parametrů. U radiální a tangenciální tvrdosti byly výsledky odlišné. U vyšších teplot modifikace byly hodnoty tvrdosti výrazně ovlivněny snížením tvrdosti.

Mez úměrnosti dřeva se ve většině případů stanovuje vizuálně z napětově deformačního diagramu. Přesně se určuje na základě plastických deformací dřeva, ale tento způsob určení je zdlouhavé a náročné na měřicí techniku. Tam, kde končí pružné deformace, nebo také nazýváno jako deformace pružná v čase, se nachází mez úměrnosti. Napětí, které odpovídá bodu odklonu od lineární části přímky, se u dřeva nazývá napětí na mezi úměrnosti - σ_u . Tento bod je nevyšší napětí ve dřevě, kdy ještě nevznikají plastické deformace (Požgaj *et al.*, 1997; Gandelová, 2012).

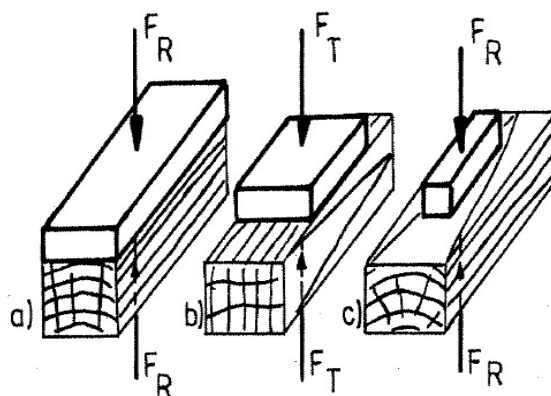
V případě překročení napětí meze úměrnosti, tak lineární úsek napětově deformačního diagramu se odklání a přechází do nelineárního průběhu. Důsledkem překročení je nárůst plastických deformací a deformací pružných v čase (Dubovský, 2001).

Pevnost dřeva může být dynamické nebo statické. Statická pevnost je pevnost v tahu a vyjadřuje odolnost dřeva proti působení síly, která se jej snaží prodloužit, při překročení meze pevnosti dřevo praská (Požgaj *et al.*, 1997). Pevnost v tahu se zkouší podle ČSN 49 0113 a ČSN 49 0114.

5.4.1 Pevnost v tlaku

Vyjadřuje odpor, který klade dřevo vnější síle, jež se snaží dřevo stlačit. Pevnost v tlaku se zkouší podle ČSN 49 0110 a ČSN 49 0112.

Modul pružnosti v tahu a tlaku je charakterizován jako podíl mezi napětím a poměrnou deformací. Gandelová (2012) udává průměrnou hodnotu modulu pružnosti v tahu a tlaku ve směru vláken pro domácí dřeviny 10 000 až 15 000 MPa při vlhkosti dřeva 12 %. O modulu pružnosti kolmo na vlákna uvádí, že hodnota je až 25x menší, přičemž v radiálním směru je o 20 až 50 % větší než v tangenciálním.



Obrázek 15 Typy zatížení a) Tlak na celou plochu, b) podvalový tlak, c) tlak na část délky a šířky tělesa (Borůvka *et al.*, 2016)

5.4.2 Pevnost ve smyku

Je odolnost dřeva proti působení vnějších sil, které se snaží posunout jednu část tělesa po druhé. Pevnost ve smyku se zkouší podle ČSN 49 0118.

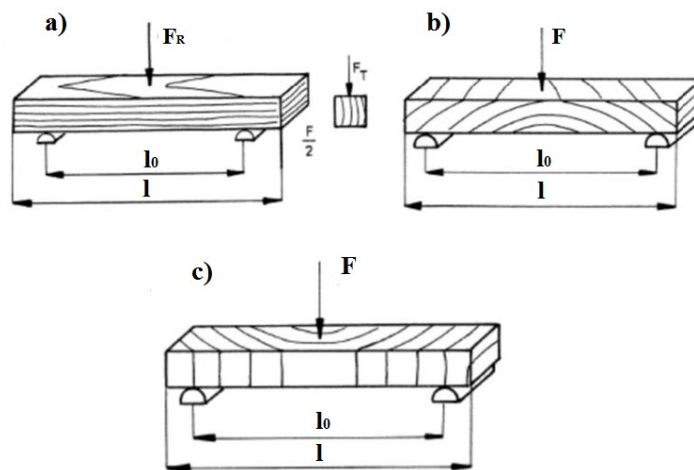
Modul pružnosti ve smyku napětí je zpočátku, podobně jako u jiných druhů napětí, lineární. Pro naše dřeviny uvádí Gandelová (2012) rozmezí výsledných hodnot od 100 až 2 000 MPa, při vzájemném poměru GLR:GLT:GRT $\sim 7,5:5:1$ až $10:9:1$.

5.4.3 Pevnost v ohybu

Vyjadřuje schopnost dřeva odolávat zatížení, je-li materiál podepřen a síla působí mimo tyto podpěry. Podle směru vláken jsou rozlišovány tři základní způsoby pro testování pevnosti v ohybu, a to zatížení dřeva kolmo na vlákna, v radiálním směru a zatížení dřeva průběžně s vlákny. Poslední způsob zatížení dřeva je kolmo na osu tělesa. Pevnost v ohybu je zkoušena podle ČSN 49 0115 (nosníky, stropní trámy, aj.). Podobně jako u tlaku, se pevnost dřeva v tahu rozlišuje na pevnost dřeva v tahu ve směru vláken a pevnost dřeva v tahu napříč vláken (radiální, tangenciální) (Gandelová, 2002).

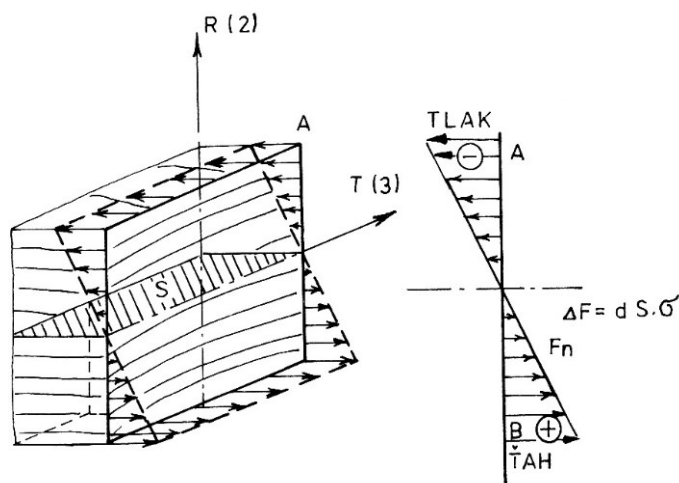
Pevnost dřeva v tahu napříč vláken je naopak jedna z nejmenších pevností dřeva. Průměrně dosahuje 1,5 až 5 MPa. Nízká pevnost v tomto směru je způsobena orientací vazebných buněk. Mez pevnosti v radiálním tahu je větší než v tangenciálním, z důvodu orientace dřeňových paprsků (Požgaj *et al.*, 1997). Trvalá pevnost dřeva je takové napětí, při kterém ani dlouhodobé zatížení nevyvolává poškození, či porušení materiálu.

Mezní napětí se nazývá mez trvalé pevnosti. Matovič (1993) udává, že její průměrná hodnota je 60 až 70 % meze pevnosti při statickém krátkodobém zatížení.



Obrázek 16 Zatížení dřeva v ohybu a - kolmo na vlákna v radiálním směru, b - kolmo na osu tělesa, c - podél vláken (Požgaj *et al.*, 1997)

Dalším způsobem může být napětí na výšku tělesa. Tento způsob nalezl velké uplatnění ze stavebnictví, kde se s tímto zatížením často setkáme (nosníky, trámy, lamelové nosné prvky). Při zatížení tohoto prvku můžeme vyzorovat specifický proces deformace, přičemž na horní (zatěžované) straně vzniká napětí tlakové a na spodní straně napětí tahové, viz Obrázek 17. Dále zde můžeme vyzorovat nedeformovanou část, kterou nazýváme neutrální vrstva (S). Při narůstání napětí zasahuje proces deformování další vlákna směrem k neutrální vrstvě. Současně dochází i k prodlužování vláken na spodní straně. V případě překročení meze úměrnosti, vznikají trvalé plastické deformace, neboli dochází k překročení meze pevnosti. Po překročení této meze dochází k porušení materiálu (Požgaj *et al.*, 1997).



Obrázek 17 Napětí na výšku tělesa (Požgaj *et al.*, 1997).

5.4.4 Pevnost v tahu

Tato pevnost je ve směru vláken v porovnání s ostatními pevnostmi největší a její průměrná hodnota pro naše dřeviny dosahuje hodnoty 120 MPa. Tato velká pevnost v tahu je dána především vláknitým tvarem buněk a strukturou buněčných stěn. Teoreticky by mělo být možné díky kovalentním vazbám v celulózovém řetězci dosáhnout pevnosti v tahu i 8 000 MPa (Gandelová, 2012; Požgaj *et al.*, 1997). Pevnosti v tahu jsou méně ovlivněny kolísáním vlhkosti než charakteristiky pevnosti v tlaku. Při zvyšování obsahu vlhkosti však dramaticky klesá pevnost v tlaku (Bodig, 1993). Vlastnosti se mohou lišit podle rozměrů materiálu. Zejména tahová pevnost dřeva bude klesat v závislosti na rostoucí délce (Green *et al.*, 1999).

Mezi hlavní faktory ovlivňující pevnost se nejčastěji řadí vlhkost, která se ve dřevě mění v závislosti na tlaku a vlhkosti okolního prostředí. Dalším významným faktorem je hustota, která je u jednotlivých druhů dřevin rozdílná, avšak již víme, že s vyšší hustotou je pevnost dřeva větší. Ovlivnit pevnost můžeme i tepelnou modifikací. Mechanické vlastnosti se při tepelné modifikaci snižují (Esteves a Pereira, 2009).

5.5 Vliv struktury dřeva

V případě volby materiálu je ideální dřevo s menší tvrdostí malým rozdílem jarního a letního dřeva a s velkým podílem ligninu. Ideálními dřevinami je buk, jasan, dub (Gandelová *et al.*, 2012). Na ohyb lze použít všechny druhy dřevin, listnaté jsou ale pro

ohyb vhodnější. V případě jehličnatých dřevin se ohyb provádí hůře, zejména díky velkému rozdílu mezi jarním a letním dřevem, kdy jarní dřevo je více stlačováno než letní (Dubovský, 1993). Díky této vlastnosti vrstvy jarního a letního dřeva mají snahu se po sobě posouvat a následkem nerovnoměrného stlačování dřevo při větším ohybu dochází k porušení a prasknutí testovaného prvku (Křupalová, 2002).

Dřevo, jakožto anizotropní materiál, má různé vlastnosti v různých směrech. Vlastnosti dřeva jsou ovlivněny uspořádáním jednotlivých složek dřeva ve všech strukturálních hladinách. Důležitý faktor, jenž zlepšuje ohybové vlastnosti, je i délka s kombinací minimálního odklonu od podélné osy vláken (Křupalová, 2003). Ideální dřevo k ohýbání má mít rovná vlákna kmene. Odklon vláken maximálně do jedné čtvrtiny délky hranolku s úhlem v rozpětí 5 až 10°, odklon dřevních paprsků od roviny ohýbání smí být do 30 %. Pokud je tato hodnota větší, dochází při ohýbání ke vzniku trhlin kolem dřevných paprsků (Maněnová, Novotný 2015). 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. Výskyt nepravého jádra negativně ovlivňuje proces plastifikace (Gandelová *et al.*, 2012). Matovič (1993) uvádí, že při odklonu vláken od podélné osy o 45° se sníží pevnost v ohybu o cca 20 %. Mechanické vlastnosti mohou být ovlivněny přítomností přírodních defektů vyskytujících se ve struktuře dřeva a zároveň defekty vzniklé při procesu opracování (Požgaj *et al.*, 1997).

5.6 Vliv hustoty na ohyb

Další fyzikální vlastností dřeva, která výrazně ovlivňuje fyzikální a mechanické vlastnosti, je hustota. Někdy nazývána jako objemová hmotnost. Obecně se jedná o podíl hmotnosti k objemu materiálu. Hmotnost dřeva je ovlivněna vodou volnou i vázanou, zatímco objem je ovlivněn pouze vodou vázanou. V porovnání s ostatními materiály je hustotu dřeva složitější určit, vzhledem k jeho hygroskopicitě. Například těžké dřevo je pevnější, tvrdší a odolnější proti opotřebení než dřevo lehké. Hustota bývá ovlivňována různými činiteli, především vlhkostí, šířkou letokruhů, polohou v kmeni a věkem. Rozdílnou hustotu má i reakční dřevo, větev, či kořen stromu. (Požgaj *et al.*, 1997). Při vlhkosti nad MH je vliv hustoty nevýrazný (Gandelová, 2012).

Dřevo, které má největší objemovou hmotnost je guajak (při $w = 0 \% \Rightarrow 1\,363\text{ kg/m}^3$), naopak nejnižší objemovou hmotností má balsa (při $w = 0 \% \Rightarrow 58\text{ kg/m}^3$).

Zdali má vliv hustota v důsledku změny rychlosti růstu na mechanické vlastnosti dřeva jehličnatých a listnatých dřevin se zabýval Esteves (2009). V této práci bylo prokázáno, že u jehličnatého dřeva se obecně mechanické vlastnosti výrazně snižují. U některých druhů jehličnatého dřeva jsou mechanické vlastnosti méně ovlivněné vlivem snížené hustoty. Ve srovnání s dřevem listnatých dřevin jsou fyzikálně-mechanické vlastnosti méně ovlivněny. U druhů roztroušeně pórovitého dřeva listnatých dřevin má rychlost růstu velmi malý vliv na hustotu, tak na mechanické vlastnosti. U kruhovitě pórovitého dřeva listnatých dřevin se zdá, že fyzikálně-mechanické vlastnosti s rychlostí růstu neklesají a u některých druhů dokonce mají tendenci se výrazně zvyšovat.

5.7 Vliv vlhkosti dřeva namáhaného na ohyb

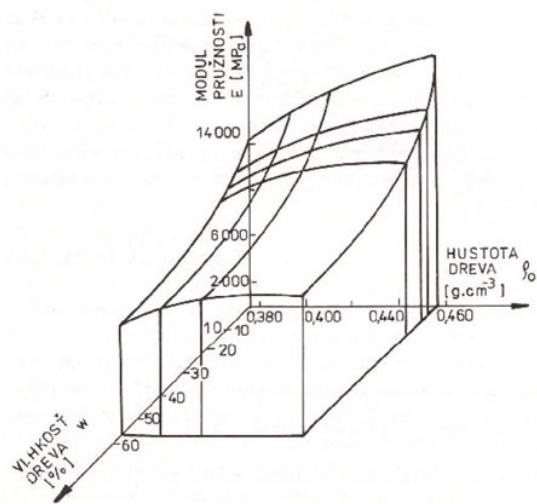
Dřevo je ve vztahu k okolí hygroskopický materiál, který je schopný přijímat, ale i dokáže odevzdávat vodu, a to v kapalném i plynném (v podobě páry) skupenství. Bod nasycení vláken, který se pohybuje v rozmezí 25 až 30 %, je ideálním množstvím vlhkost pro ohýbání dřeva (Zeidler a Borůvka 2016). Pokud by vlhkost přesáhla bod nasycení vláken, kdy by v buněčných stěnách byla obsažena voda volná, došlo by při ohýbání vlivem hydrostatického tlaku jejich roztržení. V případě, že by byla vlhkost naopak příliš nízká, dřevo by bylo méně plastické a došlo by k obtížnému tvarování (Trávník, 2007).

Tab. 1 Sesychání Buku lesního (*Fagus sylvatica* L.) (Křupalová, 2003).

Dřevina	Objemová hmotnost $w = 0 \%$ (Kg/m ³)	Sesychání v %			
		Podélné	Radiální	Tangenciální	Objemové
Buk lesní	680	0,3	5,8	11,8	17,9

V procesu plastifikace by vlhkost dřeva neměla klesnout pod 25 %. Ve dřevě je nedostatek páry pro změkčení ligninu. Proces plastifikace se může snížit až na 5 minut na každé chybějící procento vlhkosti. Je-li dřevo proschlé pod 20 %, vlhčí se nejdříve

30 až 120 sekund postřikem studenou vodou. Povrchová vrstva dřeva má mít teplotu ohýbání 90 až 100 °C, vnitřní část hranolku má být prohřátá aspoň na 70 °C. Povrchová teplota nemá klesnout pod 80 °C. Při nedodržení je dřevo málo plastické a prská. V případě plastifikace dřeva o nízké vlhkosti pomocí páry dochází ke zvýšení jeho křehkosti a i zvýšení rizika vzniku prasklin při ohybu v tahové části. Z tohoto důvodu je u dřeva s nízkou vlhkostí vhodné použít plastifikaci pomocí horké vody (Křupalová, 2003). Snížení obsahu vlhkosti vede k vyšším hodnotám modulu pružnosti dřeva. Tuhost v ohybu (EI) je však téměř neovlivněna klesajícím obsahem vlhkosti. To je přímý důsledek sníženého druhého momentu plochy, který je funkcí smrštění průřezu po sušení (Bodig, 1993). Závislost modulu pružnosti na vlhkosti a zároveň i na hustotě je možné vidět na Obrázku 18.



Obrázek 18 Model závislosti modulu pružnosti na hustotě a vlhkosti (Požgaj *et al.*, 1997).

6 Rozměrová stabilizace

Ohnuté dílce se stabilizují zejména z důvodu tendence se vracet do svého původního tvaru, proto je nutné je fixovat a tvarově stabilizovat (Trávník, 2007).

Důležité je, že vlhké dřevo se nesmí po ohnutí ihned zařezávat a připevňovat na přesný rozměr, protože při vysychání dochází k délkovému zkrácení (0,5 - 1 % délky). Doba schnutí závisí na tloušťce materiálu, teplotě a vlhkosti vzduchu v objektu. Po této době se ohnuté dřevo stabilizuje i se svým nově vzniklým tvarem. Následně je ho možno dopravit třeba do dílny pro případné dodělávky, včetně povrchové úpravy. Tvarovaný dílec se už významně nemění (Nutsch *et al.*, 1999).

6.1 Změna objemové hmotnosti

Jev rozdílů hmotnosti je doprovázen v procesu vaření nebo paření dřeva. Při působení tepla a vody na řezivo dochází ke změně jeho hmotnosti. Tento úbytek je vyvolán hydrolyzou hemicelulóz, extrakcí nízkomolekulární fragmentů v ligninu a částečně i amorfního podílu celulózy. Pokles hmotnosti řeziva závisí na podmínkách i času paření. Při atmosférickém paření s teplotami do 100 °C je úbytek menší, k většímu úbytku dochází při tlakovém napaření s teplotami nad 120 °C, kdy hodnoty úbytku dosahují mezi 5 až 7 %. Literatura uvádí, že k větším ztrátám hmotnosti a objemové hmotnosti dochází u tvrdého dřeva než u měkkého (Hill, 2006).

6.2 Změna rovnovážné vlhkosti

Pokles rovnovážné vlhkosti pařeného dřeva dochází v důsledku hydrolyzačních změn v buněčných stěnách, především v hydrofilních substancích. Díky částečnému vyluhování pektinových substancí obsahující karboxylové skupiny z primární stěny a vnější vrstvy sekundární stěny střední lamely v průběhu paření, má za následek snížení hygroscopicity dřeva, díky tomu dochází k menší schopnosti sorpce (Trebula, 2002).

6.3 Proces zvýšení rozměrové stability

Je několik možností, jak stabilizovat rozměry, například acetylací. Jedná se o chemickou modifikaci dřeva, která účinně zvyšuje rozměrovou stabilitu dřeva (Rowell, 2007). K chemické modifikaci dřeva dochází, když nastane chemická reakce chemického činidla s polymerními složkami dřeva (lignin, hemicelulózy nebo celulóza), tento proces vede k vytvoření stabilní kovalentní vazby mezi činidlem a polymery buněčné stěny. Obecně lze chemickou modifikaci dřeva charakterizovat jako aktivní modifikaci, kdy dochází k výrazné chemické změně makromolekul buněčné stěny (Dalheim, 2017).

6.4 Stabilizace a sušení

Jedná se o důležitou závěrečnou činnost s ohýbaným dílcem, jež se nesmí podcenit. Tento proces ovlivňuje druh dřeviny, vstupní vlhkost, členitost ohybu, dále také záleží na technologických faktorech sušárny, což může být teplota proudícího vzduchu, relativní vlhkost vzduchu, ale i rychlost proudění vzduchu a mnoho dalších faktorů (Trávník, 2008).

Sušení ohýbaného dílce je poměrně složitá činnost. Ohýbaný dílec je důležité ponechat ve všech přípravných (tvárnice), které napomáhaly daný dílec ohnout. Součástí je i ponechání pásnice (Dejmal, 1995). Stabilizace tvaru se provádí pomocí dvou hlavních faktorů, snížením vlhkosti a teploty dřeva (Trávník, 2007).

Sušení a stabilizace dílců může probíhat v kanálových nebo komorových sušárnách, dílce jsou zde uloženy do větších souborů, kvůli využití prostoru sušárny. Ukládání je zpravidla na paletách nebo vozících. V případě volby komorových sušáren, je proces dvoustupňový a doporučuje se, při volbě této varianty, velmi pomalé proudění vzduchu do 0,5 m/s. Používají se teploty v rozmezí 80 až 90 °C při relativní vlhkosti vzduchu 35 až 55 %. Stabilizace dílců se pohybuje v rozmezí 12 až 24 hodin, ale záleží na velikosti dílce, ale i na množství stabilizovaných prvků. Tímto procesem se klimatizace zkrátí na 5 až 13 dnů (Janák, 2003). V případě volby vyšší teploty může vznikat zabarvení dřeva, proto se nedoporučuje překračovat tyto teploty (Trávník, 2007).

Konečnou fází stabilizace je klimatizace, jež se provádí z důvodu vyrovnání pnutí (Dejmal, 1995). Nejdříve se suší do stabilizace ohybů (12 až 15 %) potom dochází k dosoušení na nábytkovou vlhkost $8 \pm 2 \%$ (Trávník, 2008). Proces klimatizace trvá v rozmezí 6 až 20 dnů (Trávník, 2007). Jednotlivé dílce jsou uloženy v prostoru, kde je regulována teplota, která se pohybuje okolo $20 \text{ }^\circ\text{C}$ a relativní vlhkost vzduchu se pohybuje v rozmezí 55 až 60 %, tyto podmínky jsou vhodné na vyrovnání vlhkosti v hranolku na $8 \pm 2 \%$. Při nedodržení těchto podmínek ohýbané dílce, které jsou vystavené měnícím se vlhkostním podmínkám, může docházet k tvarovým a rozměrovým změnám, které mohou zásadně ovlivnit trvanlivost a zároveň i tvarovou stálost dílců (Šlezingerová, 2002).

7 České dřeviny a jejich využití

V České republice se nachází velké množství dřevin, ty se nejčastěji dělí podle významnosti a velikosti porostlé plochy (www.nasestromy.cz, 2021).

- smrk ztepilý (52,4 %),
- borovice lesní (17 %),
- buk lesní (7 %),
- duby (6,8 %),
- modřín opadavý (3,9 %),
- bříza bělokorá (2,8 %),
- jedle bělokorá (1 %),
- ostatní listnáče (javor, jeřáb, jasan, jilmy, atd).

7.1 Charakteristika Buku lesního (*Fagus sylvatica* L.)

Jedná se o dřevo velmi často používané pro technologii ohýbání, a proto byla vybrána pro experimenty v této práci. Buk lesní náleží do řádu *Fagales*, čeledi *Fagaceae*, dorůstá výšky kolem 35 až 45 metrů, průměr kmene může dosáhnout až 1,5 metru (Dubovský, 2001). Tyto rozměry, ale výrazně ovlivňuje veliké množství faktorů. Největší a nejrovnější kmeny mohou dosáhnout objemu až třiceti kubických metrů. V závislosti na stanovišti dosahuje i vysokého věku 200 až 400 let (Biolib, 2014). Kromě našeho známého buku lesního existuje ještě několik dalších významných druhů buků, jako například *Fagus grandifolia* (buk velkolistý), *Fagus orientalis* (buk východní) nebo nádherný okrasný *Fagus crenata* (buk japonský) V současnosti je známo 13 až 15 různých druhů buků, včetně uhynulých druhů (Wagenführ, 2000).

Nejlépe se mu daří na optimálně vlhkých, dobře provzdušněných, humózních a minerálně bohatých půdách. Hůře se usazuje na půdách těžkých, neprovzdušněných, nebo vysýchavých či kyselých (Biolib, 2014; Úradníček, 2001).

Kmenová část bývá vysoko do koruny průběžná a větve odstávají v ostrém úhlu. Zprohýbané, bělavě pýřité, červenohnědé letorosty nesou odstávající, hnědé, dvouřadě střídavé, ostře zašpičatělé pupeny s bělavě pýřitými šupinami. Listy jsou střídavě

eliptické a 5 až 10 cm dlouhé, celokrajné, na okraji zvlňené a na konci zašpičatělé. Plodem je jednosemenná nažka (bukvice) buď částečně, anebo zcela uzavřená ve zveličelé číšce otvírající se čtyřmi chlopněmi (Hejný, 2003).

Ve volném přírodním prostranství začíná buk plodit mezi dvacátým až čtyřicátým rokem. Plodná období se vyskytují nepravidelně ve víceletých intervalech (5 až 10 let). Bukvice jsou jedlé a mají oříškovou chuť. Díky tomu jsou hojně roznášeny ptáky a drobnými hlodavci (Úradníček, 2001).

Důležitou částí stromu je kořenový systém. U této dřeviny je typický srdčitý tvar se zkráceným hlavním kořenem. Z mohutného kořenového uzlu pod povrchem jsou vyháněny silné kořeny všemi směry do půdy. Díky tomuto prvku bývá v půdě velmi dobře zakotven. Na živných půdách však buk kořenuje často poměrně mělce, avšak svrchní vrstvu důkladně prokoření. Koruna bývá vysoko nasazená, kulovitá a bohatě větvená. Borka tohoto stromu je i v pokročilém věku hladká, stříbrošedá (Hejný, 2003).

7.2 Vlastnosti bukového dřeva

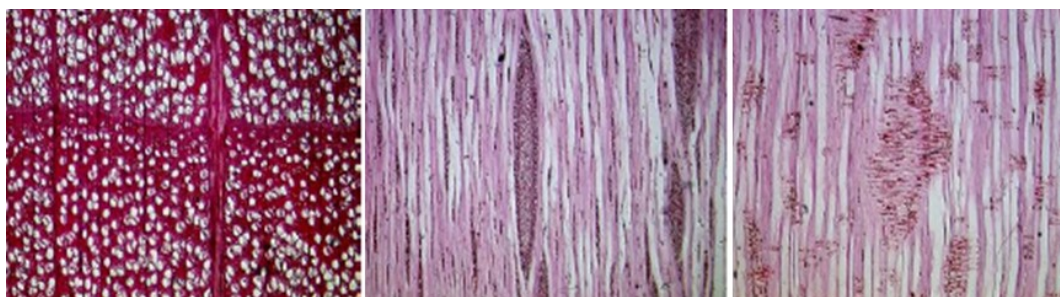
Literatura udává, že při 12 % vlhkosti se udává tahová pevnost 990 N/cm², tlaková pevnost 400 až 800 N/cm², ohybová pevnost 90 až 125 N/mm². Pro moderní stavebnictví má největší význam modul elasticity. U bukového dřeva se modul elasticity pohybuje mezi 12 300 až 16 400 N/mm². Co se váhy týče, patří buk mezi těžké dřeviny. V případě čerstvého dřeva váží 950 až 1000 kg/m³, na vzduchu suché 730 kg/cm³, uměle sušené může mít i 660 kg/cm³ (Mikulka, 2013).

Tab. 2 Porovnání hodnot hustoty a sesychání buku

Hodnoty	Wagenführ, 2000	Požgaj <i>et al.</i> , 1997
Hustota ρ_0 při $w=0$ % (g/cm ³)	0,68	0,684
Hustota ρ_{12} při $w=12$ % (g/cm ³)	0,72	0,71
Bobtnání podélné (%)	0,3	0,3
Bobtnání radiální (%)	5,8	5,3
Bobtnání tangenciální (%)	11,8	12,5
Bobtnání objemové (%)	17,9	17,5

7.3 Mikroskopická stavba testované dřeviny buku

Zařazení této dřeviny spadá do bělové skupiny. U starých stromů se často vyskytuje nepravé jádro. Pro tento druh dřeviny je typickým znakem viditelnost dřevných paprsků (1 až 5 mm dlouhé) na všech třech základních řezech. Barva bukového dřeva je narůžovělá, nahnědlá až červenohnědá. V případě paření v procesu plastifikace dřevo dostává červené zbarvení. Letokruhy jsou poměrně zřetelné. Cévy jsou uspořádány jednotlivě v radiálních skupinách po čtyřech, perforace cév je jednoduchá a žebříčkovitá. V cévách nepravého jádra se vyskytují thyly i jádrové látky. Pro tuto dřevinu je i typické velké zastoupení tracheid (vláknitých, cévovitých a vazicentrických) (Zeidler, 2016; Vavrčík, 2002).



Obrázek 19 Mikroskopická stavba buku - Příčný, tangenciální a radiální řez (Vavrčík, 2002)

7.4 Hospodářský význam Buk lesního

Tato dřevina je naší nejdůležitější hospodářskou listnatou dřevinou. Mezi cenné sortimenty spadá jen hladká a rovná část kmene; ostatní části se zpracovávají na palivo nebo celulózu. Bukové dřevo má všestranné použití. Hlavní uplatnění nalezlo v nábytkářství; pro svou schopnost dobré ohýbatelnosti, z toho důvodu se hodně používá na výrobu ohýbaného nábytku. Je zároveň velmi důležitou surovinou pro výrobu dýk, překližek, parket, pro chemické a polochemické zpracování dřeva (buničina, výroba dřevotřískových a dřevovláknitých desek). Kladnou vlastností je dobrá možnost impregnace, paření a moření (Úradníček, 2001).

Matovič (1993) uvádí, že pro buk je mez nasycení vláken mezi 32 až 35 %. Hojně se využívá jako palivové dřevo. Jeho hlavní využití je pro konstrukční materiál. Využívá se i při výrobě dřevěných doplňků, drobných ozdobných předmětů a zároveň i na násady náradí (Gandelová, 2012).

8 Metodika experimentální části

Při stanovení cílů diplomové práce byla experimentální část rozdělena do několika bodů:

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

8.1 Výroba a příprava zkušebních těles

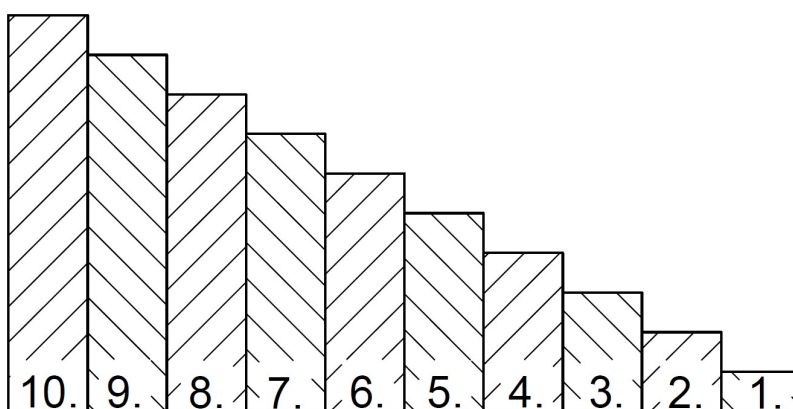
Pro zjištění vlivu geometrických parametrů na ohýbané dřevo a vlivu na charakteristiky ohýbání, byly vytvořeny soubory těles, pro experimentální měření. Všechny tělesa byly vyrobeny z buku lesního (*Fagus sylvatica L.*). Řezivo, ze kterého byly zkušební tělesa vytvořeny, bylo řezáno v radiálním směru kolmo na vlákna pomocí kotoučové pily. Po nařezání jednotlivých těles byla provedena tloušťková egalizace na tloušťkovací frézce. Zkušební tělesa byla podrobena optickému třídění tak, abychom vyselektovali pouze zkušební tělesa bez vad (suky, trhliny, strukturální nerovnosti).

Vytvořené přířezy byly následně vykrácené na požadovaná tělesa s danými rozměry. Každý soubor obsahoval 30 kusů těles z důvodu největší relevantnosti statistického vyhodnocení. Schéma zkušebních těles, viz Tabulka 3.

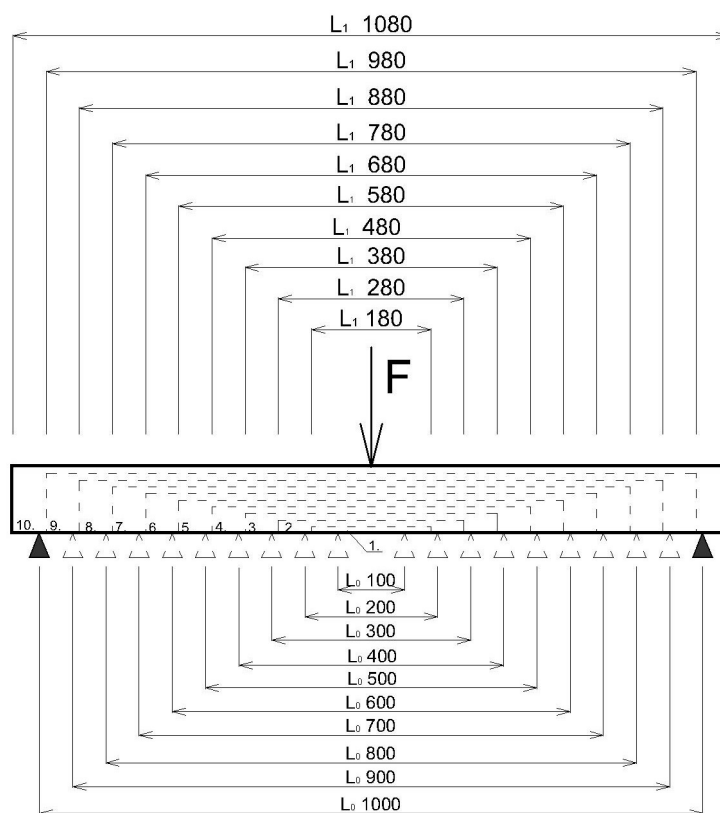
Tab. 3 Schéma zkušebních těles (Autor)

Soubor	Tloušťka (h) mm	Vzdálenost podpěr (l_0) mm	Šířka (b) mm
1.	10	100	20
2.	20	200	20
3.	30	300	20
4.	40	400	20
5.	50	500	20
6.	60	600	20
7.	70	700	20
8.	80	800	20
9.	90	900	20
10.	100	1000	20

U vyrobených testovaných těles byl neměnný rozměr šířky (b) 20 mm. Tloušťka (h) byla 10 až 100 mm a tloušťka souboru se zvýšila vždy o 10 mm, viz schématické zobrazení řezů zkušebních těles na Obrázku 20. Délka (l_0), neboli vzdálenost podpěr, odpovídala desetinásobku tloušťky daného souboru. Délka (l_1) zkušebních těles byla odvozena ze vzdálenosti podpěr, k níž byla připočtena nadmíra 40 mm na každou stranu, viz Obrázek 21. Celkem bylo testováno 10 souborů zkušebních těles.



Obrázek 20 Řez zkušebních těles (Autor)



Obrázek 21 Schématické zobrazení tříbodového ohybu (Autor)

Každé těleso se označilo kódem pro lepší identifikaci, viz Obrázek 22.

BK_10_100_(1.)

Kde: BK – druh dřeviny, 10 – tloušťka (h), 100 – délka (l), 1. – číslo tělesa.



Obrázek 22 Značení zkušebních těles (Autor)

8.2 Klimatizace zkušebních těles

Po rozčlenění, označení, změření, zvážení a vyměření bodů pro ultrazvukové testování, následovalo klimatizování zkušebních souborů těles na vlhkost 12 %. Před uložením do sušárny bylo nutné zvážení každého tělesa, kvůli výpočtu vlhkosti. Množství vody ve dřevě, před i po testování, bylo měřeno podle normy ISO 13061-1 (2014).



Obrázek 23 Klimatizační komora a pohled na zkušební tělesa (Autor)

Během sušení se průběžně vážily zkušební tělesa. Po ustálení hmotnosti těles, nedocházelo k poklesu hmotnosti, to znamenalo, že tělesa byly již bez veškeré vody volné. V tomto okamžiku se všechna tělesa zvážila a jejich hmotnost byla zaznamenána. Zkoušky probíhaly v laboratoři, při teplotě 22 °C a vlhkosti vzduchu 65 % podle EN 310.

Pro výpočet byl použit vzorec pro výpočet vlhkosti z ISO 13061-1 (2014):

$$W = \frac{m_w - m_0}{m_0} * 100 \quad (8)$$

Kde:

W ... vlhkost vzorku (%),

m_w ... hmotnost vzorku před vysušením (g),

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

Poté následovalo vypočtení hustoty, a to jak před samotným měřením, tak i po měření, podle vzorce (9) (ISO 13061-2):

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (9)$$

Kde:

m ... hmotnost dřeva (kg),

V ... objem dřeva (m³).

8.3 Měření šíření ultrazvukových vln

Následující činností, bylo měření pomocí přístroje FAKOPP Ultrasonic Timer, jenž měří čas, za který vyslaný impuls projde dřevem z jedné sondy do druhé. Přístroj pracuje ve frekvenčním rozsahu 15 až 300 kHz, budící puls je generován jednou za dvě sekundy, napětí budícího pulsu je 200 V a frekvence ultrazvukové přitlačné sondy je 45 kHz. Přístroj pracuje s odchylkou +/- 1 μs (www.fakopp.com, 2021).

Před zahájením měření musíme nejdříve zapojit konektory sondy do přístroje a až poté se zapíná přístroj. Je třeba dbát na to, aby byla vyvolána dostatečná síla na přitlačení sondy k testovanému tělesu, které je vhodné podložit pružným materiálem, například PUR pěnou. Měření hodnot probíhalo v tangenciální rovině (Kundera, 2014).

Jelikož čas průchodu ultrazvuku zobrazený na displeji zahrnuje i čas průchodu piezo-elektrickou sondou, je třeba provést korekci měřených časů. Čas korekce byl získán tak, že těleso se změřilo v několika různých vzdálenostech. Při známé a konstantní délce tělesa, je možno vypočítat samotnou rychlost šíření zvuku, pro každé těleso v měřeném souboru. Po vypočítání rychlosti šíření ji lze dosadit do vzorce pro výpočet modulu pružnosti, při známé hustotě, kterou vypočítáme váhovou metodou. (www.fakopp.com, 2021).

Měření probíhalo v tangenciálním směru zkušební tělesa, v předem vypočtené vzdálenosti podpěr podle aktuálního testovaného souboru těles. K porovnání paralelnosti byl upotřeben čas jen z prostřední vzdálenosti. Ostatní časy byly využity pro korekci a následný výpočet dynamického modulu pružnosti. Výpočet však není primárním tématem této práce a je uveden jako doplňující vlastnost. Tento postup měření navazoval na vizuální třídění zkušebních těles. Snahou bylo zjištění vnitřních vad. Na základě tohoto postupu byly ještě dodatečně vytríděny tělesa, která podléhala vychýlení výsledných hodnot při měření.

Vypočítáme ho ze vztahu (Gandelové *et al.*, 2004):

$$E_D = \rho \cdot c^2 \quad (10)$$

Kde:

c ... rychlost šíření zvuku ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$),

E_D ... dynamický modul pružnosti (MPa),

ρ ... objemová hmotnost materiálu ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$).

Rychlost šíření zvuku pro výpočtovou metodu (frekvence podélných kmitů) vypočítáme z následovného vzorce (Gandelové *et al.*, 2004):

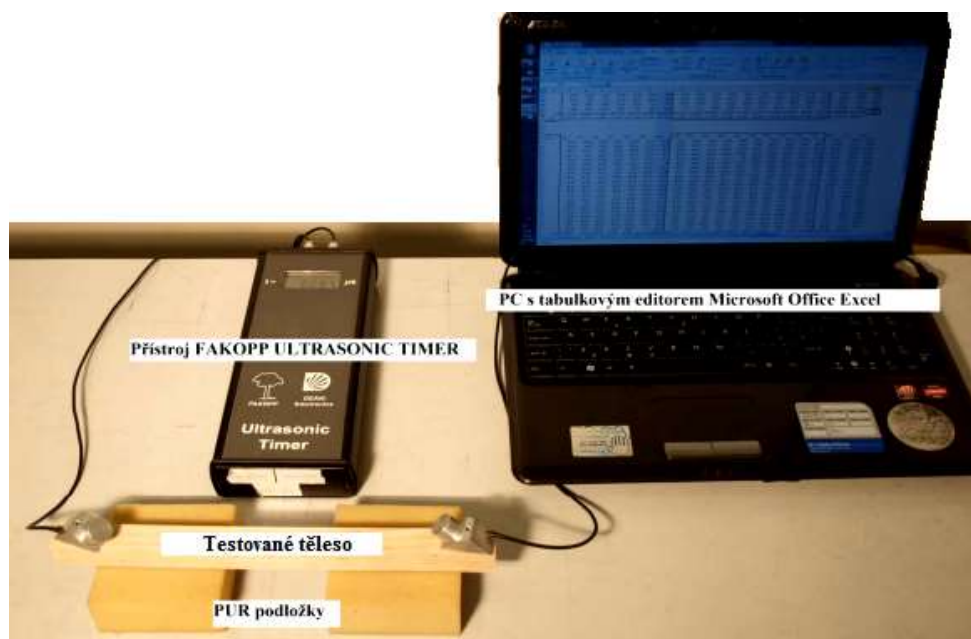
$$c = 2 \cdot L \cdot f \quad (11)$$

Kde:

c ... rychlost šíření zvuku ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$),

L ... délka tělesa (mm),

f ... frekvence podélného kmitání (Hz).

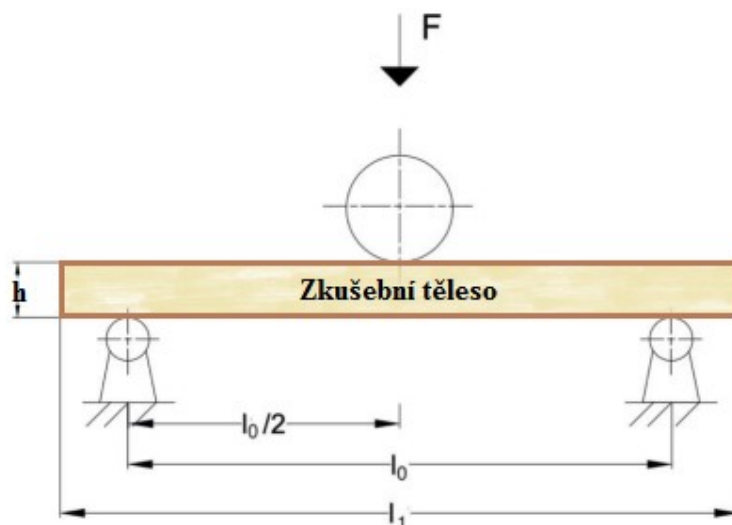


Obrázek 24 FAKOPP Ultrasonic Timer (Autor)

8.4 Ohybová zkouška

Hlavními sledovanými charakteristikami byl koeficient ohýbatelnosti, minimální poloměr ohybu, síla a průhyby na mezi úměrnosti a pevnosti. Ohybové charakteristiky byly zjišťovány na univerzálním trhačím zařízení INSTRON, tříbodovým ohybem. Schematicky znázorněno na Obrázku 25.

Každé zkušební těleso bylo ohýbáno v radiálním směru vláken. Pro každý soubor těles byla nastavena specifická vzdálenost podpěr podle schématu zkušebních těles (deseti násobek tloušťky). Touto zkouškou se získal silově průhybový diagram, který byl dále vyhodnocován pomocí software MATESS. Software pracuje v několika krocích, a to čištění dat, interpolace chybějících hodnot, místní vyhlazování pracovního diagramu, detekce meze pevnosti a meze úměrnosti a následné vyhodnocení zbývajících charakteristik ohybu, čímž dokážeme velmi přesně identifikovat jednotlivé charakteristiky ohybu (Sikora, 2021).



Obrázek 25 Schéma tříbodového ohybu podle EN 310

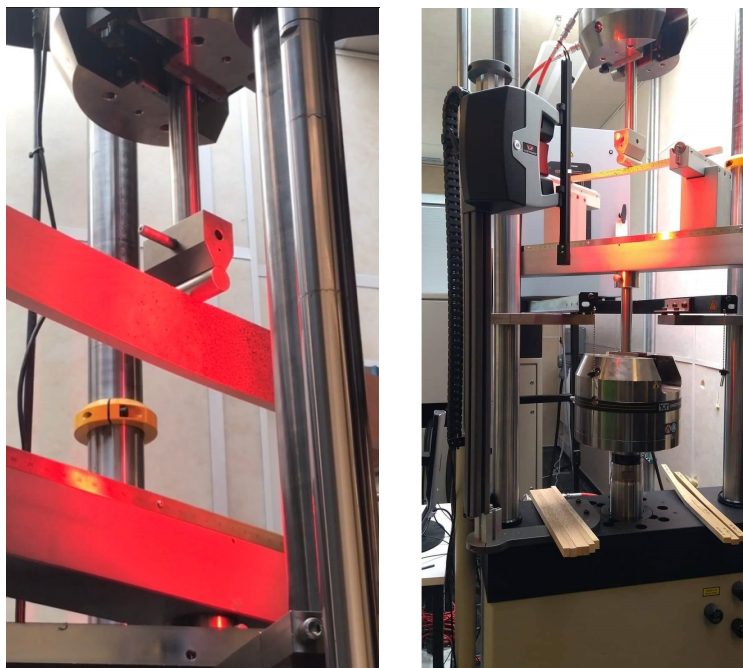
F ... zatěžovací síla (N),

h ... tloušťka zkušebního tělesa (mm),

l_0 ... $10 \cdot t$,

l_1 ... $10 \cdot t + 80$ mm.

Při zkoušce bylo zkušební těleso uloženo na dvou podpěrách a byl zatěžován silou, která působila přímo v jeho středu. Při umístování zkoušeného tělesa bylo nutno dbát na to, aby jeho podélná osa svírala pravý úhel s podpěrami. Zatížení bylo nastaveno na konstantní rychlost posuvu během celého průběhu zkoušky, aby nebyl přesažen normou stanovený čas zkoušky 90 vteřin, v souladu s normou EN 310. S velikostí zkušebního tělesa se upravovala i vzdálenost podpěr. Tato delší vzdálenost ovlivnila proces zlomení, z důvodu vzniku většího průhybu a byla tedy potřeba i větší rychlost posuvu. Zkoušky probíhaly v laboratoři, při teplotě 22 °C a vlhkosti vzduchu 65 % podle EN 310. Průhyby, které vznikaly působením síly, byly zjišťovány pomocí optického extenzometru, viz Obrázek 26.



Obrázek 26 Trhací stroj Instron v procesu zkoušky (Autor)

8.5 Výpočet daných charakteristik

Po získání hodnot z předchozí části experimentu, následoval výpočet stanovených charakteristik, u nichž se sledoval koeficient ohýbatelnosti, hraniční hodnoty průhybů a síly na mezi úměrnosti a pevnosti.

8.5.1 Koeficient ohýbatelnosti

$$k_{oh} = \frac{h}{R_{min}} \quad (12)$$

kde:

k_{oh} ... koeficient ohýbatelnosti,

h ... výška tělesa (mm),

R_{min} ... minimální poloměr ohybu (mm).

V této práci byly použité dva způsoby pro výpočet koeficientu ohybatelnosti, viz rovnice (13). Tato rovnice vychází z geometrie ohybu a rovnice (14) vychází ze základní rovnice ohybu (Gaff *et al.*, 2017):

$$K_{ohC} = \frac{h}{R_{minC}} = \frac{h}{\frac{l_0^2}{12 \cdot y_{max}}} \quad (13)$$

$$K_{ohB} = \frac{h}{R_{minB}} = \frac{h}{\frac{l_0^2}{8 \cdot y_{max}} - \frac{y_{max}}{2} - \frac{h}{2}} \quad (14)$$

kde:

k_{oh} ... koeficient ohýbatelnosti,

h ... výška tělesa (mm),

R_{min} ... minimální poloměr ohybu (mm),

y_{max} ... maximální průhyb (mm),

l_0 ... vzdálenost spodních podpěr (mm).

8.5.2 Minimální poloměr ohybu $R_{\min C}$

Další možností pro výpočet koeficientu ohybatelnosti, založeného na odvození na základě geometrie ohybu pomocí vzorce (15), který byl převzat z práce (Gaff *et al.*, 2017):

$$R_{\min C} = \frac{l_0^2}{12 \cdot y_{\max}} \quad (15)$$

kde:

l_0 ... vzdálenost spodních podpěr (mm),

y_{\max} ... maximální průhyb (mm),

$R_{\min C}$... minimální poloměr ohybu (mm).

8.5.3 Minimální poloměr ohybu $R_{\min B}$

Pro výpočet koeficientu ohybatelnosti, založeného na odvození ze základní rovnice ohybu byl použit vzorec (16), který byl převzat z práce (Gaff *et al.*, 2017):

$$R_{\min B} = \frac{l_0^2}{8 \cdot y_{\max}} + \frac{y_{\max}}{2} - \frac{h}{2} \quad (16)$$

kde:

l_0 ... vzdálenost spodních podpěr (mm),

y_{\max} ... maximální průhyb (mm),

$R_{\min B}$... minimální poloměr ohybu (mm),

h ... tloušťka testovaného tělesa (mm).

8.5.4 Síla na mezi úměrnosti

Pro výpočet meze úměrnosti byl použit vzorec (Svoboda *et al.*, 2017):

$$\sigma_u = \frac{3F_E l_0}{2bh^2} \quad (17)$$

Kde:

σ_u ... mez úměrnosti (MPa),

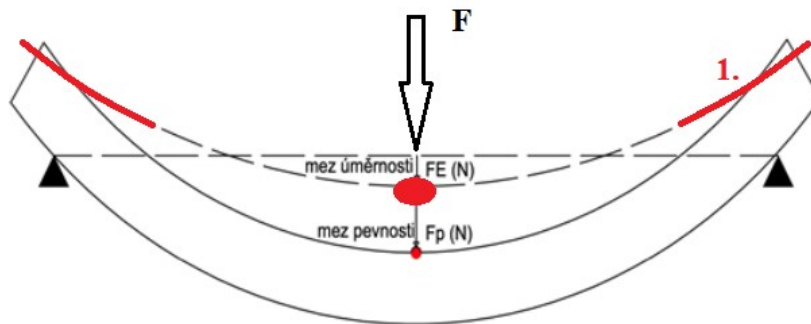
F_E ... síla na mez úměrnosti (N),

l_0 ... vzdálenost podpěr (mm),

b ... šířka vzorku (mm),

h ... tloušťka vzorku (mm).

Grafické znázornění vzniku průhybu na mezi úměrnosti je možné pozorovat na Obrázku 27, na němž je označen tento stav číslem 1. V tomto okamžiku, vzniká jen pružná deformace, tedy těleso je pouze pružně namáháno bez trvalých následků (Svoboda *et al.*, 2017).



Obrázek 27 Znázornění meze úměrnosti (Autor)

8.5.6 Síla na mezi pevnosti

Výpočet síly na mezi pevnosti byl počítán pro každé zkušební těleso zvlášť pomocí vzorce 18. Důležité bylo, aby síla (F) působící na zkušební těleso byla přesně v prostředku. Dodrželo se i pravidlo svírání pravoúhlosti podpěr vůči testovanému tělesu. Výpočet meze pevnosti v ohybu (tříbodovém ohybu) byl využit vzorec podle ISO 13061-3 (2014):

$$\sigma_{max} = \frac{3F_{max}l_0}{2bh^2} \text{ (MPa)} \quad (18)$$

Kde:

σ_{max} ... mez úměrnosti (MPa),

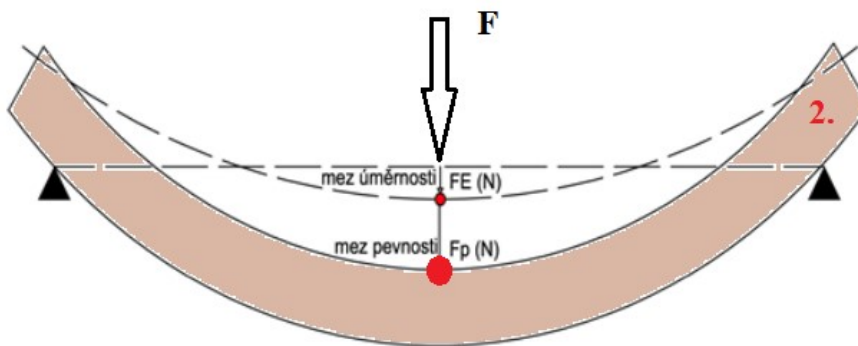
F_{max} ... maximální působící síla (N),

l_0 ... vzdálenost mezi podporami (mm),

b ... šířka nosníku (mm),

h ... výška (mm).

Grafické znázornění vzniku průhybu na mezi pevnosti je možné pozorovat na Obrázku 28, na němž je označen tento stav číslem 2. V tomto okamžiku silou napětí, dochází k porušení namáhaného tělesa. Deformace jsou stále rostoucí, a tedy se stávají už plastickými. Po přerušení působení vnější síly už ale deformace nezaniknou (Bodig,1993).



Obrázek 28 Znázornění meze pevnosti (Autor)

9 Výsledky a diskuse

Ohybové charakteristiky byly zjišťovány pomocí třibodového ohybu se zaměřením na výsledné hodnoty koeficientu ohybatelnosti, minimálního poloměru ohybu, síly na mezi úměrnosti, průhyb na mezi úměrnosti, síly na mezi pevnosti, průhyb na mezi pevnosti. Z dřívějších studií vyplývá, že je nejvíce ovlivněn koeficient ohýbatelnosti, při změně tloušťky tělesa (Gaff, 2014).

V této práci se použily dvě varianty pro výpočet koeficientu ohybatelnosti, K_{ohC} založený na základní rovnici ohybu, u něhož jsou podstatně vyšší hodnoty než u K_{ohB} založeném na geometrickém přístupu (Gaff *et al.*, 2016).

Před samotným vyhodnocováním výsledných dat, proběhlo ověření normálového rozložení hodnot na základě Grubbsova testu a vyloučily se odlehlé hodnoty. Výsledné hodnoty byly zpracovány v programu Statistica 13 s následným vyhodnocením pomocí rozptylové analýzy (ANOVA). Významnosti jednotlivých faktorů byly stanoveny na základě hladiny významnosti „P“. Formálně lze P-hodnotu definovat i jako nejmenší hladinu významnosti testu, při níž na daných datech ještě zamítneme nulovou hypotézu. Platí tedy, že čím nižší P-hodnota testu je, tím menší nám tento test indikuje pravděpodobnost, že platí nulová hypotéza (Neubauer, 2010).

K tomuto vyhodnocení účinku jednotlivých faktorů byl použit Duncanův test, kde hladina významnosti byla $\alpha = 0,05$. Tento test stanoví pro danou hodnotu statistickou významnost, či nevýznamnost porovnávaného faktoru. Tyto tabulky se nachází v přílohách.

Sledovaný faktor se hodnotí z hodnoty P takto:

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

$P > 0,05$ vliv faktoru není statisticky významný;

$P = 0,05$ vliv faktoru se nachází na hranici statistické významnosti;

$P = 0$ faktor působí;

$P < 0,001$ vliv faktoru je statisticky velmi významný;

$0,001 < P < 0,01$ vliv faktoru je statisticky středně významný;

$0,01 < P < 0,05$ vliv faktoru je statisticky málo významný (Dubjaková, 2009).

Vyhodnocené ohybové charakteristiky jsou shrnuty v tabulkách níže, kde každá hodnota je brána z průměru příslušného souboru. Dále zde najdeme variační koeficienty, které jsou charakteristikou variability a rozdělení pravděpodobnosti náhodné veličiny. Je to podíl směrodajné odchylky a aritmetického průměru. Směrodajná odchylka je odmocnina z rozptylu náhodné veličiny. Z důvodu přehlednějšího porovnání naměřených hodnot byly výsledky zpracovány do grafů, které se nachází pod každou tabulkou. Dále byly vytvořeny grafy korelací, které se nachází v přílohách, u nichž se jako hlavní faktor zvolila vzdálenost podpěr. Pro sestavení těchto grafů byly vybrány sledované ohybové charakteristiky a analyzovala se vzájemná závislost. Hodnota spolehlivosti R nám ukazuje, do jaké míry hodnoty úměrnosti, pevnosti, průhybů, koeficientu ohybatelnosti a minimálního poloměru ohybu ovlivnila vzdálenost podpěr.

Hodnoty z experimentální části práce jsou v této kapitole porovnány s dostupnou literaturou a odbornými články na obdobnou problematiku.

9.1 Výsledné hodnoty destruktivní a nedestruktivní metody

V Tabulce 4 jsou zpracované naměřené hodnoty pro maximální síly na mezi úměrnosti pro jednotlivé soubory těles. Hodnoty, které jsou v tabulce zaznamenány v závorce, značí variační koeficienty. Výsledky z tabulky jsou pro lepší přehlednost zpracovány do grafů na obrázcích níže. Dynamický modul (E_{dyn}) pružnosti byl stanoven převážně z důvodu kvalitativního třídění zkušebních těles vnitřních vad, kvůli snížení variability zkušebních těles. Ve studii Kundera (2014) bylo dosaženo rychlost šíření zvuku (c) $4\,795\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a modul pružnosti byl $17\,106\text{ MPa}$ při vlhkosti 12% u bukových těles. Modul pružnosti u těles pro 12 % vlhkost uvádí Požgaj (1997) pro buk $16\,000\text{ MPa}$. Všechny tyto vypočtené hodnoty jsou získány z průměrných hodnot. Dalo by se tedy říci, že bylo dosaženo přiblížení k hodnotám uváděným v literatuře.

Tab. 4 Průměrné hodnoty destruktivní a nedestruktivní metody

S	σ_E (MPa)	F_E (N)	Y_E (mm)	σ_P (MPa)	F_P (N)	Y_P (mm)	c ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	E_{dyn} (MPa)
1.	53,10 (13,61)	734,18 (12,69)	0,95 (17,31)	120,45 (9,84)	1587,46 (11,88)	3,77 (13,89)	4873,1	16109,8
2.	46,00 (12,41)	1216,38 (13,63)	1,77 (16,85)	109,41 (12,21)	3031,03 (12,16)	8,08 (13,29)	4459,8	15685,3
3.	43,48 (9,84)	1670,53 (14,71)	2,34 (16,04)	101,88 (11,65)	4229,54 (11,35)	12,18 (6,84)	4526,7	15090,0
4.	41,79 (9,34)	2472,45 (12,43)	3,89 (11,79)	96,84 (13,96)	5248,48 (14,12)	12,58 (9,87)	4312,4	14630,7
5.	40,72 (7,94)	2782,17 (15,65)	4,51 (12,38)	87,04 (15,48)	6077,25 (15,36)	16,49 (15,83)	4435,1	13924,1
6.	40,16 (8,51)	3607,96 (11,06)	5,74 (11,16)	89,92 (13,36)	7561,39 (10,79)	21,80 (15,44)	4588,3	15298,6
7.	40,75 (11,33)	3943,22 (13,84)	6,21 (12,10)	88,69 (15,70)	8522,22 (14,13)	24,08 (15,26)	4656,4	15592,4
8.	41,19 (7,97)	4755,87 (9,36)	7,40 (11,41)	88,75 (8,79)	9771,2 (8,75)	29,27 (12,66)	4700,6	15226,6
9.	43,18 (10,81)	5420,48 (13,81)	9,69 (13,19)	83,82 (9,29)	10390,25 (8,86)	32,01 (12,46)	4751,8	14351,9
10.	44,08 (8,96)	6183,73 (11,39)	11,18 (13,54)	77,85 (9,38)	10648,46 (9,03)	33,58 (10,64)	4718,3	15853,3

* σ_E - Mez úměrnosti (MPa), F_E - Síla na mezi úměrnosti (N), Y_E - Průhyb na mezi úměrnosti (mm),

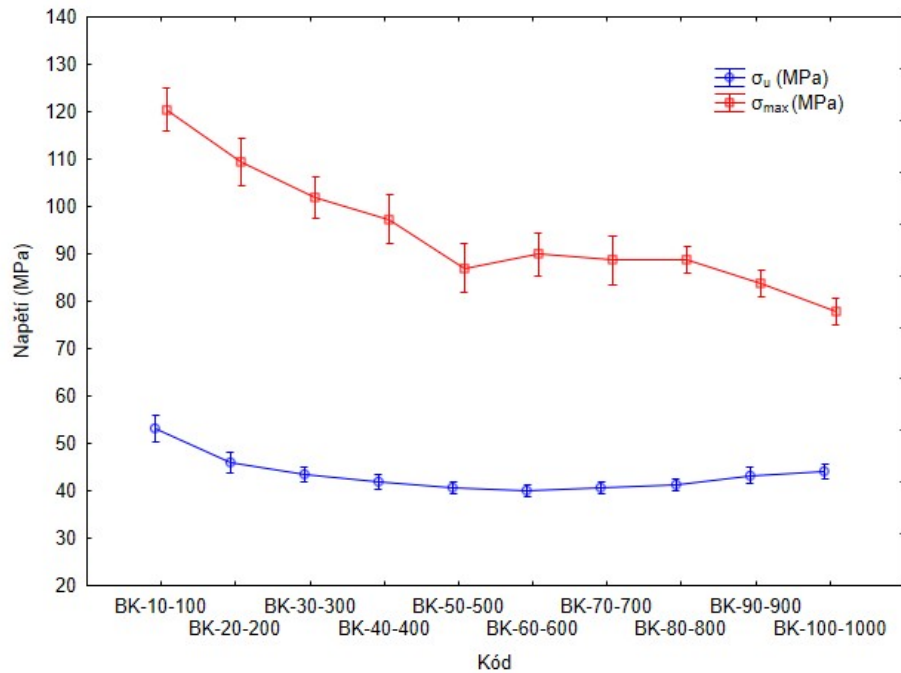
σ_P - Mez pevnosti (MPa), F_P - Síla na mezi pevnosti (N), Y_P - Průhyb na mezi pevnosti (mm),

c - rychlost šíření vln ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), E_{dyn} - Dynamický modul pružnosti (MPa)

9.1.1 Napětí na mezi úměrnosti a pevnosti

Pro statistické vyhodnocení meze úměrnosti byl použit Duncanův test, viz Příloha 1 (Tabulka 6), který vzájemně porovnává hladiny významnosti mezi jednotlivým zkušebními soubory. Statisticky velmi významný rozdíl se jeví u souboru 1 s porovnáním se všemi soubory s hladinou významnosti $P=0,000$. Další statisticky významný rozdíl je u souboru 2, s porovnáním s ostatními soubory, kromě souboru 10, kde je tento rozdíl statisticky nevýznamný $P=0,097$. Pro hodnoty meze úměrnosti byl analyzován pokles hodnot do souboru 6. Od tohoto souboru docházelo k opětovnému nárůstu průměrných hodnot. K tomuto nárůstu mohlo dojít nejspíše kvůli rozdílnosti hustoty, ale zároveň se zde mohl projevit faktor úměrně se měnící tloušťky a vzdálenosti podpěr. Dalo by se tedy konstatovat, že nebyl zaznamenán pokles hodnot s měnící se tloušťkou a vzdáleností podpěr. Tyto hodnoty jsou graficky znázorněny na Obrázku 29, kde je viditelný téměř lineární vzhled křivky meze úměrnosti.

Hodnoty meze pevnosti jsou graficky znázorněny na Obrázku 29, kde je viditelný pokles hodnot, v případě zvětšujících se rozměrů tělesem. Pro znázornění statistické významnosti hodnot meze pevnosti, byl vytvořen Duncanův test, viz Příloha 1 (Tabulka 7), z něhož se potvrdily statisticky významné rozdíly hodnot meze pevnosti. Statisticky významné výsledky se nejvíce projevují u souborů 1, 2 a 10, kde nastal velmi významný rozdíl hodnot vůči ostatním souborům s hladinou významnosti $P=0,000$. Soubory 3 a 4 prokazují staticky velmi významný rozdíl pro většinu souborů. Pouze v případě vzájemného porovnání se nejeví hodnoty jako statisticky nevýznamné s hodnotou $P=0,129$. K tomuto výsledku mohlo dojít kvůli jinému smykovému napětí, které je závislé na tloušťce a zároveň i na délce. Nicméně při pohledu na Tabulku 4 (nebo Obrázek 29) je viditelný trend poklesu hodnot. Při porovnání souboru 1 a 10 došlo k poklesu meze pevnosti o 37,4 %. Zatímco při porovnání souboru 5 a 6 došlo k navýšení hodnot o 3,3 %. Dalo by se tedy říci, že soubor 5 se vymknul předpokladu, nicméně pro odůvodnění byl vypočten variační koeficient, který vyšel u tohoto souboru 15,5 %. Hlubší analyzování statistické významnosti rozdílů, pomocí Duncavova testu, se tento pokles jeví jako statisticky nevýznamný s hodnotou významnosti $P=0,387$.



Obrázek 29 Interakce tloušťky a vzdálenosti podpěr na hodnoty meze úměrnosti a pevnosti (MPa)

Wagenführ (2000) uvádí ve své práci výsledné hodnoty pro mez pevnosti 123 MPa, dále i Požgaj *et al.* (1997) uvádí hodnoty meze pevnosti pro bukové dřevo 124 MPa. K těmto hodnotám se nejvíce přiblížil soubor BK-10-100. U tohoto souboru bylo dosaženo hodnot meze pevnosti 120, 45 MPa. Dosáhl tedy o 2 % horších mechanických vlastností, přesto jsou tyto hodnoty spolu dobře porovnatelné. Další porovnatelných hodnot (120 MPa) bylo dosaženo i v práci Gaff *et al.* (2014), kde byly testovány buková tělesa o rozměrech (šířka 40 mm, tloušťka 10 mm a délka 200 mm). Námi dosažené výsledky prokazují, že pevnost klesá s rostoucí tloušťkou materiálu. Tomuto odpovídají i výsledky Starka (1997), který zjistil, že pokud jsou podmínky poměru tloušťky a délky (10 x tloušťka materiálu) dodržovány, hodnoty pevnosti v ohybu klesají.

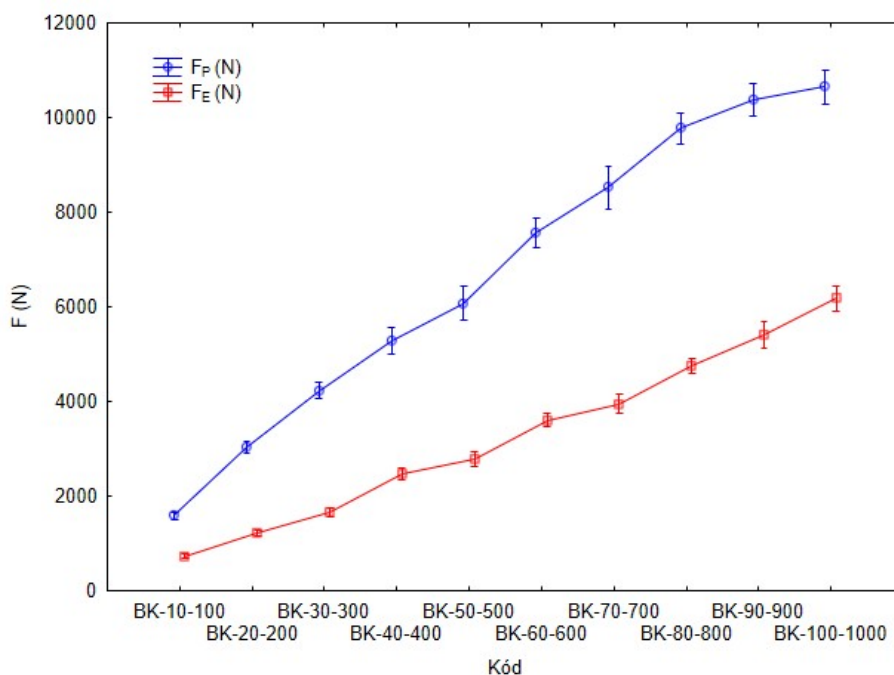
9.1.2 Síly na mezi úměrnosti a pevnosti

Výsledné hodnoty síly na mezi úměrnosti odpovídají předpokladu, že se zvětšujícím se tělesem bude pro ohyb v závislosti na zvětšující se tloušťce nutné aplikovat vyšší hodnoty zatěžovací síly (N). Tyto hodnoty jsou graficky znázorněny na Obrázku 30. Zde je viditelný vzhled křivky se vzestupnou tendencí. Pro porovnání statistické

významnosti byl vytvořen Duncanův test, viz Příloha 2 (Tabulka 8), z něhož se potvrdily statisticky velmi významné rozdíly pro všechny soubory. Hladina významnosti je v rozmezí $P=0,000 - 0,008$.

Naměřená data síly na mezi úměrnosti prokázala podle předpokladů, že se vzrůstající tloušťkou a vzdáleností podpěr roste síla. Tento trend je nejlépe patrný při porovnávání BK-10-100 a BK-100-1000, kde došlo k navýšení síly o 742,3 %. V případě porovnání těles BK-50-500 a BK-100-1000 došlo k nárůstu síly o 122,3 %.

Nejvyšších hodnot síly na mezi pevnosti bylo dosaženo u souboru 10. Pro porovnání statistické významnosti byl vytvořen Duncanův test, viz Příloha 2 (Tabulka 9), z něhož se potvrdily statisticky významné rozdíly hodnot. Tomuto tvrzení se vymyká předpokladu soubor 9 a 10, u nichž při porovnání hodnot nedošlo ke statisticky významnému rozdílu. Hladina významnosti je zde $P=0,214$. Procentuální nárůst síly činí pouze 2,4 %. Například při srovnání souborů 5 a 6, došlo v tomto případě k nárůstu síly o 24,4 %. Při porovnání souborů na procenta dochází k zmenšování nárůstu síly, při zvětšujících se rozměrech těles. Nicméně sledované faktory, tloušťka a vzdálenost podpěr statisticky působí na hodnoty síly na mezi pevnosti. Prokázalo se, že s rostoucí tloušťkou testovaného tělesa se zvyšuje i hodnota síly potřebné pro zlomení zkušební tělesa.



Obrázek 30 Interakce tloušťky a vzdálenosti podpěr na hodnoty síly na mezi úměrnosti a pevnosti (N)

Z uvedených výsledků vyplývá, že i síla na mezi pevnosti je závislá na velikosti zkušební tělesa, což potvrzuje ve své studii Svoboda *et al.* (2017), kde byla testována buková tělesa o různých rozměrech. Pro porovnání byl vybrán soubor o rozměrech (tloušťka 10 mm, šířce 35 mm a délce 600 mm), u něhož výsledná hodnota pro sílu na mezi úměrnosti byla 1701 N s variačním koeficientem 11,2 %. Podobných hodnot bylo dosaženo v této práci u souboru BK-30-300, kde bylo vypočteno 1670,53 N s variačním koeficientem 14,71 %. Tyto nižší hodnoty sil naměřených při testování těles mohou být způsobeny odlišnými rozměry těles, hustotou, strukturou dřeva, ale i rozdílnou vstupní vlhkostí nebo rozdílným způsobem měření. Uvádí zde i procentuální posun síly z meze úměrnosti na sílu na mezi pevnosti. Tento nárůst činí průměrně okolo 50 až 60 %. Obdobného nárůstu síly se potvrdilo i v této práci. Například u souboru 1 došlo k navýšení síly o 53,75 %. V případě výpočtu posunu síly u souboru 10, došlo zde k navýšení hodnot pouze o 41,9 %.

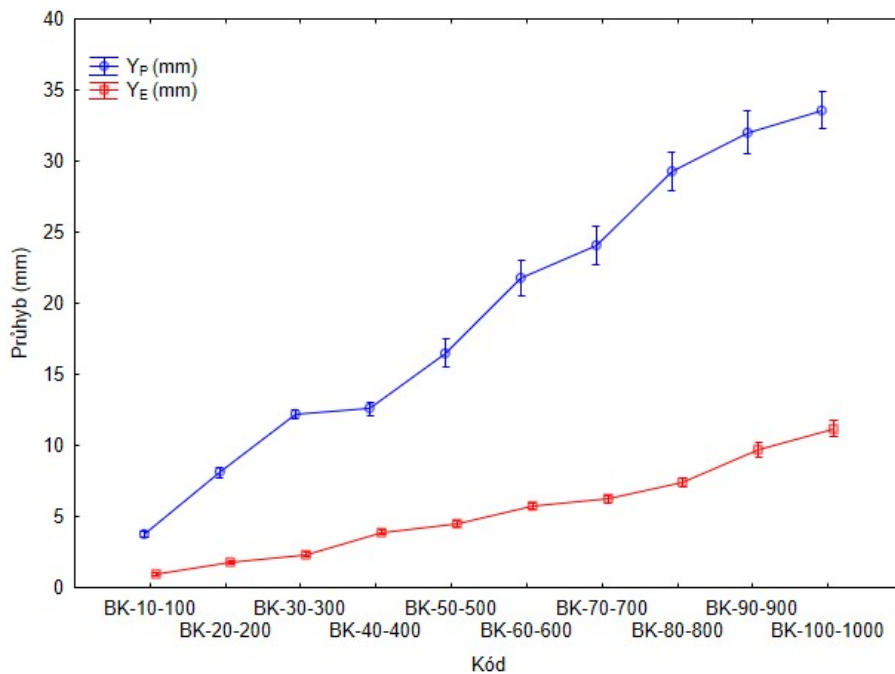
9.1.3 Průhyb na mezi úměrnosti a pevnosti

U průhybu na mezi úměrnosti je viditelný vzrůstající trend výsledných hodnot. Podle předpokladů se potvrdilo, že bude docházet se vzrůstající vzdáleností podpěr ke statisticky významnému rozdílu. Pro upřesnění byl vytvořen Duncanův test, viz Příloha 3 (Tabulka 10), z něhož se jeví jako statisticky významný rozdíl pro všechny testované soubory s hladinou významnosti $P=0,000$. Při porovnání souborů BK-10-100 a BK-100-1000 došlo ke zvětšení průhybu o 10,13 mm, což činí téměř dvanácti násobný nárůst hodnoty průhybu.

V případě porovnání souborů 6 a 7 došlo k poměrně nízkému nárůstu průhybu. Tento nárůst činí pouze 8 %, zatímco u souborů 1 a 2 došlo k nárůstu o 86 %. Největšího průhybu dosáhl soubor BK-100-1000, s čímž se teoreticky počítalo. Nárůst činí rozdíl o více než 1000 % s porovnáním s nejmenším souborem těles (soubor 1). Z naměřených výsledků lze potvrdit, že se vzrůstající tloušťkou se dosahuje i většího průhybu na mezi úměrnosti, ale i na mezi pevnosti.

Další sledovanou charakteristikou byl průhyb na mezi pevnosti. I zde se prokázalo, že bude docházet se vzrůstající vzdáleností podpěr ke statisticky významnému rozdílu. Při porovnání souborů 1 a 10 došlo ke zvětšení průhybu o 28,54 mm, což činí nárůst hodnot o téměř 870 %. V případě porovnání souborů BK-30-300 a BK-40-400, došlo k nárůstu průhybu pouze o 3,3 %. Srovnání souborů BK-90-900 a BK-100-1000

analyzováno statisticky málo významný rozdíl hodnot, dle Duncanova testu, viz Příloha 3 (Tabulka 11), s hladinou významnosti $P=0,029$. Předpokladem bylo, že rozdíl bude statisticky významný.



Obrázek 31 Interakce tloušťky a vzdálenosti podpěr na hodnoty průhybu na mezi úměrnosti a pevnosti (mm)

Pro porovnání byla vybrána studie Sikora *et al.* (2017), kde byly testovány soubory o rozměrech 10 x 35 x 600 mm (tloušťka x šířka x délka), u nichž byly zjišťovány průhyby Y_E a Y_P . Průměrná hodnota průhybu na mezi úměrnosti byla 4,4 mm s variačním koeficientem (14,4 %). Obdobných výsledků v této práci dosáhl soubor 5, u něhož byl průhyb Y_E 4,51 mm s variačním koeficientem (12,38 %). Rozdílnost výsledných hodnot činí 2,5 %. Průměrná hodnota průhybu na mezi pevnosti ve studii Sikora *et al.* (2017) činila 12,0 mm s variačním koeficientem (15,7 %). Pro porovnání výsledků byl zvolen opět soubor 5, u něhož byl průhyb Y_P 16,49 mm s variačním koeficientem (15,83 %). V tomto případě došlo k poměrně rozdílným hodnotám. Tento rozdíl v procentuálním porovnání činí nárůst v této práci o 37,42 %. U Y_P se nejspíše výrazněji projevila rozdílnost testovaných těles.

9.2 Koeficient ohýbatelnosti a minimální poloměr ohybu

V Tabulce 5 jsou zpracovány hodnoty koeficientu ohybatelnosti a minimálního poloměru ohybu pro jednotlivé soubory těles. Hodnoty, které jsou v tabulce zaznamenány v závorce, značí variační koeficienty. Poslední sloupec znázorňuje počet těles v jednotlivých souborech.

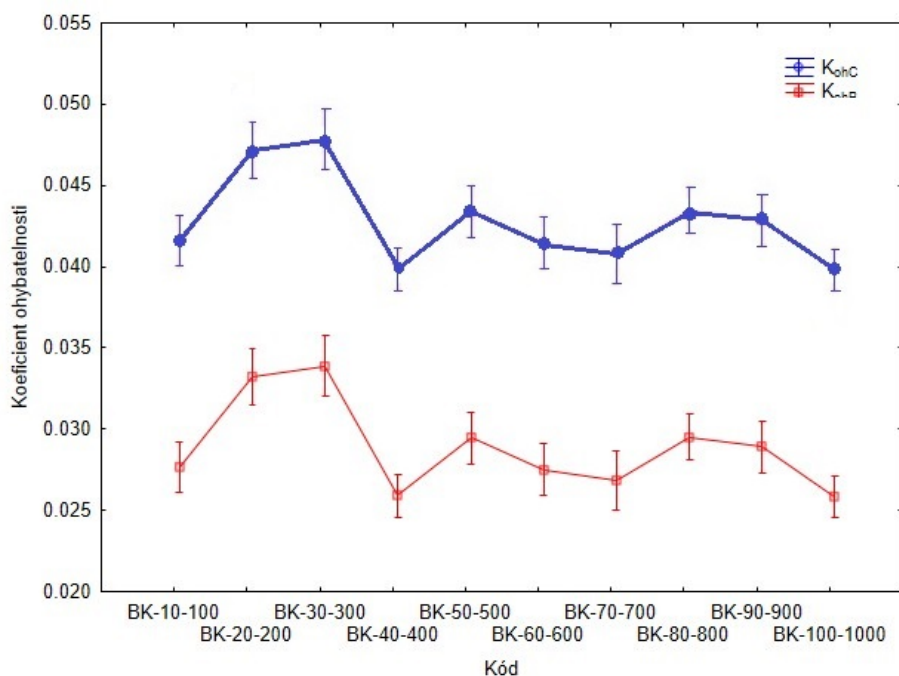
Tab. 5 Koeficient ohýbatelnosti K_{oh} a minimální poloměr ohybu R_{min}

Soubor	K_{ohC} a VK	R_{minC} a VK	K_{ohB} a VK	R_{minB} a VK	No.
1.	0,041 (13,72)	234,30 (9,54)	0,029 (15,43)	377,71 (11,99)	30
2.	0,048 (13,89)	435,27 (11,69)	0,034 (14,18)	638,60 (12,51)	30
3.	0,045 (17,48)	625,49 (13,51)	0,032 (14,83)	940,83 (12,28)	30
4.	0,042 (10,22)	1041,81 (13,17)	0,029 (13,80)	1562,40 (13,54)	30
5.	0,042 (13,86)	1176,67 (11,12)	0,028 (14,73)	1763,17 (13,62)	30
6.	0,043 (15,41)	1436,59 (13,53)	0,030 (15,64)	2072,23 (14,18)	30
7.	0,042 (15,94)	1675,33 (14,10)	0,028 (18,15)	2426,82 (14,81)	30
8.	0,044 (13,09)	1866,18 (14,86)	0,031 (13,14)	2773,78 (14,93)	30
9.	0,043 (14,62)	2138,51 (11,49)	0,030 (14,68)	3253,60 (15,30)	30
10.	0,038 (13,54)	2675,04 (14,41)	0,027 (13,60)	3911,59 (11,96)	30

9.2.1 Koeficient ohybatelnosti

Výsledky K_{oh} z tabulky jsou pro lepší přehlednost zpracovány do grafu, viditelného na Obrázku 32. Výsledky ukazují, že koeficienty založené na základní ohybové rovnici (K_{ohC}) jsou podstatně vyšší než koeficienty založené na geometrickém přístupu (K_{ohB}), což se taktéž shoduje s výzkumem Gaff *et al.* (2016). Při procentuálním posouzení K_{ohC} a K_{ohB} je patrný z výsledků trend dosahování vyšších hodnot než u K_{ohC} . Tento rozdíl výsledných hodnot činí přibližně 30 %. Z naměřených hodnot je patrný významný účinek tloušťky a vzdálenosti podpěr materiálu na hodnoty K_{oh} . Při menší tloušťce materiálu dosahujeme i nižších hodnot koeficientu ohýbatelnosti než u souborů s vyšší tloušťkou. Toto potvrzuje soubor BK-10-100 u něhož je dosaženo nižšího koeficientu ohýbatelnosti než u souborů BK-20-200. Pro upřesnění byl vytvořen Duncanův test, viz Příloha 4 (Tabulka 12), z něhož se jeví jako statisticky významný rozdíl u souboru 2 s porovnáním se všemi testovanými soubory těles. Pro tloušťky materiálu 20 mm

a tloušťky 100 mm lze považovat pokles hodnot K_{ohC} i K_{ohB} za velmi významný s hladinou významnosti $P=0,000$. Soubory 2 a 3 dosáhly nejvyšších hodnot K_{ohC} . U výsledných hodnot souborů 4 a 5, při srovnání s výše zmíněnými soubory, došlo ke statisticky významnému poklesu hodnot K_{ohC} . Tento pokles činí téměř 17 %. U souboru 4 došlo ke statisticky velmi významnému rozdílu hodnot. Mohlo se zde projevit smykové napětí, které ovlivnilo ohybatelnost. Vyšších hodnot dosáhly soubory 6 a 8, které nevyšly podle očekávání s nižšími hodnotami. Došlo zde tedy k opětovnému navýšení hodnot o téměř 8 %. V případě posouzení vlivu vzdálenosti podpěr na hodnoty K_{oh} se podle literatury měl projevit trend, že s větší vzdáleností podpěr se snižují hodnoty koeficientu ohybatelnosti. Tohoto výsledku nebylo dosaženo nejspíše kvůli dvěma proměnným, které vstoupily do procesu analyzování, úměrně se měnící tloušťka zkušebního tělesa s interakcí desetinásobné vzdálenosti podpěr.



Obrázek 32 Interakce tloušťky a vzdálenosti podpěr na hodnoty koeficientu ohybatelnosti K_{ohC} a K_{ohB}

Ve studii Gaff *et al.* 2016, byla testována buková tělesa s cílem na zjištění působení proměnných (tloušťka, druh lepidla, počet vrstev v lamelle) na hodnoty K_{ohC} . Bylo zde dosaženo průměrných hodnot 0,034. V porovnání s touto prací bylo dosaženo

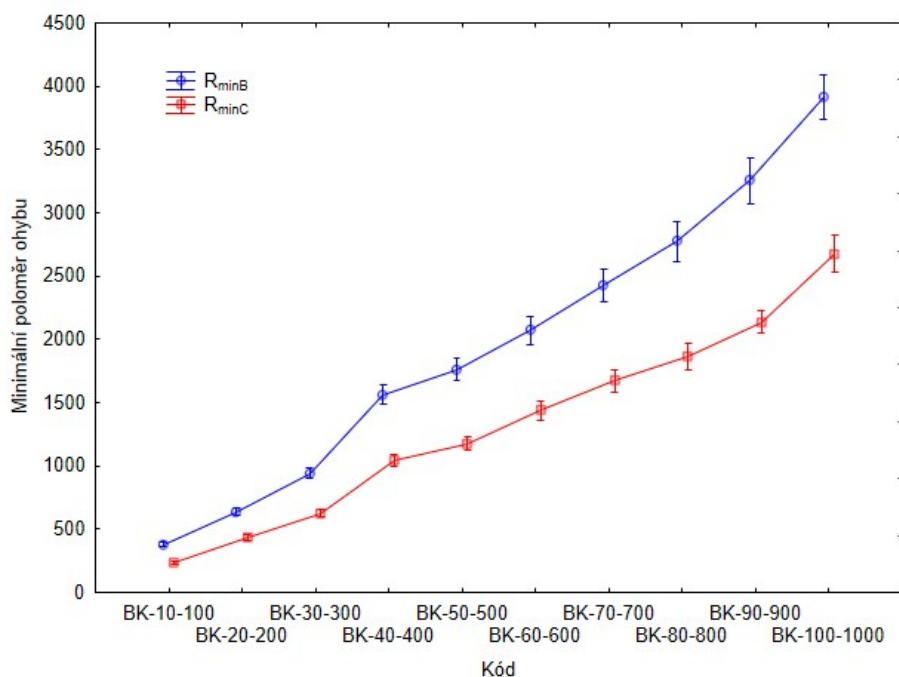
podobných hodnot (0,038) u souboru 10. To znamená, že bylo dosaženo velmi podobného výsledku, jako při zhuštění s následným slepením. V závěrečné práci Paul (2019) byly testovány soubory z bukových zhuštěných těles o rozměrech 5x35x240 mm (tloušťka, šířka, délka), u nichž vyšly hodnoty K_{ohC} mezi 0,039 a 0,043. K takovýmto hodnotám bylo dosaženo i v této práci, konkrétně u souborů těles 1, 4, 5, 6, 7 a 9.

V závěrečné práci Kočová (2020) byly testovány soubory z bukových těles o rozměrech BK-10-100 a BK-20-200. Soubor BK-10-100 dosáhl hodnot K_{ohC} 0,04, což odpovídá souboru 1 v této práci s hodnotou K_{ohC} 0,041. Druhý soubor BK-20-200 dosáhl hodnot K_{ohC} 0,04 s variačním koeficientem 25,85%, což úplně neodpovídá výsledkům souboru 2 v této práci s hodnotou K_{ohC} 0,048 s variačním koeficientem 13,89%. K tomuto rozdílu mohlo dojít například kvůli nižším nárokům na výběr zkušebních těles.

9.2.2 Minimální poloměr ohybu

Výsledky R_{min} z Tabulky 5 jsou pro přehlednost zpracovány do grafu, viditelného na Obrázku 33. Co se týče posouzení R_{minC} a R_{minB} je patrný z výsledků trend dosahování vyšších hodnot než u R_{minC} . Z výsledných hodnot minimálního poloměru vyplývá, že se zvětšující tloušťkou a vzdáleností podpěr dochází k nárůstu hodnot minimálního poloměru ohybu.

Pro upřesnění byl vytvořen Duncanův test, viz Příloha 5 (Tabulka 14), z něhož se jeví jako statisticky velmi významný rozdíl pro všechny testované soubory s hladinou významnosti $P=0,000 - 0,012$. Při porovnání souborů (1, 2) dochází k nárůstu hodnot o 46 %. Kdybychom chtěli docílit, co nejmenšího poloměru ohybu, bylo by vhodné volit nejmenší tloušťky a zároveň dodržet menší vzdálenost podpěr při ohybu. Srovnáme-li soubory 4 a 5, je z grafu patrné, že došlo k nejmenšímu nárůstu hodnot, pouze o necelých 13 %. Při srovnání hodnot souborů 9 a 10, je z grafu patrné, že došlo k většímu nárůstu hodnot, než u předchozích souborů, tento nárůst činí 25 %. V případě porovnání průměrných hodnot souborů BK-10-100 a BK-100-1000, došlo v tomto porovnání nejmenších a největších souborů k nárůstu hodnot R_{miC} o téměř 1042 %. Z grafu je dále patrné, že obecně je menšího poloměru ohybu docíleno v případě R_{minC} . Z naměřených výsledků lze potvrdit, že se vzrůstající tloušťkou bude docházet ke statisticky významnému rozdílu a z toho vyplývajícího nárůstu hodnot R_{min} .



Obrázek 33 Interakce tloušťky a vzdálenosti podpěr na hodnoty minimálního poloměru ohybu $R_{\min C}$ a $R_{\min B}$

V závěrečné práci Kočová (2020) byly testovány soubory z bukových těles o rozměrech BK-10-100 a BK-20-200, na hodnoty minimálního poloměru. Soubor 1 dosáhl hodnot $R_{\min C}$ 267,43 a $R_{\min B}$ 357,56. V této práci bylo dosaženo hodnot $R_{\min C}$ 234,30 a $R_{\min B}$ 377,71 u souboru 1. Druhý soubor BK-20-200 dosáhl hodnot $R_{\min C}$ 414,63 a $R_{\min B}$ 834,10. V této práci bylo dosaženo hodnot $R_{\min C}$ 435,27 a $R_{\min B}$ 638,60 u souboru 2. K tomuto rozdílu mohlo dojít například kvůli nižším nárokům na výběr zkušebních těles, jiným způsobem testování, rozdílným typem zatížení, případně jiným nastavením podpěr a času testování.

10 Závěr

Cílem práce bylo zanalyzovat vliv tloušťky materiálu v interakci s úměrně se měnící vzdáleností podpěr, která odpovídala desetinásobku tloušťky k vybraným ohybovým charakteristikám. Sledované ohybové charakteristiky byly koeficienty ohybatelnosti, s tím související minimální poloměry ohybu, meze úměrnosti a pevnosti.

V případě analyzování výsledků napětí na mezi úměrnosti se statisticky významný rozdíl jeví u souboru 1, při srovnání s ostatními soubory. Pro hodnoty meze úměrnosti byl analyzován pokles hodnot do souboru 6. Od tohoto souboru docházelo k opětovnému nárůstu průměrných hodnot. Na základě těchto výsledků by se tedy dalo konstatovat, že byl zaznamenán pokles hodnot s měnící se tloušťkou a vzdáleností podpěr, ale pouze do určitých rozměrů zkušebních těles. Následovalo analyzování pomocí korelace, viz Příloha 6 (Obrázek 34). Výsledné hodnoty jsou zde graficky znázorněny. Hodnota spolehlivosti R v tomto případě vyšla 0,34. Tato nízká hodnota vypovídá o tom, že se neprojevila vzájemná závislost mezi vzdáleností podpěr na hodnoty napětí na mezi úměrnosti.

Hodnoty napětí na mezi pevnosti vypovídají o poklesu hodnot v případě zvětšujících se rozměrů zkušebních těles. Analyzování potvrdilo statisticky významné rozdíly u souborů 1, 2 a 10, kde došlo k velmi významnému rozdílu hodnot vůči ostatním souborům. Při porovnání souboru 1 a 10 došlo k poklesu hodnot napětí na mezi pevnosti o 37,4 %. Výsledné hodnoty napětí na mezi pevnosti byly dále analyzovány pomocí korelace, viz Příloha 6 (Obrázek 35). Výsledky jsou zde graficky znázorněny. Hodnota spolehlivosti R v tomto případě vyšla 0,68, což vypovídá o částečné vzájemné závislosti vzdálenosti podpěr a napětí na mezi pevnosti.

Výsledné hodnoty síly na mezi úměrnosti odpovídají předpokladu, že se zvětšujícím se tělesem bude docházet k nárůstu hodnot síly (N). Při zvětšování rozměrů těles je tedy viditelná vzestupnost hodnot. Porovnávání souboru 1 a 10 vypovídá o navýšení síly potřebné pro mez úměrnosti o 742,3 %. Analyzování statistické významnosti rozdílu se projevila u všech souborů. Toto tvrzení bylo analyzováno pomocí korelace, viz Příloha 7 (Obrázek 36). Výsledky jsou zde graficky znázorněny. Hodnota spolehlivosti R v tomto případě vyšla 0,965, což vypovídá o velmi významné vzájemné závislosti vzdálenosti podpěr a hodnot síly na mezi úměrnosti.

Nejvyšších hodnot síly na mezi pevnosti bylo dosaženo u souboru 10. Hlubší analyzování i zde potvrdilo statisticky významné rozdíly hodnot, stejně jako v případě hodnot síly na mezi úměrnosti. Výsledné hodnoty byly analyzovány pomocí korelace, viz Příloha 7 (Obrázek 37). Výsledky jsou zde graficky znázorněny. Hodnota spolehlivosti R v tomto případě vyšla 0,961. Tento výsledek vypovídá o významné vzájemné závislosti vzdálenosti podpěr a hodnot síly na mezi pevnosti. Prokázalo se, že s rostoucí tloušťkou testovaného tělesa se zvyšuje i hodnota síly potřebné pro zlomení. Z těchto výsledků vyplývá, že i síla na mezi pevnosti je závislá na rozměrech zkušebních těles.

V případě průhybů na mezi úměrnosti je viditelný vzrůstající trend výsledných hodnot. V porovnání souborů 1 a 10 došlo ke zvětšení průhybu o 10,13 mm. Největšího průhybu dosáhl soubor 10, s čímž se i teoreticky počítalo. Analyzováním se projevil statisticky významný rozdíl pro všechny testované soubory. Z naměřených výsledků se potvrdit předpoklad, že se vzrůstající tloušťkou se dosahuje většího průhybu na mezi úměrnosti. Analyzování pomocí korelace, viz Příloha 8 (Obrázek 38), kde jsou výsledky graficky znázorněny. Hodnota spolehlivosti R zde vyšla 0,965. Tento výsledek vypovídá o významné vzájemné závislosti vzdálenosti podpěr na hodnoty průhybů na mezi úměrnosti.

U průhybu na mezi pevnosti se prokázalo, že bude docházet se vzrůstající vzdáleností podpěr ke statisticky významnému rozdílu. Při porovnání souborů 1 a 10 došlo ke zvětšení průhybu o 28,54 mm, což činí nárůst hodnot o téměř 870 %. Následné analyzování pomocí korelace, viz Příloha 8 (Obrázek 39), kde se nachází grafické znázornění výsledků. Hodnota spolehlivosti R vyšla 0,957. Tento výsledek vypovídá o významné vzájemné závislosti vzdálenosti podpěr na hodnoty průhybů na mezi pevnosti. Dalo by se tedy říci, že měnící se vzdálenost podpěr má významný vliv na výsledné hodnoty průhybů na mezi pevnosti.

Výsledky této práce potvrdily, že většího koeficientu ohýbatelnosti je dosahováno u K_{ohC} . Četné vědecké studie vypovídají, že koeficienty založené na základní ohybové rovnici (K_{ohC}) jsou podstatně vyšší než koeficienty založené na geometrickém přístupu (K_{ohB}). Výsledky se shodují například s výzkumem Gaff *et al.* (2016). Tento rozdíl výsledných hodnot činí přibližně 30 %. Při menší tloušťce materiálu bylo dosaženo i nižších hodnot koeficientu ohýbatelnosti než u tlustších souborů. Tomuto tvrzení odpovídaly hodnoty souboru BK-10-100, kde bylo dosaženo nižšího koeficientu

ohýbatelnosti než u BK-20-200. Analyzování jeví jako statisticky významný rozdíl u souboru 2 s porovnáním se všemi testovanými soubory těles. Nejvyšších hodnot K_{ohC} dosáhl soubor BK-20-200. Nepotvrdilo se zde očekávání, že bude docházet ke zmenšování koeficientu ohybatelnosti. V případě porovnání souborů 4 a 5, při srovnání s výše zmíněným souborem 2, došlo ke statisticky významnému poklesu hodnot. Následné analyzování pomocí korelace, viz Příloha 9 (Obrázek 40), kde se nachází grafické znázornění výsledků. Hodnota spolehlivosti R vyšla 0,175. Tento výsledek vypovídá o nevýznamné závislosti vzdálenosti podpěr na hodnoty koeficientu ohybatelnosti K_{ohC} . Obdobný výsledek korelace platí i v případě posouzení K_{ohB} , viz Příloha 9 (Obrázek 41). Hodnota spolehlivosti R vyšla obdobně nízká 0,235. V případě posouzení vlivu vzdálenosti podpěr na hodnoty K_{oh} , se podle literatury mělo projevit, že s větší vzdáleností podpěr se snižují hodnoty koeficientu ohýbatelnosti. V této práci hodnoty koeficientu ohybatelnosti vypovídají o závislosti mezi vzdáleností podpěr a tloušťkou zkušebních těles, ale pouze do určité tloušťky. Z analýzy je patrné, že od souboru 1 až 3 je skokový nárůst hodnot K_{oh} . Domnívám se, že hodnoty souboru 4 mohlo ovlivnit smykové napětí, které dále ovlivňovalo další soubory. Zde by bylo dobré, v případě navazující práce, zabývat se analyzováním smykového napětí, které by mohlo napomoci s odůvodněním těchto výsledků a rozšířením poznatků.

Koeficient ohýbatelnosti je závislý na hodnotách minimálního poloměru ohybu. V případě posouzení hodnot R_{minB} je patrné z výsledků dosahování vyšších hodnot než u R_{minC} . Z výsledných hodnot minimálního poloměru vyplývá, že se zvětšující tloušťkou a vzdáleností podpěr dochází k nárůstu hodnot. Pro analyzování se jeví jako statisticky významný rozdíl pro všechny testované soubory. Kdybychom chtěli docílit, co nejmenšího poloměru ohybu, bylo by vhodné volit nejmenší tloušťky a zároveň dodržet menší vzdálenost podpěr při ohybu. V případě porovnání hodnot souborů 1 a 10, došlo v tomto porovnání nejmenších a největších souborů k nárůstu hodnot R_{miC} o téměř 1042 %. Následné analyzování pomocí korelace, viz Příloha 10 (Obrázek 42), zde se nachází grafické znázornění výsledků. Hodnota spolehlivosti R vyšla 0,958. Stejně tak platí při korelaci, viz Příloha 10 (Obrázek 43). Hodnota spolehlivosti R vyšla 0,957. Tento výsledek vypovídá o významné závislosti vzdálenosti podpěr na hodnoty minimálního poloměru ohybu.

Naměřené hodnoty z experimentální části této diplomové práce by mohly napomoci lépe porozumět problematice úměrně se měnící tloušťky s interakcí vzdálenosti podpěr a následným ovlivněním ohybových charakteristik.

Naměřené hodnoty z bukových těles vykazaly relativně dobré pevnostní a pružnostní charakteristiky při ohybu. V případě využití v praxi, by se tyto výsledky mohly využít pro zjišťování ohybových charakteristik neplastifikovaných bukových prvků, při tvorbě tvarově nenáročného ohýbaného sedacího nábytku. Zároveň by tyto výsledky mohly napomoci při výběru rozměrových poměrů nosníků, u nichž se vyžaduje spíše nižší ohybatelnost. Dále by výsledky mohly napomoci při volbě vstupního materiálu pro tvorbu ohýbaných prvků, u nichž i zde je velice důležitý poměr rozměrů.

11 Seznam použité literatury

Anova, Neubauer [online]. © 2010. [cit.2020-14-7]. Dostupné z: <https://k101.unob.cz/~neubauer/pdf/anova.pdf>

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

Bodig J., Jayne B. A., *Mechanics of wood and wood composites* Originally published: Van Nostrand-Reinhold Co., Inc., New York, NY (1982), Reprint edition 1993 with corrections p. 128-146

Böhm M., Reisner J., Bomba J. (2012): *Materiály na bázi dřeva*. Česká zemědělská univerzita v Praze, 183 s. ISBN 978-80-213)2251-6

Borůvka, Vlastimil a Marián Babiak. *Vlastnosti dřeva v příkladech*. V Praze: Česká zemědělská univerzita, 2016. ISBN 978-80-213-2618-7

Brownell, Blaine Erickson. *Transmaterial next: a catalog of materials that redefine our future*. New York: Princeton Architectural Press, 2017. ISBN 9781616895600

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

ČSN EN 310. *Stanovení modulu pružnosti v ohybu a pevnosti v ohybu*. Praha: Český normalizační institut.

Dalheim, R. *Woodworking network* [online]. *Woodworking network*, 2017 [cit. 2021-05-12]. Dostupné z: <https://www.woodworkingnetwork.com/technology/cold-bend-hardwood-bends-fix-desired-shape>

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

Dostalík, Milan, Martina Lehmannová a Jiří Uhlíř. *150 let ohýbaní dřeva: 150 years of bending wood* : Bystřice pod Hostýnem 1861-2011. Bystřice pod Hostýnem: Ton, 2011. ISBN 978-80-254-8999-4.

Dřevo od A do Z. 5. vyd. Přeložil Lumír Mikulka. Čestlice: Rebo, 2013. Klub čtenářů (Rebo). ISBN 978-80-255-0717-9.

Dřevostavitel [online]. © 2019. [cit.2020-16-5]. Dostupné z: <https://www.drevostavitel.cz/clanek/ohybani-dreva>

Dubjaková, Eva, Metody mnohonásobného porovnávání pro jednoduché třídění Brno, 2009 [cit. 2022-06-02]. Dostupné z: https://is.muni.cz/th/zk6eu/diplomova_prace_ed.pdf Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Masarykova univerzita přírodovědecká fakulta, Ústav Vedoucí práce RNDr. Marie Budíková, Dr.

Dubovský, Ján. Ohybové charakteristiky a kvalita dřeva. Zvolen: VŠLD, 1993. ISBN 80-228-0273-5.

Dům a byt [online]. © 2008. [cit. 2020-20-6]. Dostupné z: https://www.dumabyt.cz/rubriky/dum/materialy-a-technologie/variace-na-tema-drevo-a-kompozity_19489.html

Esteves, Bruno, Pereira, Helena, 2009. Wood modification by heat treatment: A review. Vyd. BioResources ISBN 1930-2126

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., Gašparík, M., Babiak, M., a 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., Vokatý, V., Baiak, M., and Vokatý, V. (2016). "Coefficient of wood bendability as a function of selected factors," Construction and Building Materials 126, 632-640. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.09.085

Gaff, M.; Babiak, M.; Vokatý, V.; Gašparík, M.; Ruman, D. (2017a). "Bending characteristics of hardwood lamellae in the elastic region", Composites Part B Engineering 116, 61-75 [online]. 2017 [cit. 2021-21-7]. Dostupné z WWW: https://www.researchgate.net/publication/313862850_Bending_characteristics_of_hardwood_lamellae_in_the_elastic_region

Hájek, Václav. Stavíme ze dřeva. Praha: Sobotáles, 1997. ISBN 80-85920-44-1.

Havel - composites s. r. o. [online]. © 2018. [cit. 2020-20-6]. Dostupné z: <http://www.havel-composites.com/clanky/0-home/76-Tecnologia-su-descripcion-y-esquemas.html>

Heavea wood [online]. © 2014. [cit. 2020-22-6]. Dostupné z: <https://www.heveawood.cz/sparovky-a-jejich-vlastnosti/>

Hlásková - Ohýbání a lamelování masivního dřeva [online]. © 2018. [cit. 2020-24-6]. Dostupné z: https://fraxinus.mendelu.cz/vyuka/soubory/TMZD_NMS/Povinne_volitelne_predmety/Tvarovani_materialu_na_bazi_dreva/pr04%20Oh%c3%bdb%c3%a1n%c3%ad.pdf

Hlásková - Tvarování materiálu na bázi dřeva [online]. © 2018. [cit. 2020-14-7]. Dostupné z: https://fraxinus.mendelu.cz/vyuka/soubory/TMZD_NMS/Povinne_volitelne_predmety/Tvarovani_materialu_na_bazi_dreva/pr03_Plastifikace.pdf

Homel.vsb [online]. © 2020. [cit. 2020-14-7]. Dostupné z: https://homel.vsb.cz/~khe0007/opory/opory.php?stranka=drevo_zkouseni

Horáček P., Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva I, MZLU v Brně, 2001. ISBN 80-7157-347-7

ISO 13061-1 Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva (2014) - Zkušební metody pro malé číré vzorky dřeva - Část 1: Stanovení obsahu vlhkosti pro fyzikální a mechanické zkoušky.

ISO 13061-2 Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva (2014) - Zkušební metody pro malé číré vzorky dřeva - Část 2: Stanovení hustoty pro fyzikální a mechanické zkoušky.

Jarošová, M. - výuková prezentace - Vlastnosti dřeva - vrchol trojúhelníku statiky [online]. © 2016. [cit. 2021-14-6]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/8339594-Vlastnosti-dreva-3-vrchol-trojuhelniku-statiky.html>

Kočová, S. Vliv geometrických parametrů ohýbání na hodnoty koeficientu ohýbatelnosti [online]. Praha, 2020 [cit. 2022-23-01]. Dostupné z: https://is.czu.cz/auth/zp/portal_zp.pl?podrobnosti_zp=263017; Diplomová práce. Česká Zemědělská Univerzita v Praze, Fakulta lesnická a dřevařská, Katedra zpracování dřeva a biomateriálů. Vedoucí práce: doc. Ing. Milan Gaff, PhD.

Křupalová Zdeňka, 2002. Technologie: pro II. ročník SOU oboru truhlář pro výrobu nábytku. Praha: Sobotáles, 115 s. ISBN 80-85920-91-3

Křupalová Zdeňka, 2003. Nauka o materiálech: pro 1. a 2. ročník SOU učebního oboru truhlář. Praha: Sobotáles, 240 s. ISBN 80-85920-57-3.

Kúdela, Jozef. Analýza príčin defektov plastifikovaného bukoveho dreva v procese ohýbania. Trieskové a beztrieskové obrábanie dreva: III. Medzinárodná vedecká konferencia. 2002, s. 117-122.

Kundera Hynek, Vliv vlhkosti na rychlost šíření zvuku dřevem [online]. Brno, 2014 [cit. 2022-21-03]. Dostupné z: <https://theses.cz/id/8179jn/18023286>; Bakalářská práce. Mendelova univerzita v Brně, Lesnická a dřevařská fakulta, Ústav nauky o dřevě. Vedoucí práce: Ing. Janu Tippnerovi, Ph. D.

Liška, Jan. Truhlářské práce: technologie: 2. a 3. ročník: učebnice pro odborná učiliště. Praha: Parta, 2003. ISBN 80-7320-019-8.

Mahmood, MR et al., 2013.: Thermal Stability and Decay Resistance Properties of Tropical Wood Polymer Nanocomposites (WPNC) <https://doi.org/10.1177/0021998312448678>

Maněnová, Martina a Jan Novotný. Práce s dřevem II. Praha: Raabe, 2015. Dobrá škola. ISBN 978-80-7496-199-1.

Militz Holger, 2002. Heat treatment of wood: European processes and their background. In: Proceedings of conference on “Enhancing the durability of lumber and engineered wood products”, February 11–13, Kissimmee, Orlando.

Navi Paris, Sandberg Dick, 2012. Thermo-hydro-mechanical wood processing. Boca Raton: CRC Press, 360 s. ISBN 978-1-4398-6042-7.

Nemec, Lubomír, Ján Zemiar a Elemír Šulán. Technológia výroby nábytku: celoštátna vysokoškolská učebnica pre Drevársku fak. Vys. šk. les. a drevárskej vo Zvolene. Bratislava: Alfa, 1986. Edícia drevárskej, celulozárskej a papiernickej literatúry.

Niemz, P. (2016). "Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe," Educational Material, ETH-Zürich. DOI: doi.org/10.3929/ethz-a-010635628

Nutsch, W. a kol.: Příručka pro truhláře. Praha, Sobotáles 1999. ISBN 80-85920-60-3.

Okrasné dřeviny [online]. © 2011. [cit. 2021-12-8]. Dostupné z: <http://www.dreviny-okrasne.cz/listnace/buk/fagus-sylvatica-zlatia>

Okrasné dřeviny [online]. © 2014. [cit. 2021-20-8]. Dostupné z: <http://www.dreviny-okrasne.cz/listnace/buk/fagus-sylvatica-rohanii-3>

Pařil, P., Brabec, M., Maňák, O., Rousek, R., Rademacher, P., Čermák, P., Dejmal, A., 2014: Comparison of selected physical and mechanical properties of densified beech wood plasticized by ammonia and saturated steam. *European Journal of Wood and Wood Products* 72(5): 583-591. DOI: 10.1007/s00107-014-0814-8.

Paul, P. Hodnocení pevnosti v ohybu sendvičového materiálu [online]. Praha, 2019 [cit. 2022-06-03]. Dostupné z: https://is.czu.cz/auth/zp/index.pl?podrobnosti_zp=245678; Diplomová práce. Česká Zemědělská Univerzita v Praze, Fakulta lesnická a dřevařská, Katedra zpracování dřeva a biomateriálů. Vedoucí práce: doc. Ing. Milan Gaff, PhD.

Požgaj, Alexander; Chovanec, Dušan; Kurjatko, Stanislav; Babiak, Marián. Štruktúra a vlastnosti dreva. 2. vyd. Bratislava: Príroda, 1997. 488 s. ISBN 80-07-00960-4.

Praque art [online]. © 2016. [cit. 2021-16-9]. Dostupné z: <http://www.praque-art.cz/katalog/vyrobci/35-thonet/>.

Reinprecht L.; Vidholdová Z.; 2008. Termodrevo – príprava, vlastnosti a aplikácie. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2008. ISBN 978-80-228-1920-6.

Sandberg, D., Navi, 2011. Thermo-hydro-mechanical Processing of Wood. Lausanne, EPFL Press. ISBN 978-2-940222-41-1

Sikora A., Gaffová Z., Rajnoha R., Šatanová A., Kminiak R (2017). Deflection of Densified Beech and Aspen Woods as a Function of Selected Factors [cit. 2022-02-16]. DOI: 10.15376/biores. 12.2.3192-3210. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/353196045_Bending_Work_of_Laminated_Materials_Based_on_Densified_Wood_and_Reinforcing_Components

Stark, N., 1997: Effect of Species and Particle Size on Properties of Wood-Flour-Filled Polypropylene Composites. In: Functional Fillers for Thermoplastics and Thermosets. Le Meridien at Coronado, San Diego, California, USA, 22 p.

Stevens, W. C.; Turner, N. Wood Bending Handbook: Fox Chapel Publishing, 2007. 118 s. ISBN 1565233549

Svoboda, T., Gaffová, Z., Rajnoha, R., Šatanová, A., Kminiak, R. Bending Forces at the Proportionality Limit and the Maximum – Technological Innovations for Better Performance in Wood Processing Companies. BioResources [online]. 2017, 12(2), 4146-4165 [cit. 2022-02-16]. DOI: 10.15376/biores.12.2.4146-4165. ISSN 1930-2126. Dostupné z: <http://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/11318>

Šimoníková, Jaromíra. Nábytek z Bystřice pod Hostýnem. Bystřice pod Hostýnem: TON s. p. Továrny na ohýbaný nábytek, 1992.

Šlezingerová, Jarmila a Libuše Gandelová, 2002. Stavba dřeva. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita. ISBN 80-7157-636-0.

Štěrbá bike [online]. © 2020. [cit. 2021-14-10]. Dostupné z: <https://www.sterba-bike.cz/fotka/2990/category/galerie>

Trávník, A., Svoboda, J., Technologické procesy výroby nábytku, Skripta. MZLU Brno, 2007.

Trebula Pavel, Klement Ivan, 2002. Sušenie a hydrotermická úprava dreva. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene. 449 s. ISBN 80-228-1182-3.

Truhlářský portál [online]. © 2013. [cit. 2021-14-10]. Dostupné z: <https://www.truhlarskyportal.cz/clanky/10477-predstavujeme-michael-thonet-zajistil-korycanum-jiz-v-19-stoleti-evropsky-vyznam>

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

Uhlíř, Jiří. Thonet - Mundus: ohýbaný nábytek mezi dvěma válkami. Újezd u Brna: Město Újezd u Brna, 2011. ISBN 978-80-260-0636-7.

Úradníček, Luboš. Dřeviny České republiky. 2., přeprac. vyd. [Kostelec nad Černými lesy]: Lesnická práce, 2009. ISBN 978-80-87154-62-5.

Vaněk, Jaroslav. Ohýbaný nábytek. Praha: Průmyslové vydavatelství, 1952. 112 s. ISBN 80-228-1292-7

Vavřík, H., Šlezingerová, J., Gandelová, L. Anatomická stavba dřeva - výukové texty. [online]. © 2002. [cit. 2021-24-2]. Dostupné z: http://wood.mendelu.cz/nod/e107_cz/nod_plugins/projects/stavba_dreva/index.htm.

Vegesack, Alexander von a Thonet, Michael. Das Thonet Buch. München: Bangert, 1987. ISBN 10: 3925560092

Vinter, B - výuková prezentace - Tváření dřeva a ostatních materiálů [online]. © 2014. [cit. 2021-14-6]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/3064563/>

Walker, Aidan, ed. Dřevo: Velká encyklopedie: 150 druhů dřeva: podrobný průvodce "strom za stromem": svět nejvšestrannějšího přírodního zdroje. Praha: Grada, 2009. ISBN 978-80-247-2858-2.

Woodcote stavebniny [online]. © 2018. [cit. 2021-14-6]. Dostupné z: <https://www.woodcote.cz/stavebniny/materialy-ze-dreva/hranoly-kvh-bsh>

Zeidler, Aleš a Vlastimil Borůvka. Stavba a vlastnosti dřeva hospodářsky významných dřevin - podklady pro cvičení. V Praze: Česká zemědělská univerzita, 2016. ISBN 978-80-213-2674-3.

Zemiar, J., Gáborík, J., Solár, M., and Kotrady, M. (2000). "Tvárnenie dreva ohýbaním [Shaping of wood by bending]," Technical University in Zvolen, Zvolen, Slovakia, 70 pp. (in Slovak). ISBN: 8022809306

Zemiar, J., Palko, M., Makovíny, I., and Gašparík, M. (2009) "Temperature and moisture profiles at microwave heating of wood," Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW, Forestry and Wood Technology 67, 283-288.

12 Seznam příloh

Příloha 1 Mez úměrnosti a pevnosti.....	90
Příloha 2 Síly na mezi úměrnosti a pevnosti.....	91
Příloha 3 Průhyb na mezi úměrnosti a pevnosti.....	92
Příloha 4 Koeficient ohybatelnosti.....	93
Příloha 5 Minimální poloměr ohybu	94
Příloha 6 Vliv vzdálenosti podpěr na mez úměrnosti a pevnosti.....	95
Příloha 7 Vliv vzdálenosti podpěr na sílu meze úměrnosti a pevnosti.....	95
Příloha 8 Vliv vzdálenosti podpěr na průhyb meze úměrnosti a pevnosti	97
Příloha 9 Vliv vzdálenosti podpěr na koeficient ohybatelnosti	98
Příloha 10 Vliv vzdálenosti podpěr na minimální poloměr ohybu	99

Příloha 1 Mez úměrnosti a pevnosti

Tab. 6 Porovnání účinků vzdálenosti podpěr pomocí Duncanova testu na hodnoty meze úměrnosti

Duncanův test σ_u (MPa)										
Kód	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}	{6}	{7}	{8}	{9}	{10}
BK-10-100		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
BK-20-200	0,000		0,038	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,024	0,097
BK-30-300	0,000	0,038		0,209	0,034	0,010	0,033	0,070	0,798	0,602
BK-40-400	0,000	0,001	0,209		0,343	0,175	0,337	0,520	0,279	0,090
BK-50-500	0,000	0,000	0,034	0,343		0,628	0,976	0,701	0,056	0,009
BK-60-600	0,000	0,000	0,010	0,175	0,628		0,632	0,422	0,019	0,002
BK-70-700	0,000	0,000	0,033	0,337	0,976	0,632		0,702	0,053	0,009
BK-80-800	0,000	0,000	0,070	0,520	0,701	0,422	0,702		0,103	0,023
BK-90-900	0,000	0,024	0,798	0,279	0,056	0,019	0,053	0,103		0,468
BK-100-1000	0,000	0,097	0,602	0,090	0,009	0,002	0,009	0,023	0,468	

Tab. 7 Porovnání účinků vzdálenosti podpěr pomocí Duncanova testu na hodnoty meze pevnosti

Duncanův test σ_{max} (MPa)										
Kód	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}	{6}	{7}	{8}	{9}	{10}
BK-10-100		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
BK-20-200	0,000		0,012	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
BK-30-300	0,000	0,012		0,129	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
BK-40-400	0,000	0,000	0,129		0,001	0,013	0,007	0,006	0,000	0,000
BK-50-500	0,000	0,000	0,000	0,001		0,387	0,580	0,595	0,282	0,003
BK-60-600	0,000	0,000	0,000	0,013	0,387		0,702	0,694	0,068	0,000
BK-70-700	0,000	0,000	0,000	0,007	0,580	0,702		0,986	0,125	0,001
BK-80-800	0,000	0,000	0,000	0,006	0,595	0,694	0,986		0,135	0,001
BK-90-900	0,000	0,000	0,000	0,000	0,282	0,068	0,125	0,135		0,046
BK-100-1000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,003	0,000	0,001	0,001	0,046	

Příloha 2 Síly na mezi úměrnosti a pevnosti

Tab. 8 Porovnání účinků vzdálenosti podpěr pomocí Duncanova testu na hodnoty síly meze úměrnosti

Duncanův test F_E (N)										
Kód	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}	{6}	{7}	{8}	{9}	{10}
BK-10-100		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
BK-20-200	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
BK-30-300	0,000	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
BK-40-400	0,000	0,000	0,000		0,008	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
BK-50-500	0,000	0,000	0,000	0,008		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
BK-60-600	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		0,005	0,000	0,000	0,000
BK-70-700	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,005		0,000	0,000	0,000
BK-80-800	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000
BK-90-900	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		0,000
BK-100-1000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	

Tab. 9 Porovnání účinků vzdálenosti podpěr pomocí Duncanova testu na hodnoty síly meze pevnosti

Duncanův test F_P (N)										
Kód	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}	{6}	{7}	{8}	{9}	{10}
BK-10-100		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
BK-20-200	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
BK-30-300	0,000	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
BK-40-400	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
BK-50-500	0,000	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
BK-60-600	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000
BK-70-700	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000	0,000
BK-80-800	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		0,003	0,000
BK-90-900	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,003		0,214
BK-100-1000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,214	

Příloha 3 Průhyb na mezi úměrnosti a pevnosti

Tab. 10 Porovnání účinků vzdálenosti podpěr pomocí Duncanova testu na hodnoty průhybu na mezi úměrnosti

Duncanův test Y_E (mm)										
Kód	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}	{6}	{7}	{8}	{9}	{10}
BK-10-100		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
BK-20-200	0,000		0,006	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
BK-30-300	0,000	0,006		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
BK-40-400	0,000	0,000	0,000		0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
BK-50-500	0,000	0,000	0,000	0,003		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
BK-60-600	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		0,024	0,000	0,000	0,000
BK-70-700	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,024		0,000	0,000	0,000
BK-80-800	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000
BK-90-900	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		0,000
BK-100-1000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	

Tab. 11 Porovnání účinků vzdálenosti podpěr pomocí Duncanova testu na hodnoty průhybu na mezi pevnosti

Duncanův test Y_P (mm)										
Kód	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}	{6}	{7}	{8}	{9}	{10}
BK-10-100		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
BK-20-200	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
BK-30-300	0,000	0,000		0,581	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
BK-40-400	0,000	0,000	0,581		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
BK-50-500	0,000	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
BK-60-600	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		0,002	0,000	0,000	0,000
BK-70-700	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002		0,000	0,000	0,000
BK-80-800	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000
BK-90-900	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		0,029
BK-100-1000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,029	

Příloha 4 Koefficient ohybatelnosti

Tab. 12 Porovnání účinků vzdálenosti podpěr pomocí Duncanova testu na hodnoty koeficientu ohybu KohC

Duncanův test K_{ohC}										
Kód	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}	{6}	{7}	{8}	{9}	{10}
BK-10-100		0,000	0,054	0,723	0,885	0,387	0,859	0,189	0,390	0,070
BK-20-200	0,000		0,042	0,000	0,000	0,002	0,000	0,009	0,002	0,000
BK-30-300	0,054	0,042		0,025	0,068	0,249	0,070	0,485	0,255	0,000
BK-40-400	0,723	0,000	0,025		0,642	0,247	0,626	0,107	0,250	0,119
BK-50-500	0,885	0,000	0,068	0,642		0,447	0,963	0,226	0,447	0,059
BK-60-600	0,387	0,002	0,249	0,247	0,447		0,454	0,595	0,973	0,010
BK-70-700	0,859	0,000	0,070	0,626	0,963	0,454		0,229	0,443	0,060
BK-80-800	0,189	0,009	0,485	0,107	0,226	0,595	0,229		0,598	0,002
BK-90-900	0,390	0,002	0,255	0,250	0,447	0,973	0,443	0,598		0,010
BK-100-1000	0,070	0,000	0,000	0,119	0,059	0,010	0,060	0,002	0,010	

Tab. 13 Porovnání účinků vzdálenosti podpěr pomocí Duncanova testu na hodnoty koeficientu ohybu KohB

Duncanův test K_{ohB}										
Kód	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}	{6}	{7}	{8}	{9}	{10}
BK-10-100		0,000	0,000	0,154	0,128	0,897	0,513	0,126	0,256	0,148
BK-20-200	0,000		0,566	0,000	0,001	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000
BK-30-300	0,051	0,566		0,000	0,384	0,595	0,152	0,846	0,107	0,000
BK-40-400	0,154	0,000	0,000		0,644	0,175	0,384	0,109	0,253	0,946
BK-50-500	0,128	0,001	0,108	0,004		0,113	0,070	0,945	0,633	0,003
BK-60-600	0,897	0,000	0,172	0,175	0,113		0,568	0,108	0,235	0,172
BK-70-700	0,513	0,000	0,235	0,384	0,226	0,568		0,189	0,094	0,381
BK-80-800	0,126	0,001	0,128	0,223	0,945	0,108	0,523		0,610	0,003
BK-90-900	0,256	0,000	0,256	0,626	0,633	0,235	0,094	0,610		0,013
BK-100-1000	0,148	0,000	0,000	0,947	0,152	0,012	0,381	0,003	0,013	

Příloha 5 Minimální poloměr ohybu

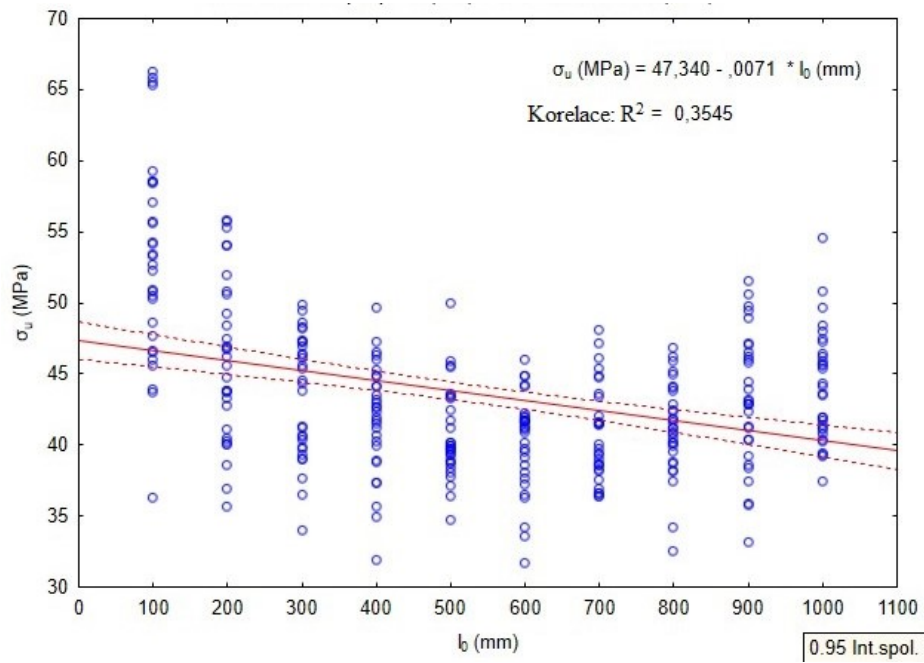
Tab. 14 Porovnání účinků vzdálenosti podpěr pomocí Duncanova testu na hodnoty minimálního poloměru ohybu $R_{\min C}$

Duncanův test $R_{\min C}$										
Kód	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}	{6}	{7}	{8}	{9}	{10}
BK-10-100		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
BK-20-200	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
BK-30-300	0,000	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
BK-40-400	0,000	0,000	0,000		0,012	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
BK-50-500	0,000	0,000	0,000	0,012		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
BK-60-600	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000
BK-70-700	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000	0,000
BK-80-800	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000
BK-90-900	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		0,000
BK-100-1000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	

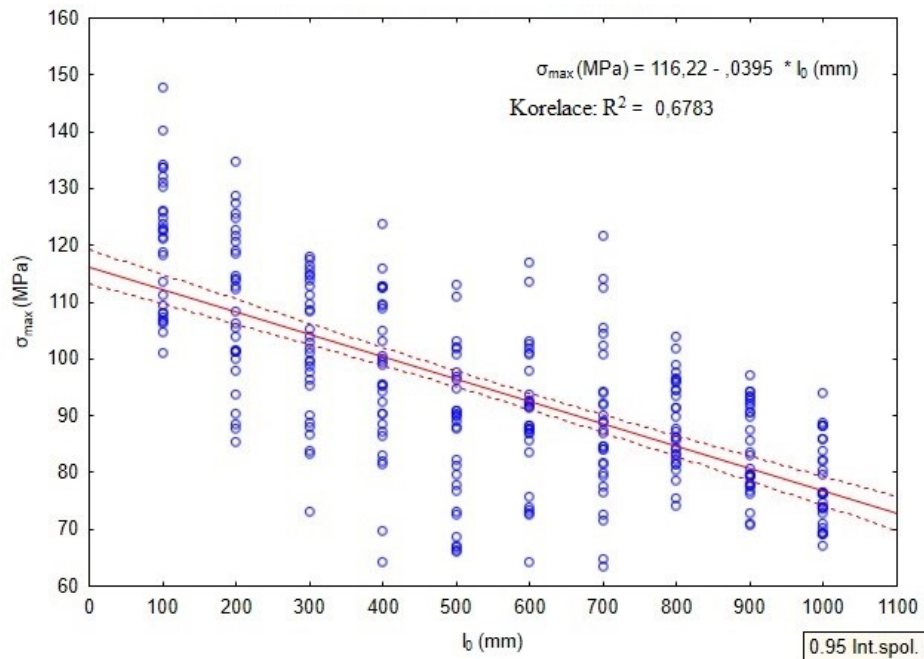
Tab. 15 Porovnání účinků vzdálenosti podpěr pomocí Duncanova testu na hodnoty minimálního poloměru ohybu $R_{\min B}$

Duncanův test $R_{\min B}$										
Kód	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}	{6}	{7}	{8}	{9}	{10}
BK-10-100		0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
BK-20-200	0,001		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
BK-30-300	0,000	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
BK-40-400	0,000	0,000	0,000		0,013	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
BK-50-500	0,000	0,000	0,000	0,013		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
BK-60-600	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000
BK-70-700	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000	0,000
BK-80-800	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000
BK-90-900	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		0,000
BK-100-1000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	

Příloha 6 Vliv vzdálenosti podpěr na mez úměrnosti a pevnosti

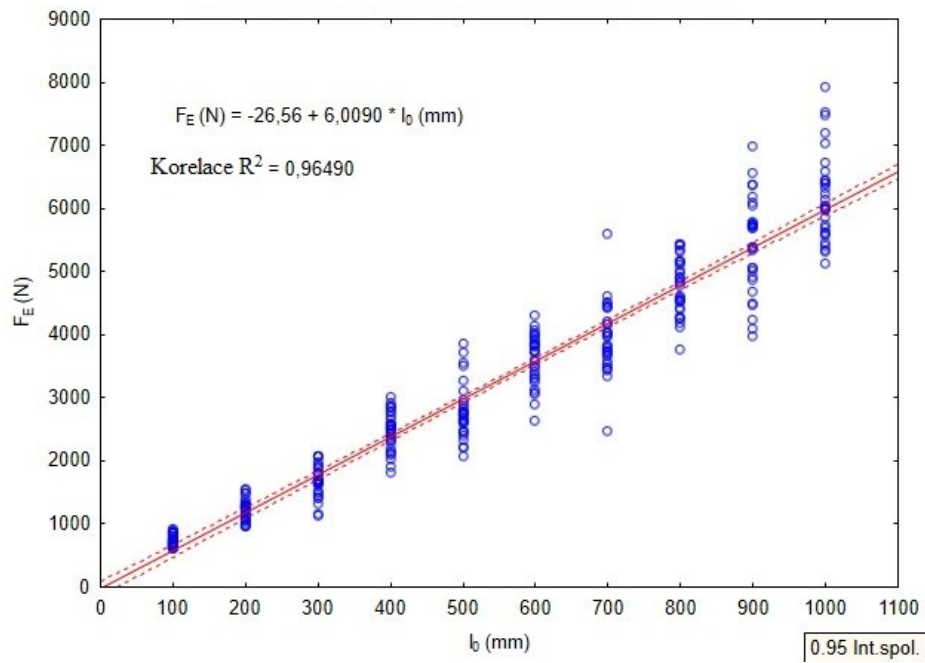


Obrázek 34 Vliv vzdálenosti podpěr (l_0) na hodnoty meze úměrnosti (MPa)

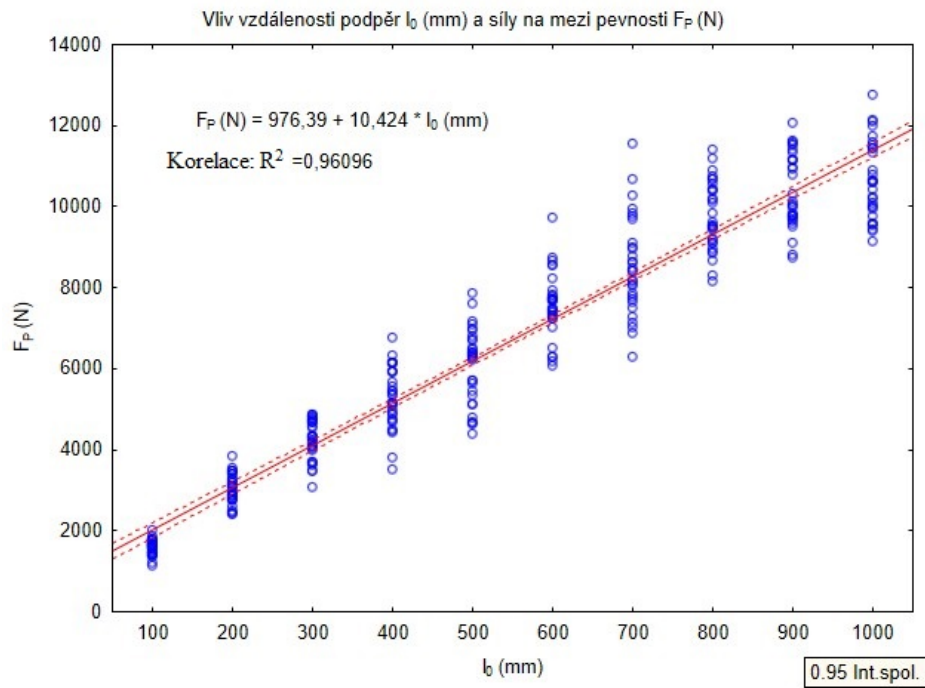


Obrázek 35 Vliv vzdálenosti podpěr (l_0) na hodnoty meze pevnosti (MPa)

Příloha 7 Vliv vzdálenosti podpěr na sílu meze úměrnosti a pevnosti

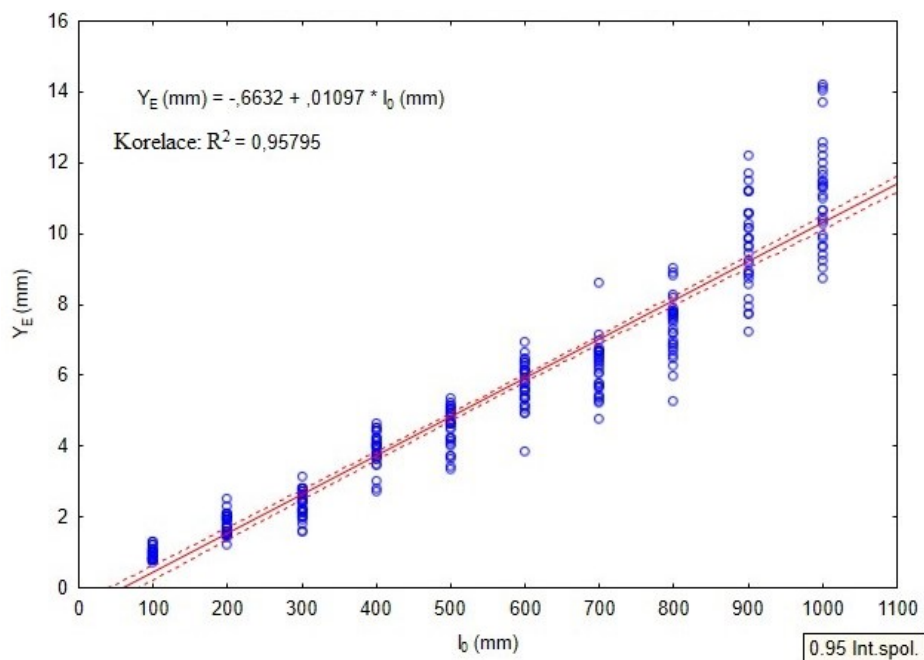


Obrázek 36 Vliv vzdálenosti podpěr (l_0) na hodnoty síly meze úměrnosti (N)

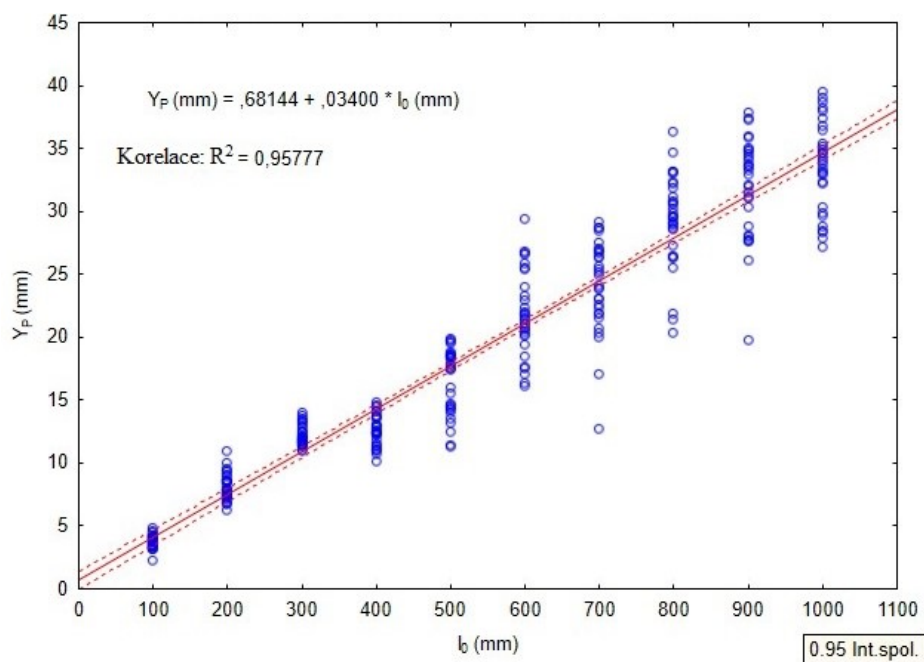


Obrázek 37 Vliv vzdálenosti podpěr (l_0) na hodnoty síly meze pevnosti (N)

Příloha 8 Vliv vzdálenosti podpěr na průhyb meze úměrnosti a pevnosti

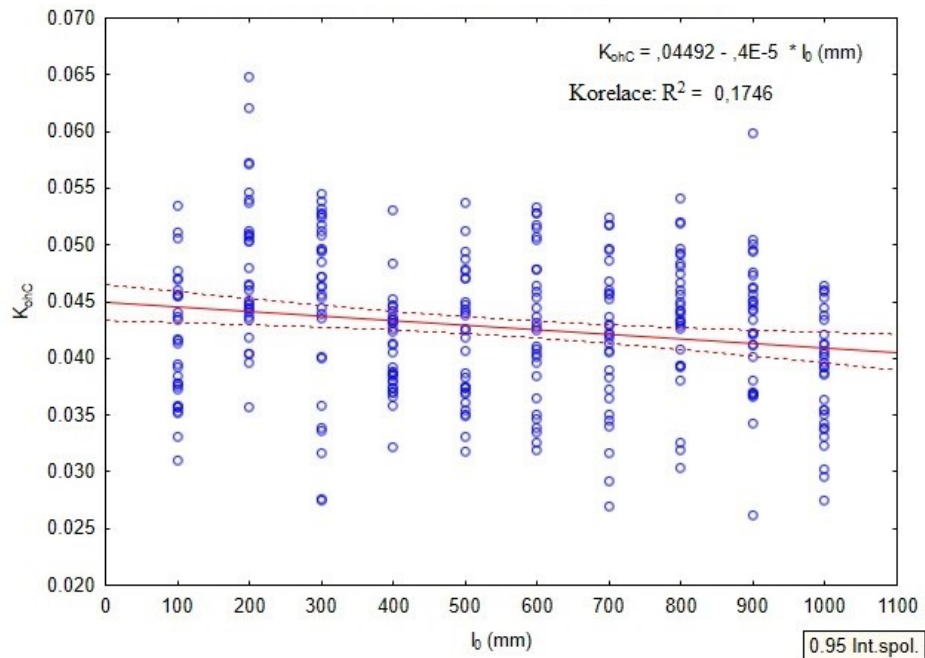


Obrázek 38 Vliv vzdálenosti podpěr (l_0) na hodnoty průhybů meze úměrnosti (mm)

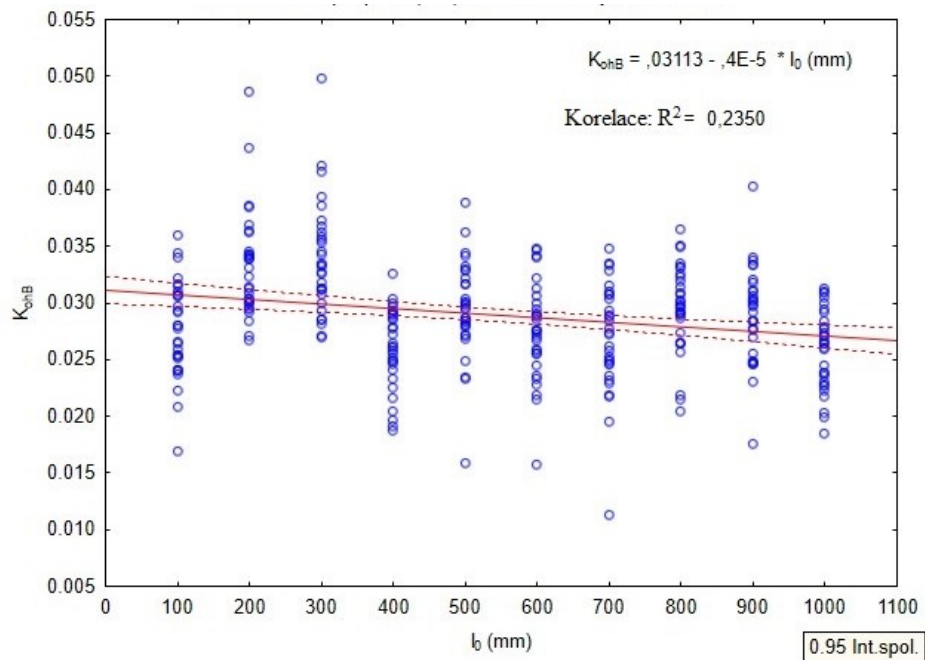


Obrázek 39 Vliv vzdálenosti podpěr (l_0) na hodnoty průhybů meze pevnosti (mm)

Příloha 9 Vliv vzdálenosti podpěr na koeficient ohybatelnosti

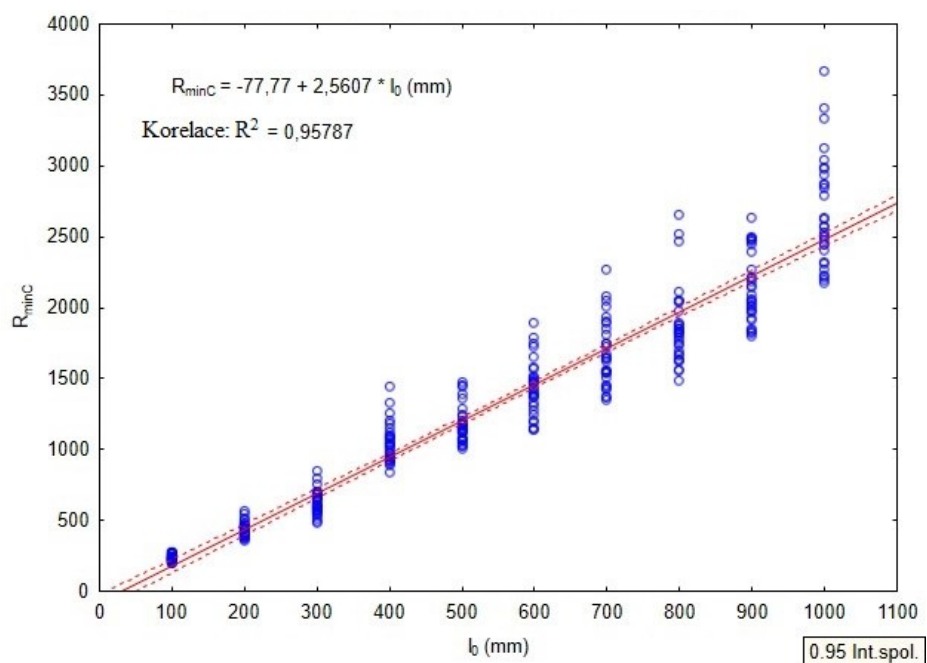


Obrázek 40 Vliv vzdálenosti podpěr (l_0) na hodnoty koeficientu ohybatelnosti K_{ohC}

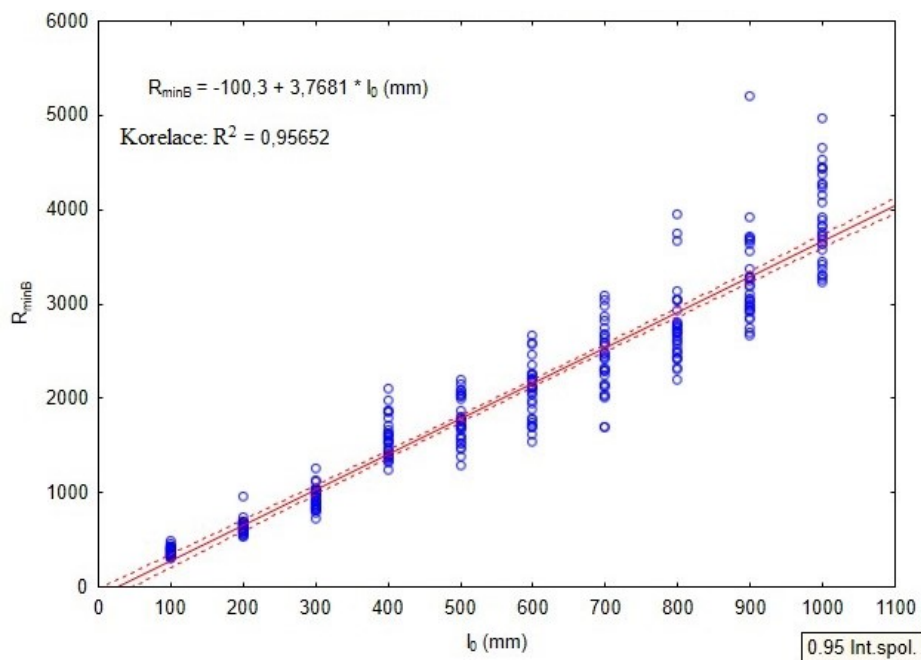


Obrázek 41 Vliv vzdálenosti podpěr (l_0) na hodnoty koeficientu ohybatelnosti K_{ohB}

Příloha 10 Vliv vzdálenosti podpěr na minimální poloměr ohybu



Obrázek 42 Vliv vzdálenosti podpěr (l_0) na hodnoty minimálního poloměru ohybu R_{minC}



Obrázek 43 Vliv vzdálenosti podpěr (l_0) na hodnoty minimálního poloměru ohybu R_{minB}