

Mendelova univerzita v Brně

Lesnická a dřevařská fakulta

Ústav nauky o dřevě

Stanovení mechanických vlastností konstrukčního lepeného hranolu z bukového dřeva

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem práci: Stanovení mechanických vlastností konstrukčního lepeného hranolu z bukového dřeva vypracoval/a samostatně a veškeré použité prameny a informace uvádím v seznamu použité literatury. Souhlasím, aby moje práce byla zveřejněna v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a v souladu s platnou Směrnicí o zveřejňování vysokoškolských závěrečných prací.

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

Dále se zavazuji, že před sepsáním licenční smlouvy o využití díla jinou osobou (subjektem) si vyžádám písemné stanovisko univerzity, že předmětná licenční smlouva není v rozporu s oprávněnými zájmy univerzity, a zavazuji se uhradit případný příspěvek na úhradu nákladů spojených se vznikem díla, a to až do jejich skutečné výše.

V Brně, dne:

Podpis:

Poděkování:

Rád bych na tomto místě především poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Janu Tippnerovi, Ph.D. a dále bych rád poděkoval konzultantovi Ing. Jaromíru Milchovi, Ph.D. za odborné vedení a vstřícný přístup při poskytování cenných rad a poznatků při tvorbě této práce. Také bych rád poděkoval mé rodině, která mi dala možnost studovat na této vysoké škole a byla mi při studiu oporou.

Abstrakt

Autor: Martin Kománek

Název práce: Stanovení mechanických vlastností konstrukčního lepeného hranolu z bukového dřeva

Cílem této práce je experimentálně posoudit dřevo buku lesního (*Fagus sylvatica*, L.) vzhledem k možnostem jeho použití ve stavebnictví. Pro tento účel byly vyrobeny zkušební nosníky ve formě konstrukčních masivních a lepených nosníků o rozměrech 100 x 100 x 1 000 mm. Polovina nosníků byla máčena po dobu třiceti dnů ve vodě pro $w > MH$, druhá polovina byla dlouhodobě klimatizována v podmínkách, ve kterých se rovnovážná vlhkost dřeva ustálila na vlhkosti $\sim 12\%$. Dřevěné nosníky byly podrobeny symetrické 3– bodé a 4– bodé ohybové zkoušce podle ČSN EN 408+A1 (2012). Posuzovanými mechanickými charakteristikami byly mez pevnosti v ohybu, modul pružnosti v ohybu a smykový modul pružnosti stanovený taktéž z ohybové zkoušky.

Podle našeho experimentu, vyšly smykové moduly pružnosti s vysokým rozptylem hodnot, a tedy jsou statisticky nevýznamné. Hodnoty modulů pružnosti v ohybu vyšly pro masivní s $w \approx 12\%$, 7 858 MPa, pro masivní nosníky s $w > MH$, 3 724 MPa, pro nosníky lepené polyuretanovým lepidlem Lear D4 s $w \approx 12\%$, 7 693 MPa a pro nosníky lepené fenolformaldehydovým lepidlem Lignofen G/3/D s $w \approx 12\%$, 7 853 MPa. Pevnosti nosníků vyšly pro masivní s $w \approx 12\%$, 79 MPa, pro masivní s $w > MH$, 41 MPa, pro nosníky lepené polyuretanovým lepidlem Lear D4 s $w \approx 12\%$, 83 MPa a pro lepené fenolformaldehydovým lepidlem s $w \approx 12\%$, 73 MPa.

Výše uvedené hodnoty byly ovlivněny mnoha faktory jako například hustotou, vlhkostí, vadami dřeva nebo kvalitou lepení nosníků.

Klíčová slova: Lepený hranol, 3– bodý ohyb, 4– bodý ohyb, Mez pevnosti v ohybu, Modul pružnosti v ohybu, Smykový modul pružnosti, Buk, hranol

Abstract

Author: Martin Kománek

Thesis title: Determination mechanical properties of glueled beech beam

The aim of this thesis is to experimentally assess the wood of the European beech (*Fagus sylvatica*, L.) with regard to the possibilities of its use in the building industry. For this purpose, were made test samples in the form of solid and glued beams measuring 100 x 100 x 1000 mm. Half of the beams were soaked for thirty days in the water for $w > MH$, the other half was conditioned for long time under conditions equilibrium wood moisture stabilized at a humidity of $\sim 12\%$. The wooden beams were subjected to a symmetrical 3–point and 4–point bending test according to ČSN EN 408+A1 (2012). Examine mechanical characteristic were a strength limit of a bending, an elasticity modulus of the bending and a shear elastic modulus determined also from the bending test.

According to our experiment, the shear moduli of elasticity with high scatter values and therefore statistically insignificant. Flexural modulus values were obtained for massive with $w \approx 12\%$, 7 858 MPa, for massive with $w > MH$ prisms 3 724 MPa, for prisms glued with polyurethane adhesive Lear D4 with $w \approx 12\%$, 7 693 MPa and for prisms bonded with phenol formaldehyde adhesive Lignofen G/3/D with $w \approx 12\%$, 7 853 MPa. The strength of the beams were delivered for massive with $w \approx 12\%$, 79 MPa, for massive $w > MH$, 41 MPa, for beams glued with polyurethane adhesives Lear D4 with $w \approx 12\%$, 83 MPa and for bonded phenol formaldehyde glue with $w \approx 12\%$, 73 MPa.

The above values were influenced by many factors such as density, moisture, wood defects, or the quality of prisms gluing.

Keywords: Glulam beam, 3– point bending, 4– point bending, Modulus of rupture in bending, Modulus of elasticity in bending, Shear modulus, Beech, Beam

Obsah

1.	Seznam obrázků, grafů a tabulek	8
1.1	Seznam obrázků a grafů	8
1.2	Seznam tabulek	9
2.	Úvod.....	11
3.	Cíl práce.....	12
4.	Literární přehled	13
4.1	Buk lesní.....	13
4.2	Anatomická stavba bukového dřeva	13
4.3	Mechanické vlastnosti.....	13
4.3.1	Izotropie a ortotropie mechanických vlastností	13
4.3.2	Tuhost	14
4.3.3	Pevnost.....	15
4.3.4	Testování ohybových vlastností dřeva.....	16
4.3.5	Testování smykových vlastností dřeva	19
4.4	Faktory ovlivňující pevnost a tuhost	20
4.4.1	Vlhkost.....	20
4.4.2	Hustota	21
4.4.3	Vady dřeva.....	23
4.5	Literární rešerše.....	29
5.	Materiál a metodika	32
5.1	Dřevní surovina.....	32
5.2	Lepidla.....	32
5.3	Zařízení a pomůcky.....	33
5.4	Výroba zkušebních nosníků	37
5.5	Analýza vad.....	37

5.6	Výpočty před zkouškou smykových modulů, podle metody variabilního rozponu.....	38
5.7	Výpočet vlhkosti váhovou metodou.....	40
5.8	Výpočty mechanických vlastností pro 3– bodý ohyb	40
5.9	Výpočty mechanických vlastností pro 4– bodý ohyb	41
6.	Výsledky a diskuze	43
6.1	Analýza vad jednotlivých skupin nosníků	43
6.2	Hustota a vlhkost zkušebních nosníků	45
6.3	3– bodý ohyb.....	47
6.3.1	Smykový modul pružnosti z 3– bodého ohybu	47
6.4	4– bodý ohyb.....	48
6.4.1	Pracovní diagramy	48
6.4.2	MOE, MOR– statická ohybový zkouška	51
6.5	Grafy závislostí	53
6.5.1	Grafy závislostí pro G z 3– bodého ohybu	53
6.5.2	Grafy závislostí pro MOE a MOR ze 4– bodého ohybu.....	55
6.6	Popisná statistika.....	58
6.6.1	Popisná statistika pro G z 3– bodého ohybu.....	58
6.6.2	Popisná statistika pro MOR	60
6.6.3	Popisná statistika pro ohybové moduly pružností	61
6.7	Využití v praxi.....	62
7.	Závěr	63
8.	Summary	64
9.	Literární zdroje	65
10.	Seznam příloh	68
10.1	Charaktery poškození u vybraných nosníků:	68

1. Seznam obrázků, grafů a tabulek

1.1 Seznam obrázků a grafů

Obr. 1. Roviny symetrie dřeva převzato z Požgaje et al. (1993)	14
Obr. 2. Graf znázorňující vztah mezi napětím a deformací pro dřevěné kompozity, převzato Bodig a Jayne (1993)	15
Obr. 3. Druhy zatížení dřeva v ohybu (převzato z Požgaje et al., 1993)	16
Obr. 4. Dřevěný hranol v ortogonálním souřadnicovém systému, převzato z Bodig a Jayne, (1993).....	17
Obr. 5. Deformovaný hranol a výřez z deformovaného hranolu, převzato z Bodig a Jayne (1993).....	17
Obr. 6. Charakter porušení dřeva v ohybu, převzato z Bodiga a Jayna (1993)	19
Obr. 7. Závislost mechanických vlastností dřeva v ohybu na vlhkosti, převzato z Bodig a Jayne (1993).....	21
Obr. 8. Vliv hustoty a vlhkosti dřeva na modul pružnosti E, převzato z Požgaje et al. (1993).....	22
Obr. 9. Závislost hustoty na smykovém modulu pro smrk, převzato z Kollmann a Côté (1968).....	22
Obr. 10. Tvary a typy bukových jader: kruhové červenohnědé velké (ČV), malé (ČM), s hnilobou (ČH), dvojité zdravé (DZ), dvojité s hnilobou (DH), mozaikové zdravé (MZ), mozaikové s hnilobou (MH), hvězdicovité (HV), plamencové (PL), složené (S), převzato z Požgaje et al. (1993).....	25
Obr. 11. Schéma umístění dřeně s ostatními aspekty, převzato z < http://www.msdk.cz/ >	28
Obr. 12. Horizontální Tloušťkovací frézka SCM FS 41 Classic	33
Obr. 13. Hydraulický lis HL 400	34
Obr. 14. Sušárna MOV– 212P	34
Obr. 15. Kád' na máčení nosníků	34
Obr. 16. Můstková váha LESAK 1T6080–LN/30	35
Obr. 17. Digitální posuvné měřítko XTline	35
Obr. 18. Laboratorní váha RADWAG WPX–650	36
Obr. 19. Dvousloupový servohydraulický vertikální zkušební stroj LabTech	36
Obr. 20. Dvousloupový servohydraulický vertikální zkušební stroj LabTech	36
Obr. 21– Pracovní diagramy všech zkoušek.....	49

Obr. 22. Pracovní diagramy pro nosníky masivní s $w \approx 12\%$	49
Obr. 23. Pracovní diagramy pro nosníky masivní s $w > 12\%$	50
Obr. 24. Pracovní diagramy pro nosníky lepené fenolformaldehydem s $w \approx 12\%$	51
Obr. 25. Pracovní diagramy pro nosníky lepené polyuretanem s $w \approx 12\%$	51
Obr. 26. Závislost smykového modulu pružnosti na vlhkosti dřeva	54
Obr. 27. Závislost smykového modulu pružnosti na hustotě dřeva.....	54
Obr. 28. Závislost smykového modulu pružnosti na podílu vad dřeva	55
Obr. 29. Závislost MOE na vlhkosti dřeva	55
Obr. 30. Závislost MOR na vlhkosti dřeva	56
Obr. 31. Závislost ohybového modulu pružnosti na hustotě	56
Obr. 32. Závislost MOR na hustotě dřeva	57
Obr. 33. Závislost ohybového modulu pružnosti na podílu vad.....	57
Obr. 34. Závislost ohybového modulu pružnosti na podílu vad.....	58
Obr. 35. Krabicové grafy pro smykový modul pružnosti z 3– bodého ohybu	59
Obr. 36. Graf testu rozptylu ANOVA pro G	59
Obr. 37. Krabicové grafy MOR ze 4– bodého ohybu.....	60
Obr. 38. Graf rozptylu ANOVA– MOR	61
Obr. 39. Krabicové grafy ohybových modulů pružnosti	61
Obr. 40. Graf rozptylu ANOVA pro MOE	62
Obr. 41– Porušení lepené spáry u hranolu č. 9	68
Obr. 42– Porušení lepené spáry u hranolu č. 17	68
Obr. 43– Porušení v lepené spáře u hranolu č. 14	69
Obr. 44. Porušení v lepené spáře u hranolu č. 19	69
Obr. 45. Porušení masivního hranolu se dření	70
Obr. 46. Porušení porušení masivního hranolu se dření	70

1.2 Seznam tabulek

Tab. 1. Požadavky na obdélníkové řezivo podle ČSN 73 2823 (2012).....	23
Tab. 2. Charakterizování trhlín, dle ČSN 732823 (2012).....	24
Tab. 3. Struktura bukového dřeva pro běl, vyžralé dřevo a nepravé jádro, převzato z Nečesaného (1958).....	26
Tab. 4. Porovnání vybraných fyzikálních a mechanických vlastností dřeva, převzato z Pöhlera et al. (2005).....	26

Tab. 5. Vybrané zkoumané vlastnosti bukového dřeva s nepravým jádrem, H_0 odpovídá shodě středních hodnot s 95% pravděpodobností, převzato z Pouchaniče (2011)	27
Tab. 6. Odklon vláken podle ČSN 73 2823 (2012)	28
Tab. 7. Charakter povolených vad pro dané třídy pevnosti podle ČSN 73 2823 (2012)	29
Tab. 8. Porovnání vybraných mechanických vlastností podle různých autorů	30
Tab. 9. Smykové moduly různých dřevin podle různých autorů	31
Tab. 10. Počty nosníků v jednotlivých sériích	32
Tab. 11. Druhy a objemy vad u masivních nosníků s $w \approx 12\%$	43
Tab. 12. Druhy a objemy vad u lepených lamelových nosníků lepených lepidlem Lear D4 Lear D4 s $w \approx 12\%$	44
Tab. 13. Druhy a objemy vad v hranolech lepených lepidlem Lignofen G/3/D s $w \approx 12\%$	44
Tab. 14. Druhy a objemy vad v masivních nosnicích s $w > MH$	45
Tab. 15. Tabulka masivních nosníků pro hustotu a vlhkost	46
Tab. 16. Tabulka lepených nosníků pro hustotu a vlhkost	46
Tab. 17. Smykové moduly pružnosti ze zkoušek 3– bodého ohybu pro masivní nosníky	47
Tab. 18. Smykové moduly pružnosti ze zkoušek 3– bodého ohybu pro lepené nosníky	48
Tab. 19. Výsledky MOE, MOR ze 4 bodého ohybu	52
Tab. 20. Výsledky MOE, MOR a G ze 4 bodého ohybu	52
Tab. 21. Výsledky MOE a MOR ze 4 bodého ohybu	53
Tab. 22. Výsledky MOE, MOR a G ze 4 bodého ohybu	53
Tab. 23– Mnohonásobné srovnání hodnot G (Tuckey– test)	59
Tab. 24. Mnohonásobné srovnání hodnot MOR (Tuckey– test)	61
Tab. 25. Mnohonásobné srovnání hodnot ohybových modulů pružností (Tuckey– test)	62
Tab. 26. Souhrnné výsledky pro MOE, MOR a G jednotlivých skupin	63

2. Úvod

Dřevěné prvky mají ve stavebnictví dlouholetou tradici. Ve srovnání s betonovými stropy dokáží přenést stejné zatížení při nižším zatížení vlastní vahou, a navíc působí ve stavbě dobrým estetickým dojmem. Z pohledu efektivnosti a rychlosti montáže stavby, dřevěné nosníky umožňují rychlou montáž bez technologicky nutných přestávek, bez kterých se neobejde stavba z klasických nedřevěných stavebních materiálů (beton, cihly, atd.). Dřevní surovina je obnovitelným zdrojem, při dodržování jejího hospodárného využívání.

Buk patří k důležitým evropským listnatým dřevinám a má předpoklady stát se pro stavebnictví velmi důležitým materiálem. Může k tomu napomoci změna klimatu způsobující ploch osázených smrkem ztepilým (*Picea abies*, L. Karst), který je momentálně primárně využíván jako konstrukční materiál. Dřevo buku disponuje dobrými předpoklady pro využití ve stavebnictví a bude otázkou času, kdy se jeho potenciál začne využívat naplno. Je tedy nutné pokračovat ve vývoji materiálů, kterými budeme v budoucnu disponovat.

Vhodně volené postupy zpracování a adekvátní nasazování bukového dřeva v rámci stavebnictví vyžaduje širokou základnu zejména v oblasti výzkumu jeho mechanických charakteristik. Tato stále rostoucí poptávka po definování charakteristických aspektů mechanického chování bukového dřeva byla motivací pro zpracování této studie. Tato bakalářská práce se zabývá analýzou mechanických vlastností, konstrukčního masivního a lepeného bukového dřeva a vlivu faktorů na dané vlastnosti. Experimentálně byly zjištěny mechanické vlastnosti jako modul pružnosti v ohybu, pevnost v ohybu a hodnoty smykových modulů pružnosti podle normy ČSN EN 408+A1 (2012). Posuzován byl také vliv faktorů na tyto mechanické vlastnosti, zejména vliv vlhkosti, hustoty a vad dřeva.

3. Cíl práce

Cílem této bakalářské práce je analyzovat mechanické chování masivního a lepeného bukového dřeva zatíženého statickým 4 –bodým a 3– bodým ohybem při působení faktorů, kterými byly (hustota, vlhkost a vady dřeva). Snahou bylo naplnit tento cíl pomocí těchto konkrétních činností:

- 1) Stanovení smykových modulů pružnosti (G) bukových nosníků z 3– bodé ohybové zkoušky dle ČSN EN 408+A1 (2012)
- 2) Stanovení ohybového modulu pružnosti (MOE) a ohybové pevnosti (MOR) bukových nosníků pomocí 4– bodé ohybové zkoušky dle ČSN EN 408+A1 (2012)
- 3) Analýza vlivu faktorů na výše uvedené mechanické vlastnosti

4. Literární přehled

4.1 Buk lesní

V evropských lesích byl Buk lesní (*Fagus sylvatica*, L.) jeden z nejrozšířenějších druhů dřeva. Původní bukové monokultury a smíšené lesy však pomalu vymizely a z těchto lesů zbyla pouze lokální torza. Buk byl nahrazován především smrkem, díky jeho nižší době obmýti a universálnějšímu využití (Nečesaný 1958).

V České republice je buk nejrozšířenější listnatá dřevina, což dokladuje zpráva Ministerstva zemědělství z roku 2015. Podle ní pokrývají bukové porosty 211 838 hektarů, což je 8,3 % všech porostů. Od roku 2010 se zastoupení zvýšilo o 0,9 %. Do dalších let je cílem zvýšit zastoupení bukových porostů na 18 %.

4.2 Anatomická stavba bukového dřeva

Buk se řadí mezi dřeva listnatá s roztroušeně pórovitou stavbou. Podle Gandelové (2006) a Požgaje et al. (1993) dřevo buku je dřevo vyzrálé, což znamená, že kromě obvodové běle obsahuje také středovou část s vyzrálým dřevem. Dále uvádějí, že jeho hustota při nulové vlhkosti je $685 \text{ kg} \times \text{m}^3$, řadíme ho tedy mezi středně těžká dřeva. Šlezingerová (2008) uvádí, že dřevo buku je narůžovělé, nahnědlé až červenohnědé s poměrně zřetelnými letokruhy. Jeho dřevňové paprsky jsou široké a z toho plyne, že je můžeme vidět na všech třech řezech. Na příčném (pásky kolmé na letokruhy), radiálním „zrcátka“, a tangenciálním (1–5 mm vysoké svislé tmavší pásy). Buk velmi často také tvoří nepravé jádro. Podle ČSN EN 350 (1996) jej řadíme do páté třídy přirozené odolnosti, jedná se tedy o dřevo netrvanlivé s pravděpodobnou přirozenou životností, 2- 6let (ČSN EN 335 2013). Jeho trvanlivost ale můžeme zvýšit ochrannými impregnačními látkami, jedná se totiž o dřevo lehce impregnovatelné.

4.3 Mechanické vlastnosti

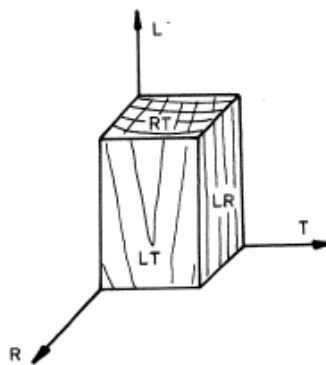
Znalost mechanického chování dřeva je hlavním předpokladem pro jeho optimální zpracování (Požgaj et al., 1993). Mechanické vlastnosti dřeva jsou pro nás měřítkem k charakterizování vlastností a použitelnosti dřeva.

4.3.1 Izotropie a ortotropie mechanických vlastností

Bodig a Jayne (1993) s Kollmannem a Côtém (1968) definují izotropní materiál jako nejjednodušší materiál, který má homogenní vnitřní uspořádání. U rostlého dřeva k izotropii nikdy nedojde, ale u produktů na bázi dřeva je snahou stupeň ortotropnosti

alespoň snížit na minimum, tj. zachovat a zlepšit kladné vlastnosti dřeva (zejména mechanické) a záporné vlastnosti eliminovat.

Při zkoumání mechanických vlastností rostlého dřeva je nutno respektovat jeho anizotropii, tedy rozdílnost vlastností pro různé směry, která je z praktických důvodů zjednodušována na ortogonální anizotropii, tedy zkráceně ortotropii vlastností pro tři navzájem kolmé směry. Požgaj et al. (1993) popisují dřevo jako materiál ortogonálně anizotropní, to znamená, že má rozdílné vlastnosti pro tři vzájemně kolmé směry. Podélný směr (L) je rovnoběžný s vlákny dřeva, radiální směr (R) je kolmý k letokruhům a tangenciální směr (T) je tečnou k letokruhům (Obrázek 1).



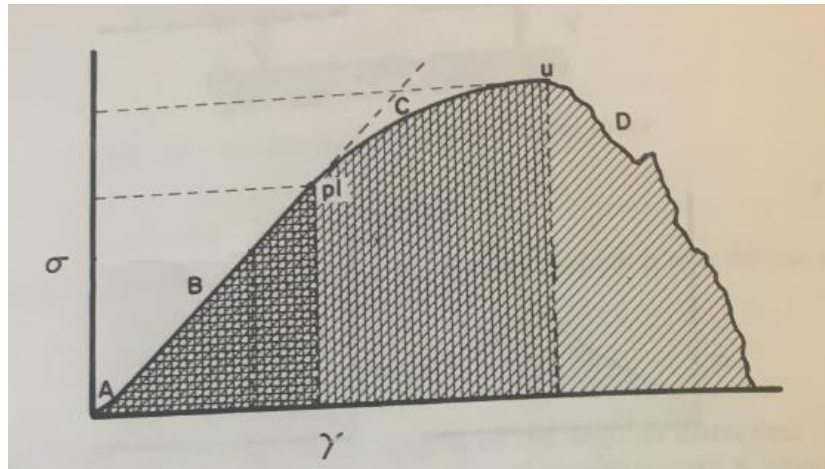
Obr. 1. Roviny symetrie dřeva převzato z Požgaje et al. (1993)

Různorodost dřeva ve třech směrech popisují také vědci (Kollman a Côté 1956, Bodig a Jayne 1965 a další). Z těchto publikací je rovněž patrné, že má dřevo značně odlišné vlastnosti ve směru podélném a kolmém na vlákna dřeva. Navíc se vlastnosti dřeva liší i ve směru radiálním a tangenciálním.

4.3.2 Tuhost

Podle Bodiga a Jayna (1965) lze tuhost materiálu vyjádřit jako vnitřní odpor materiálu proti pružné deformaci. Deformaci můžeme podle Bodiga a Jayna (1993) definovat jako změnu tvaru tělesa vyvolanou působením mechanických sil. Pružnou deformaci můžeme na pracovním diagramu dřeva (Obrázek 2) pozorovat od oblasti počátečního náběhu po mez úměrnosti. Pružná deformace je vratná po ukončení působení vnějších sil. Po překročení meze úměrnosti vzniká deformace pružná v čase, která vzniká a zaniká za určitý čas po působení vnějších sil. Při dalším zvyšování napětí ve dřevě se začíná objevovat i deformace nepružná čili plastická. Podle Požgaje et al. (1993) k ní nemusí docházet pouze při zatížení dřeva vnějšími mechanickými silami, ale také při

bobtnání a sesychání dřeva. Matovič (1993) uvádí, že mez úměrnosti se u ohybu pohybuje přibližně okolo 70 % meze pevnosti.



Obr. 2. Graf znázorňující vztah mezi napětím a deformací pro dřevěné kompozity, převzato Bodig a Jayne (1993)

- A– Oblast počátečního náběhu
- B– Lineární oblast
- C– Zakřivená oblast
- D– Oblast po selhání
- p_l – mez úměrnosti
- u – mez pevnosti

Ke kvantifikaci tuhosti se využívá modul pružnosti. Modul pružnosti rozlišujeme dle způsobu namáhání. Pokud se jedná o normálové namáhání (ohyb, tah, tlak), používáme normálový modul pružnosti (E). Při tangenciálním namáhání (smyk, krut) používáme smykový modul pružnosti (G). Pro napětí do meze úměrnosti platí, že roste přímo úměrně s rostoucím modulem pružnosti při konstantní velikosti vyvolané deformace.

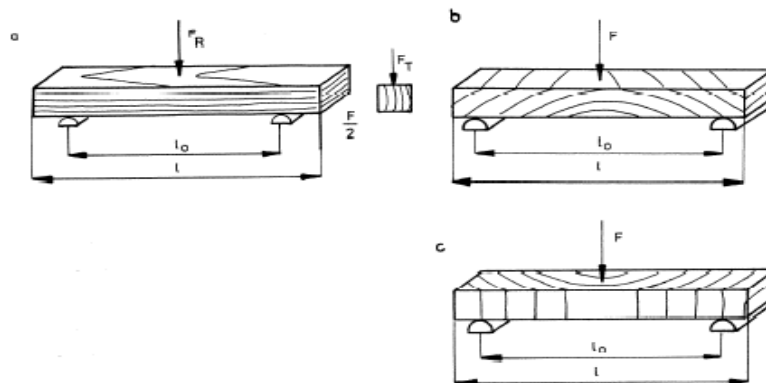
4.3.3 Pevnost

Pevnost dřeva definujeme jako odpor dřeva proti jeho trvalému porušení. Jedná se tedy o napětí, při kterém se jeho soudržnost naruší. Podle Požgaje et al. (1993) můžeme rozdělit pevnost na:

- Konvenční
- Skutečnou
- Ideální (teoretickou)

Vzhledem k povaze dřeva nás z těchto tří pevností zajímá pouze pevnost skutečná, kterou lze definovat jako skutečné napětí v okamžiku porušení tělesa. U pevnosti dřeva v ohybu můžeme vzhledem ke vzájemné pozici zatěžujících sil a orientaci vláken dřeva rozlišovat tři způsoby ohýbání (Obrázek 3):

- Pevnost v ohybu kolmo na vlákna v radiálním/tangenciálním směru
- Pevnost v ohybu s průběhem vláken kolmo na osu
- Pevnost v ohybu s průběhem vláken rovnoběžně se zatěžující silou

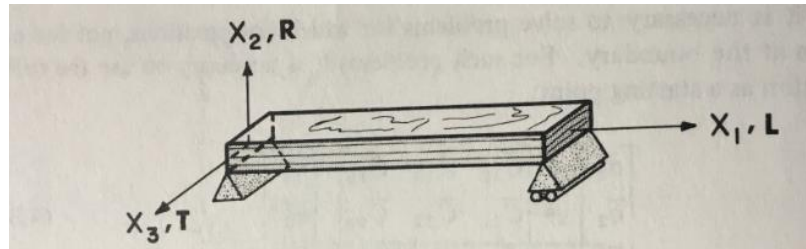


Obr. 3. Druhy zatížení dřeva v ohybu (převzato z Požgaje et al., 1993)

Matovič (1993) uvádí, že široké uplatnění v praxi můžeme najít pouze pro ohyb kolmo na vlákna (nosníky masivní, lepené). Pevnost v ohybu pro případ *b* a *c* je velmi malá (pevnost je 5–10% při srovnání s případem *a*) a tudíž pro praktické využití bezvýznamná.

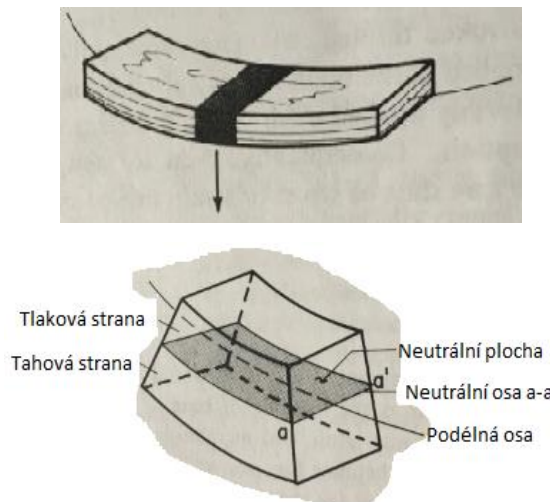
4.3.4 Testování ohybových vlastností dřeva

Vzhledem k jednoduchosti testu, je ohybová zkouška jeden z nejpoužívanějších zkoušek dřevěných kompozitů. Bodig a Jayne (1993) uvádí ohyb jako složité, komplexní namáhání na tah, tlak a smyk. Pokud anizotropii dřeva budeme aplikovat do ohybu podle Bodiga a Jayna (1993), můžeme si dřevo představit složené z nekonečně mnoho tenkých tyčí, na které tlačíme. Zatěžovat v ohybu můžeme ve dvou rovinách, radiální a tangenciální.



Obr. 4. Dřevěný hranol v ortogonálním souřadnicovém systému, převzato z Bodig a Jayne, (1993)

Při každém prostém ohybu, se dějí v jakémkoliv vzorku principiálně podobné děje. Na Obrázku 6 můžeme vidět zatížený nosník a lichoběžníkovou výseč z něj. Stranu, na kterou působí síla, se nazývá stranou tlakovou. Opačná strana hranolu, tedy strana, která leží na podporách, je stranou tahovou. Názvy pro tlakovou a tahovou stranu, logicky vyplývají ze stavu napjatosti ohnutého nosníku. Vlákná na straně působící síly jsou stlačována a zkracují se, oproti tomu na druhé straně se vlákna prohýbají a natahují, jsou tedy namáhány na tah (Bodig a Jayne 1993).



Obr. 5. Deformovaný hranol a výřez z deformovaného hranolu, převzato z Bodig a Jayne (1993)

Neutrální plocha od sebe odděluje tahovou a tlakovou zónu a nepodléhá tudíž ani tlakovému ani tahovému namáhání. V nezátíženém stavu neutrální osa prochází přímo těžištěm nosníku. Jelikož se vlivem působící síly mění také tvar průřezu a uplatňují se rozdílné tahové a tlakové charakteristiky dřeva, mění se i poloha neutrální osy a plochy.

Ohybové zkoušky můžeme rozdělit na:

- Nedestruktivní (dynamické)
- Destruktivní (statické)

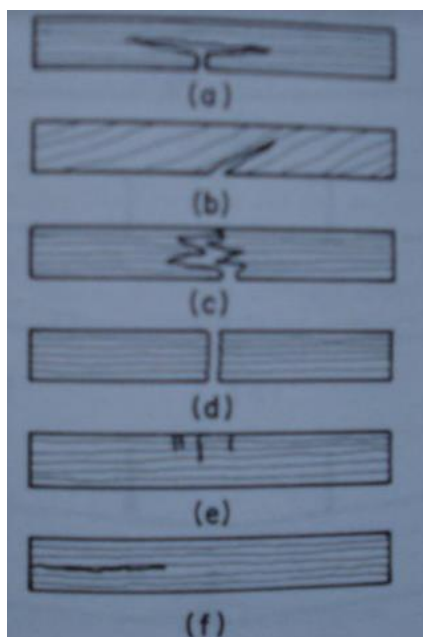
Nedestruktivní metoda spočívá na principu rychlosti šíření a frekvence zvuku ve dřevě, kterým se ale získá MOED, tedy dynamický ohybový modul pružnosti. Tato metoda našla vysoké uplatnění v praxi při třídění řeziva.

Nejpoužívanějšími statickými destruktivními metodami pro zjišťování ohybových modulů pružnosti je:

- 3- bodý ohyb
- 4- bodý ohyb

Ohybová zkouška 3- bodá, je specifikovaná pro dvě základní normy, a sice: ASTM D 198(2003) a ČSN EN 408 (2012). Tuto zkoušku můžeme také nazvat jako zkoušku na prostý ohyb, který je zmiňován v této kapitole. Jedná se o symetricky uložený nosník na podporách s působící silou ve středu prvku. Ohybová zkouška 4- bodá je rovněž charakterizována v ČSN EN 408 (2012) sestává se z uložení nosníku na podporách, na který působí dvě síly.

K porušení dřeva obecně dochází za hranicí meze pevnosti. Charakter porušení závisí na mnoha faktorech, zejména na struktuře. Jak můžeme vidět na Obrázku 6, můžeme vidět pod písmenem a) porušení tělesa, které vzniklo na straně tahové překročením únosného napětí. Pod písmenem b) můžeme vidět porušení napříč prvkem, z důvodu odklonu vláken. Písmena c) a d) ukazují lom vláknitý a tupý, pod písmenem e) je tlakové selhání a pod písmenem f) vidíme poškození smykové.



Obr. 6. Charakter porušení dřeva v ohybu, převzato z Bodiga a Jayna (1993)

4.3.5 Testování smykových vlastností dřeva

Smyk lze charakterizovat jako zatížení, při kterém působí dvě síly opačného směru ve dvou různých osách. Výskyt smykového napětí doprovází téměř všechny mechanické zkoušky dřevěných materiálů, proto lze smykové vlastnosti hodnotit pomocí různých mechanických zkoušek. U každé zkoušky však vzniká trochu jiný druh smyku charakteristický různým podílem jiného než smykového napětí indukovaného ve zkušebním tělese. Základními druhy smykových zkoušek jsou:

- a) Smyk v krutu
- b) Smyk v ohybu
- c) Jednoduchý smyk

Vzhledem k povaze této práce nás zajímá především smyk v ohybu. V ohybu, kromě tahových a tlakových sil, vznikají také síly smykové. Na malých vzorcích, se porušení smykem téměř nevyskytuje. Se zvyšující se dimenzí roste také viditelnost působení smykových sil.

Harrison et al. (2006) také rozděluje a charakterizuje smykové zkoušky na metody:

- Torzní
- Ohybové
- Smykové

Torzní zkoušky spočívají na principu krutu. Obě strany hranolu se vloží do čelistí, připomínajících konzoly. Jedna čelist se otáčí v podélné ose zkušební vzorku, aby docházelo ke krutu, a druhá čelist zůstává ve stejné poloze po celou dobu zkoušky. Mezi čelistmi jsou umístěny dva troptometry, které snímají vznikající smykové napětí. Ty jsou umístěny symetricky s podmínkou, aby vzdálenost mezi oběma zařízeními byla vyšší než vzdálenost od čelistí.

Smyk rovněž stanovujeme z ohybových zkoušek, konkrétně v 3– a 5– bodém ohybu. U 3– bodého ohybu, daný vzorek posuzujeme minimálně ze čtyř dílčích ohybových zkoušek, říkáme tedy, že se jedná o metodu s variabilním rozponem. U 3- bodého ohybu můžeme smykový modul pružnosti popsat i pro metodu s jedním rozponem. Biblis (2001) uvádí vysoký variační koeficient při měření v 3– bodém ohybu (74 %). Metodu 5– bodého ohybu, začal zkoumat a vyvíjet Hindman (1993). Ve svých pracích zdůrazňuje efektivitu 5– bodého ohybu. Jeho práci ale kritizoval Bradtmueller et al. (1994), který stanovil některé chyby v měření a navrhl optimalizace pro tento způsob zjišťování smykových modulů pružnosti.

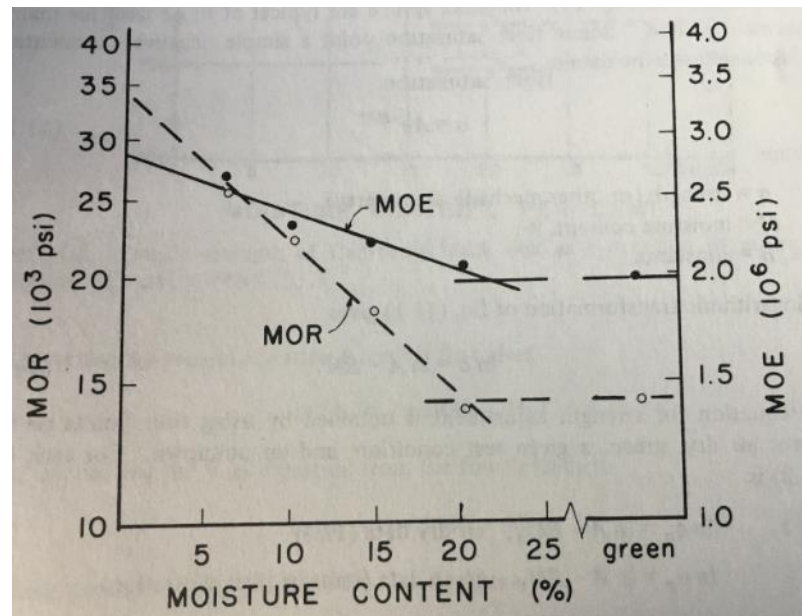
Smykové zkoušky popisuje Harrison et al. (2006) podle ASTM D 3044. Tato metoda zjišťuje smykový modul pružnosti na čtvercovém plochém průřezu, který je podepřen na dvou protilehlých rozích a síly působí na dvou nepodepřených rozích. Jelikož se jedná o velmi tenké a plošné prvky, je využívám zejména pro vrstvené materiály.

4.4 Faktory ovlivňující pevnost a tuhost

4.4.1 Vlhkost

Podle Požgaje et al. (1993) a Gandelové (2006) vlhkostí dřeva rozumíme množství vody, které se ve dřevě nachází. Množství vody ve dřevě lze vyjádřit absolutně i relativně. Absolutní vlhkostí dřeva rozumíme poměr hmotnosti vody k hmotnosti absolutně suchého dřeva. Jestli vlhkost dřeva vyjadřujeme poměrem hmotnosti vody a hmotnosti mokrého dřeva, hovoříme o relativní vlhkosti. Z pohledu vázání vody ve dřevě můžeme mluvit o vodě chemicky vázané, hydrokopicky vázané a vodě volné. Vzhledem k vlivu na mechanické vlastnosti dřeva má význam se pozastavit pouze vody hydrokopicky vázané, nachází v buněčných stěnách, do kterých se váže pomocí vodíkových můstků, jejichž pevnost je ve srovnání s pevností kovalentních vazeb asi desetinová. S rostoucím obsahem vody hydrokopicky vázané přibývá ve struktuře dřeva vazeb s malou pevností a tuhostí, což vede ke snižování mechanických charakteristik dřeva až do úplného zaplnění buněčných stěn, tj. do meze hygroskopicity,

kteřou je možné obecně uvažovat při vlhkosti dřeva kolem 30 %. Jak můžeme vidět na Obrázku 7, mechanické vlastnosti dřeva v ohybu ovlivňuje vlhkost výrazným způsobem.



Obr. 7. Závislost mechanických vlastností dřeva v ohybu na vlhkosti, převzato z Bodig a Jayne (1993)

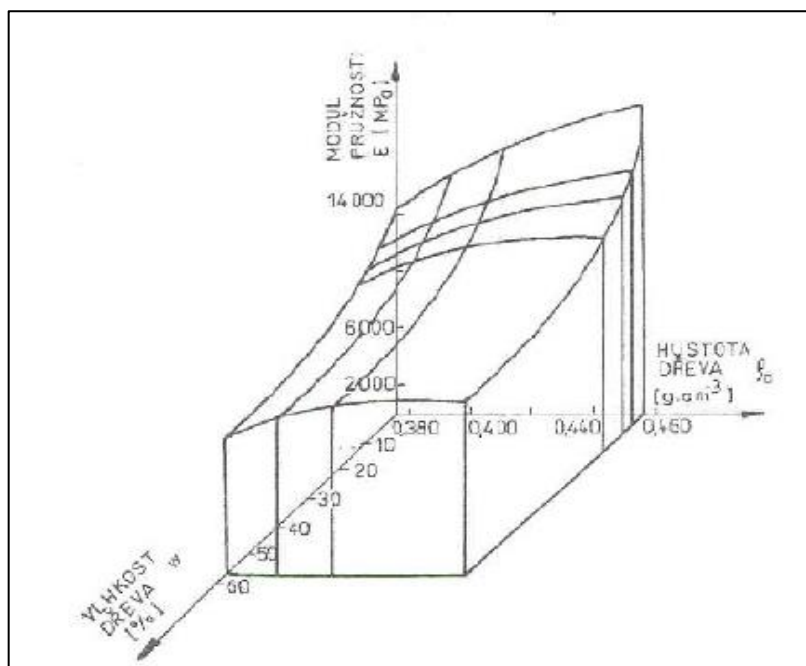
4.4.2 Hustota

Hustotu dřeva charakterizuje Požgaj et al. (1993) Šlezingerová (2008) a Gandelová (2006) jako podíl hmotnosti dřeva a objemu. Jedná se o jednu z nejvýznamnějších charakteristik dřeva, která ovlivňuje většinu fyzikálních a mechanických vlastností. Hustotu dřeva ovlivňuje zejména druh dřeva a šířka letokruhů. Šířku letokruhů ovlivňuje poloha dřeva v kmenu, stanoviště, na kterém dřevo roste a výchovné zásahy během růstu. Pro charakteristiku hustoty musíme specifikovat vlhkost:

- Hustota dřeva v absolutně suchém stavu ($w = 0 \%$)
- Hustota vlhkého dřeva ($w > 0 \%$)
- Hustota dřeva při vlhkosti 12 %, je hustota běžně používaná v literatuře a platných normách, jedná se o hustotu dřeva dlouhodobě vystaveného standardním klimatickým podmínkám ve stavebních konstrukcích teplotě 20 °C a relativní vlhkosti vzduchu 65 %).

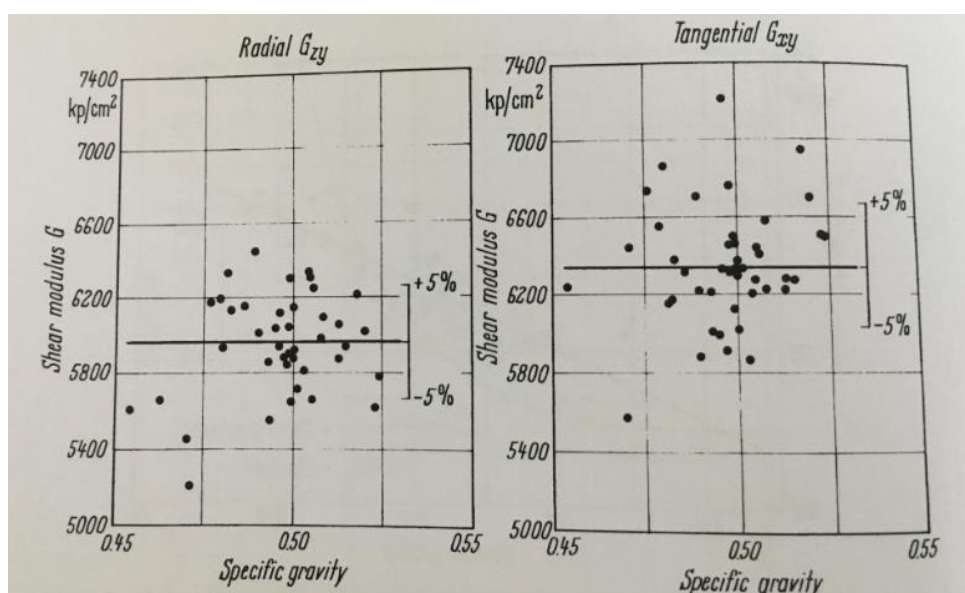
Jak můžeme vidět, z Obrázku 8, se zvyšující se hustotou, modul pružnosti roste, musíme ovšem dodržet konstantní vlhkost. Při zvýšení vlhkosti sice hustota poroste, ale

modul pružnosti bude klesat, z čehož je zřejmé, že vliv vlhkosti na mechanické vlastnosti je výrazně vyšší než vliv hustoty.



Obr. 8. Vliv hustoty a vlhkosti dřeva na modul pružnosti E, převzato z Požgaje et al. (1993)

Kollmann a Côté (1968) uvádí vztah pro vliv hustoty na smykový modul pružnosti (Obrázek 11). Lze pozorovat, že smykový modul pružnosti (G) na hustotě nezávisí (avšak sledovaný úsek hustoty je poměrně úzký), zatímco směru zatěžování R či T se zdá být významným faktorem.



Obr. 9. Závislost hustoty na smykovém modulu pro smrk, převzato z Kollmann a Côté (1968)

4.4.3 Vady dřeva

Vady dřeva můžeme podle Šlezingerové et al. (2001), Gandelové et al. (2008) a Požgaje et al. (1993) charakterizovat jako porušení pravidelné struktury dřeva, což se projevuje odchylkami od normální struktury. Vady jsou přirozenou součástí struktury dřeva, ale často snižují mechanické vlastnosti. Mohou vzniknout během růstu stromu v procesu těžby, manipulace, uskladnění nebo vysoušení. Vady dřeva v konstrukčním dřevě se charakterizují podle ČSN 73 2823 (2012), v souladu s pevnostními třídami k normě ČSN EN 338 (2010). Charaktery povolených vad dřeva, jsou specifikovány pro mezní pevnostní třídy v Tabulkách 1, 2, 6 a 7.

4.4.3.1 Suky

Suky jsou jedna z nejdůležitějších vad dřeva. Můžeme je popsat jako část větve, obrostlá dřevem. Ačkoliv je tvorba větví pro strom přirozeným a důležitým procesem, pro zpracovávání a manipulaci se dřevem, chápeme suky jako vadu dřeva, která snižuje jeho mechanické vlastnosti. U jehličnatých dřev nacházíme spíše větší počet suků malého průměru, listnaté dřeva mají méně suků větších průměrů.

Tab. 1. Požadavky na obdélníkové řezivo podle ČSN 73 2823 (2012)

	Třída pevnosti podle EN 338	
	C18 a nižší	nad C18
Průměr suku na ploše	$\frac{1}{2} \times$ šířka prvku	$\frac{1}{4} \times$ šířka prvku
Průměr suku na boku	$\frac{3}{4}$ tloušťka prvku	$\frac{1}{4}$ tloušťky prvku

4.4.3.2 Trhliny

Trhlinu můžeme charakterizovat jako porušení dřeva ve směru vláken, mohou mít charakter růstový (dřeňové, odlupčivé, mrazové), nebo zapříčiněný lidským faktorem (výrobní, výsušné). Trhliny na kulatině se dělí na:

- Čelní trhliny– nachází se na čele kulatiny a dále je dělíme na:
 - a) *Dřeňové*, vychází od středu kmene (dřeně) a prochází směrem k obvodu kmene kolmo na letokruhy (radiální rovinou).
 - b) *Odlupčivé*, které kopírují letokruh, vzniká již v rostoucím stromě a vysycháním dřeva se zvýrazňují a rozšiřují

- Boční trhliny– vychází na boční povrch, nebo na bok a čelo kulatiny a dělíme je na:
 - a) *Mrazové trhliny*, které se vyskytují u listnatého dřeva (duby, buky, jasany apod.) vznikají v zimním období za působení mrazu a slunečního záření. Vznik mrazových trhlín, je rovněž jedním z důvodů vzniku nepravého jádra u bukového dřeva.
 - b) *Výsušné trhliny*, které vznikají vlivem úbytku vlhkosti ve dřevě už od momentu skácení. Výsušné trhliny se vytváří na čelech a poté se rozšiřují zpravidla na boční stranu a prohlubuje se ke středu kulatiny.

Pro konstrukční dřevo, kde charakter trhlíny nelze tak dobře rozlišit, jsou trhliny klasifikovány normou ČSN 73 2823 (2012):

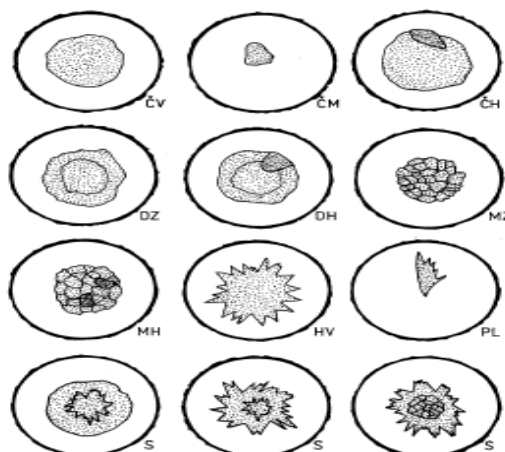
Tab. 2. Charakterizování trhlín, dle ČSN 732823 (2012)

Typ	Největší dovolená délka trhlíny pro třídu C18 a nižší	Největší dovolená délka trhlíny pro třídy vyšší než C18
Trhliny neprocházející tloušťkou	Trhliny s hloubkou menší než polovina tloušťky se mohou zanedbat	
	Ne více než 1,5m nebo ½ délky prvku, rozhodující je menší hodnota	Ne více než 1m nebo ¼ délky prvku, rozhodující je menší hodnota
Trhliny procházející tloušťkou	Ne více než 1m nebo ¼ délky prvku, rozhodující je menší hodnota. Pokud jsou trhliny na koncích, délka nesmí být větší než dvojnásobek délky prvku	Jsou dovoleny pouze na koncích s délkou nepřesahující šířku prvku

Jak můžeme vidět v Tabulce 2, norma nerozlišuje charakter trhlíny, tedy jestli se jedná o trhlínu výsušnou, odlupčivou nebo dřeňovou. Trhliny s rozměrem menším než polovina šířky prvku se zanedbávají.

4.4.3.3 Nepravé jádro

Nepravé jádro je vnitřní část kmene ohraničená tmavou barvou, která značí odumřelé buňky, jenž jsou zathylovány. Hranice nepravého jádra nazýváme marginální linie. Nepravé jádro buku může mít mnoho různých tvarů, viz Obrázek 10:



Obr. 10. Tvary a typy bukových jader: kruhové červenohnědé velké (ČV), malé (ČM), s hnilobou (ČH), dvojitě zdravé (DZ), dvojitě s hnilobou (DH), mozaikové zdravé (MZ), mozaikové s hnilobou (MH), hvězdčicové (HV), plamencové (PL), složené (S), převzato z Požgaje et al. (1993)

Nečesaný (1958) přehledně ukazuje rozdíly mezi strukturou dřeva s nepravým jádrem, vyzrálým dřevem a dřevem bělovým. Z Tabulky 3 lze vyčíst předpoklad, že nepravé jádro má z hlediska anatomické stavby významný vliv pouze na propustnost, díky odumřelým parenchymatickým buňkám a zathylováním jádrového dřeva spolu se zaplněním jádrovými látkami. Mechanické vlastnosti dřeva mohou být ovlivněny pouze hyfami hub, které však nemusí být v každém nepravém jádře.

Tab. 3. Struktura bukového dřeva pro běl, vyvrálé dřevo a nepravé jádro, převzato z Nečesaného (1958)

jev	běl	vyvrálé dřevo	nepravé jádro	poznámka
barva	červenohnědá až naružovělá	po srovnání vlhkosti shodná s bělí	hnědočervená až hnědočerná po odstíny zelenošedé	-
vlhkost	70-100%	50-80%	50-65%	-
živé parenchym. buňky	ano	ano (oslabené nižší vlhkostí)	ne	-
vitalita paren. buněk	vysoká	nizká	žádná	-
thyly	ne	zanedbatelně	ano	-
hyfy hub	ne	ne (nebo omezeně)	ano (podle NJ)	(ve zdravém dřevě)
jádrové látky	ne	ano (bez zbarvení)	ano (se zbarvením)	-
cévy	podíl cév	od dřevě - 17 % → 120. letokruh - 47%		po poměru se zvysuje
	plocha cév	od dřevě - 0,002 mm ² → 120. letokruh - 0,0035 mm ²		
	počet cév na mm ²	od dřevě - 85 ks → 120. letokruh - 135 ks		
	délka článku	350-800 μm		
délka librif. vláken	600-1600 μm			-
dřeň. paprsky	homogenní, vrstevnatost 20-25 buněk, výška 100 buněk			-
podíl pletiv %	cévy 24-43, Vláknité buňky 39-56, dřevové paprsky 17, dřevné parenchym 1-3			-

Podle některých autorů (Nečesaný 1958, Matovič 1977) nepravé jádro nezpůsobuje významné statistické rozdíly ve srovnání s bělovým dřevem v rámci mechanických a fyzikálních vlastností). Pöhler et al. (2005) prováděl také výzkum rozdílů mezi vlastnostmi nepravého jádra s vlastnostmi bělového dřeva a podobně jako Nečesaný (1958) a Matovič (1977), nedospěl k výrazným statistickým odlišnostem, jak můžeme pozorovat v Tabulce 4. Můžeme zde vidět téměř shodné vlastnosti bukového dřeva s jádrem a bez jádra.

Tab. 4. Porovnání vybraných fyzikálních a mechanických vlastností dřeva, převzato z Pöhlera et al. (2005)

Vlastnost materiálu	Bukové dřevo	Standartní odchylka	Nepravé jádro buku	Standartní odchylka	Rozdíl (%)	% shodnost
Hustota (kg/m ³)	695	≈42	714	≈41	+2,74	≤ 0.05
MOE v ohybu (N/mm ²)	13 006	≈2109	13 799	≈1518	+6,1	≤ 0.05
MOR v ohybu (N/mm ²)	127	≈21	136	≈17	+7,09	≤ 0.05
Tangenciální bobtnání (%)	0,44	≈0,04	0,45	≈0,04	+2,27	> 0.05
Tvrдость v T (N/mm ²)	26,87	≈1,80	28,96	≈2,52	+7,78	≤ 0.001

Statistické rozdíly publikoval Pouchanič (2011), která porovnával vybrané mechanické a fyzikální vlastnosti bukového dřeva s nepravým jádrem a bez nepravého jádra.

U porovnání můžeme vidět vyšší hustotu nosníků s nepravým jádrem, dále také zhoršené fyzikální vlastnosti pro sesychání ve všech směrech, včetně objemového, vzrostla i pevnost v tlaku. Dále se také zhoršil modul pružnosti v tlaku podél vláken a zvětšila se maximální deformace.

Tab. 5. Vybrané zkoumané vlastnosti bukového dřeva s nepravým jádrem, H_0 odpovídá shodě středních hodnot s 95% pravděpodobností, převzato z Pouchaniče (2011)

měřená veličina	nepravé jádro		běl		porovnání souborů		
	N	střední hodnota	N	střední hodnota	rozdíl středních hodnot zj. / %		H_0
hustota při $w=0\%$ (Kg/m^3)	75	666 \pm 27,5	75	631 \pm 24,5	+35	+5,25	zamítá se
radiální sesychání (%)	75	5,98 \pm 0,46	74	4,99 \pm 0,32	+0,99	+16,55	zamítá se
tangenciální sesychání (%)	75	12,1 \pm 0,52	75	11,3 \pm 0,7	+0,8	+6,6	zamítá se
podélné sesychání (%)	75	0,19 \pm 0,13	75	0,12 \pm 0,14	+0,7	+36,8	zamítá se
objemové sesychání (%)	75	17,5 \pm 0,76	74	15,8 \pm 0,84	+1,7	+9,7	zamítá se
K. radiálního sesychání (%/1%)	75	0,19 \pm 0,016	74	0,17 \pm 0,09	+0,02	+10,5	zamítá se
K. tangenciálního sesychání (%/1%)	74	0,39 \pm 0,02	75	0,38 \pm 0,016	+0,01	+2,6	zamítá se
K. objemového sesychání (%/1%)	74	0,56 \pm 0,03	75	0,53 \pm 0,02	+0,03	+5,4	zamítá se
pevnost v tlaku podél vláken, $w=0\%$ (MPa)	73	103,9 \pm 6,6	74	98,0 \pm 7,3	+5,9	+5,7	zamítá se
pružnost v tlaku podél vláken, $w=0\%$ (MPa)	71	17250 \pm 5009	71	19250 \pm 4063	-1400	-6,9	zamítá se
maximální deformace (%)	74	1,35 \pm 0,43	75	1,11 \pm 0,3	+0,24	+17,8	zamítá se

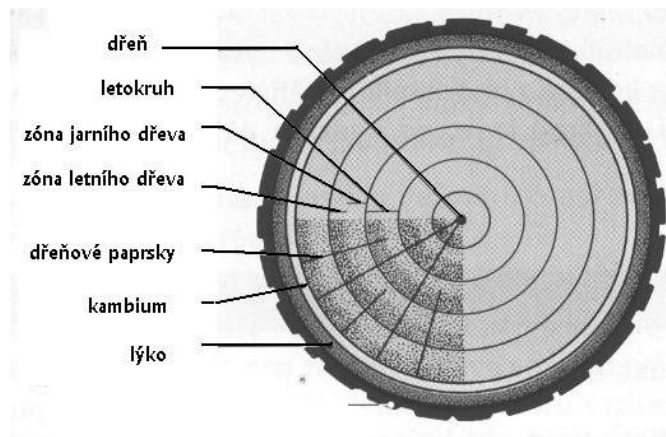
*zj. = základní jednotky pro konkrétní zkoušku (Kg/m^3 , %, %/1%, MPa apod.)

N = počet platných měření

ČSN 73 2823 (2012) nepřikládá nepravému jádru žádný význam, můžeme tedy nepřímo odvodit z této normy, že nepravé jádro v konstrukčním dřevě povoluje.

4.4.3.4 Dřeň

Jedná se o část kmene nacházející se přibližně v jeho středu kmene, v ideálním případě přesně v geometrickém středu kmene, zhruba 2–6 mm v průměru, která má výrazně snížené vlastnosti vůči okolnímu dřevu.



Obr. 11. Schéma umístění dřevě s ostatními aspekty, převzato z <<http://www.msdk.cz/>>

V ČSN 73 2823 (2012) například není blíže určeno možné obsazení dřevě ve dřevě. Můžeme tedy nepřímo odvodit, že dřevě se v konstrukčním dřevě povoluje, na rozdíl od normy ČSN 73 2824–1 (2015), kde se od třídy S13 dřevě nedovoluje.

4.4.3.5 Odklon vláken

Točitost neboli odklon vláken, můžeme popsat jako závitnicové uspořádání dřevních vláken. Podle Požgaje et al. (1993), se u bukového dřeva vyskytuje točitost asi u 3 % stromů. Odklon vláken ovlivňuje podle Gandelové et al. (2008) fyzikální a mechanické vlastnosti, zejména pevnost.

Tab. 6. Odklon vláken podle ČSN 73 2823 (2012)

	Třída pevnosti podle EN 338	
	C18 a nižší	nad C18
Odklon vláken	do 17 %	do 10 %

4.4.3.6 Ostatní vady dřeva

Dalšími vadami dřeva, které mohou ovlivnit mechanické vlastnosti, mohou být například poškození hmyzem, dřevokaznými houbami, hniloba nebo oblina. Poškození hmyzem se zpravidla u konstrukčního dřeva nevyskytuje, může se ale s postupem času objevovat a snižovat tak mechanické vlastnosti dřeva, obdobně jako poškození dřevokaznými houbami. Přítomnost ostatních vad v konstrukčním dřevě (Tabulka 7) upravuje ČSN 732823 (2012):

Tab. 7. Charakter povolených vad pro dané třídy pevnosti podle ČSN 73 2823 (2012)

	Třída pevnosti podle EN 338	
	C18 a nižší	nad C18
Oblina	Nesmí být větší než 1/3 plného rozměru boku a/nebo plochy prvku	
Měkká hniloba a tvrdá hniloba	Měkká hniloba se nedovoluje. Tvrdá hniloba se dovoluje.	Měkká ani tvrdá hniloba se nedovoluje.
Poškození hmyzem	Aktivní napadení hmyzem se nedovoluje	

4.5 Literární rešerše

Na vlastnosti bukového dřeva bylo v minulosti upozorňováno, zejména tedy na vysokou tuhost a tudíž i možné použití nejen pro energetické účely (Egner a Kolb 1966; Egner 1968; Gehri, 1980; 1985). V posledních letech se začalo opět o buku uvažovat jako o náhradě za jehličnaté, především smrkové, dřevo. Jeden z důvodů může být změna lesnické politiky. Tedy postupné nahrazování smrkových lesů lesy listnatými a navrácení původního rázu evropské krajiny (Aicher a Ohnesorge 2011; Aicher et al., 2001). Obnovila se tedy idea využití bukového dřeva ve stavebnictví, což mělo za následek mnohé výzkumy. Aicher a Ohnesorge (2011) uvádí, že bude potřeba ještě zkoumat některá možná úskalí u bukového dřeva. Použití bukového dřeva má nízkou přirozenou odolnost (ČSN EN 335 2013), obsahuje nepravé jádro a má vysoký koeficient bobtnání a sesychání. Pöhler et al. (2005) zkoumal vliv nepravého jádra na vybrané mechanické a fyzikální vlastnosti a nedospěl ke statisticky významným výsledkům. Ovšem Pouchanič (2011) už vyhodnotil mírně zhoršené vlastnosti jádrového dřeva buku, zejména velikost deformace a modul pružnosti v tlaku podél vláken spolu se zhoršenými vlastnostmi při sesychání dřeva.

V Tabulce 8 můžeme vidět srovnání pro pevnost a modul pružnosti v 3– a 4– bodém ohybu. Frese a Blaß (2007) se věnovali mechanickým vlastnostem buku, třídili lamely podle jakosti dle DIN 4074 (2003) do 5 tříd. Pro zkoušku ohybu použili nejkvalitnější pátou třídu, s dynamickým modulem pružnosti vyšším než 16 000MPa. Tu dále rozdělili do 3 tříd, podle dynamického modulu pružnosti, a použily pro zkoušku pevnosti a pružnosti v ohybu ve dvou rozměrech. Použili lepené nosníky s osmi a čtrnácti lamelami. Ozyhar et al. (2012) se zabývali vlivem vlhkosti na ohybové vlastnosti buku. Rozdělili nosníky do 4 skupin, podle doby máčení a tedy konečné vlhkosti, kterou zkušební nosníky měli. Burdurlu (2007) ve zkoušce použil vzorek masivního dřeva a lamelovaného dřeva o tloušťce 3 mm z buku východního.

Tab. 8. Porovnání vybraných mechanických vlastností podle různých autorů

Studie	Dřevo	Vzorek	Zkušební metoda	MOE	MOR	w
		n × h × b × l [mm]		[MPa]	[MPa]	[%]
Frese a Blaß (2007)	Lepené bukové nosníky	8 × 42 × 115 × 5 100	EN 408, 4–bodý ohyb	15 500	63,7	8,3
	Lepené bukové nosníky	8 × 42 × 115 × 5 100	EN 408, 4–bodý ohyb	14 400	57,8	9,3
	Lepené bukové nosníky	8 × 42 × 115 × 5 100	EN 408, 4–bodý ohyb	12 300	43,3	10,3
	Lepené bukové nosníky	14 × 43 × 115 × 9 000	EN 408, 4–bodý ohyb	16 000	55,9	11,3
	Lepené bukové nosníky	14 × 43 × 115 × 9 000	EN 408, 4–bodý ohyb	14 400	50,5	12,3
Ozyhar et al. (2012)	Buk masivní	20 × 20 × 400	4–bodý ohyb	12 400	91,8	13,3
	Buk masivní	20 × 20 × 400	4–bodý ohyb	10 800	70,2	18,7
	Buk masivní	20 × 20 × 400	4–bodý ohyb	9 970	58,6	36,3
Burdurlu et al. (2007)	Masivní nosníky Fagus orientalis	20 × 20 × 360	3–bodý ohyb	11 063	134,13	10%
	Lepené nosníky Fagus orientalis	7 × 3 × 20 × 360	3–bodý ohyb	12 680	148,3	10%

K určování smykových modulů G, se obvykle používají metody přímého zjištění. Podle ČSN EN 408 (2012), se smykové moduly zkoumali například u smrkových nosníků nebo u tzv. SPF Glulam, což je kombinace borových, jedlových a smrkových lamel.

Tab. 9. Smykové moduly různých dřevin podle různých autorů

Studie	Dřevo	Vzorek	Zkušební metoda	G	w
		b × h × l [mm]		[MPa]	[%]
Brandner et al. (2007)	Lepené smrkové nosníky	150 × 320 × 6080	EN 408, 3– bodý ohyb, metoda jednoho rozponu	823	12
		150 × 320 × 6080		790	12
		150 × 320 × 6080	EN 408, 3– bodý ohyb, metoda variabilního rozponu	767	12
		150 × 320 × 6080		752	12
		150 × 320 × 6080	EN 408, 4– bodý ohyb	694	12
	Lepené smrkové nosníky	160 × 600 × 9600	EN 408, 4– bodý ohyb	660	12
	Lepené smrkové nosníky	160 × 600 × 9600	EN 408, 4– bodý ohyb	653	12
Guntekin et al. (2016)	Masivní nosníky– Buk východní	20 × 20 × 20	Ultrazvuk	G_{LT}^1 887	12
	Masivní nosníky– Buk východní	20 × 20 × 20	Ultrazvuk	G_{LR}^1 1230	12
Biblis (2001)	Lepené nosníky (smrk, jedle, borovice)	38 × 89 × 650	ASTM 3– bodý ohyb	903	5,8

¹ - Jedná se o smykové ultrazvukové moduly

5. Materiál a metodika

5.1 Dřevní surovina

Zkušební nosníky pro ohybové zkoušky byly vyrobeny z buku lesního (*Fagus sylvatica*, L.), které byly testovány jako masivní a lepené lamelové nosníky. Obě skupiny nosníků byly dále děleny na série nosníků: a) v suchém stavu, – ($w \approx 12\%$); b), v mokřém stavu ($w > MH$). Celkem bylo testováno 20 nosníků pro všechny série, tj. 5 nosníků v každé sérii (5 nosníků pro masivní nosníky s $w \approx 12\%$, 5 nosníků pro masivní nosníky s $w > MH$; 10 nosníků lepených lamelových nosníků s $w \approx 12\%$. Lepené lamelované nosníky byly lepeny dvěma druhy lepidel, které jsou dále popsány v kapitole 4.2. V každé skupině lepených lamelových nosníků, podle typu použitého lepidla, bylo testováno 5 nosníků. Tabulka 10 uvádí počty testovaných nosníků v jednotlivých sériích. Jednotlivé masivní nosníky a lamely byly vybírány bez mechanického poškození a biotického napadení. Masivní prvky i lamely pro lepené nosníky obsahovaly přirozené vady dřeva (např. suky, nepravé jádro, dřeň). Popis hodnocení a výsledky analýzy vad jsou popsány v Kapitolách 4.5 a 5.1

Tab. 10. Počty nosníků v jednotlivých sériích

Název skupiny	Počet kusů vyrobených	Počet kusů testovaných
Masivní ($w \approx 12\%$)	10	5
Masivní ($w > MH$)	10	5
Lepené Lear D4 ($w \approx 12\%$)	5	5
Lepené Lignofen G/3/D ($w \approx 12\%$)	5	5
Lepené Lear D4 ($w > MH$)	5	– ¹
Lepené Lignofen G/3/D ($w > MH$)	5	– ¹

¹ Lepené lamelové nosníky pomocí lepidla Lear D4 a Lignofen G/3/D nebyly mechanicky testovány v důsledku destrukce lepených spár při máčení

5.2 Lepidla

Pro výrobu lepených lamelových nosníků byly použity dva druhy lepidel. : 1. polyuretanové jednosložkové lepidlo Lear D4 pro vysoce vodovzdorné montážní a plošné lepení dřeva. Toto lepidlo lze použít pro měkké, tvrdé i exotické dřeviny. Podle odolnosti proti vodě je tento typ lepidla řazen do kategorie D4. Lze jej také použít na

lepení veškerého dřeva, lepení materiálů na bázi dřeva (DTD, MDF apod.), pěnových hmot, izolací a kovů, aj. Spoj odolává i exteriérovému působení vody nebo zvýšené vlhkosti. Teplotní odolnost lepené spáry je do +120°C. Lepidlo nanášíme na čisté, suché plochy bez prachu a mastnot na jednu plochu v celkovém množství 100– 200 g/m² otevřenou dobou lepení max. 15 minut. Lepené plochy by měly být fixovány po dobu min. 60 minut mírným tlakem při pracovní teplotě min. +15°C. 2. typ – fenolformaldehydové lepidlo Lignofen G/3/D G/3/D. Lepidlo je plně vodovzdorné, s tmavším zbarvením lepené spáry, odolné proti stárnutí a mikroorganismům. Využívá se např. pro lepení nosníků, které jsou exponovány povětrnostním vlivům. Nevytvrzené lepidlo je ředitelné vodou. Karcinogenního formaldehydu lepidlo obsahuje minimum. Tento typ lepidla je vhodný i pro lepení dřeva s vyšší vlhkostí do w≈25%. Nanášené množství lepidla je zpravidla mezi 100– 200 g/m². Lze také lisovat při zvýšené teplotě, max. 125°C a tlaku 0,2–1,0 MPa.

5.3 Zařízení a pomůcky

- Zakracování masivních nosníků a lamel na rozměr 1000 mm bylo prováděno na formátovací pile;
- Horizontální frézka SCM FS 41 Classic, byla použita pro srovnání a tloušťkování masivních nosníků (cca 100 mm) a lamel (20 mm.);



Obr. 12. Horizontální Tloušťkovací frézka SCM FS 41 Classic

- Laserový dálkoměr Bosh GLM 50 Professional, pro měření podélných rozměrů nosníků
- Jednoetážový hydraulický lis HL 400, byl použit pro lisování lamelových nosníků



Obr. 13. Hydraulický lis HL 400

- Sušárna MOV–212P byla použita pro sušení nosníků na nulovou vlhkost pro následné stanovení vlhkosti zkušebních nosníků váhovou metodou.;



Obr. 14. Sušárna MOV– 212P

- Kád' na vodu, sloužila pro namáčení nosníků po dobu 30 dnů s cílem dosáhnout $w > M_H$.;



Obr. 15. Kád' na máčení nosníků

- Můstková váha LESAK 1T6080–LN/30, sloužila k vážení nosníků.;



Obr. 16. Můstková váha LESAK 1T6080–LN/30

- Digitální posuvné měřítko XTline, bylo používáno pro měření příčných rozměrů masivních nosníků a lamel. Dále pak pro měření příčných a podélných rozměrů nosníků určených ke zjišťování vlhkostních stavů během sušení.;



Obr. 17. Digitální posuvné měřítko XTline

- Laboratorní váha RADWAG WPX–650, byla používána pro vážení vykrácených částí nosníků pro určení vlhkosti



Obr. 18. Laboratorní váha RADWAG WPX-650

- Dvousloupový Servohydraulický vertikální zkušební stroj LabTech 6.500 (Obr. 19), byl používán pro mechanické zkoušení nosníků, který může vyvinout zatížení až 500 kN, s minimální a maximální rychlostí posunutí příčnicku 0,001 520 mm/min.



Obr. 19. Dvousloupový servohydraulický vertikální zkušební stroj LabTech



Obr. 20. Dvousloupový servohydraulický vertikální zkušební stroj LabTech

- Fotoaparát, ke zdokumentování nosníků a zkoušky
- Notebook, pro zapisování dat, výpočty a vyhodnocování dat.

5.4 Výroba zkušebních nosníků

Vzorky z rostlého dřeva buku byly vyrobeny na pile a následně bylo 10 vzorků předsušeno na cca 15 % a dalších 10 vzorků bylo máčeno v kádi, aby bylo dosaženo vlhkosti nad mez hygroskopicity. Poté byly z předsušených hranolů nařezány jednotlivé lamely v počtu 100 ks, které byly dále dosušeny na vlhkost 12 ± 2 %. Po vysušení byly lamely srovnány a tloušťkovány na požadovaný rozměr pro zajištění rovného a hladkého povrchu při nanášení lepidla. Čisté rozměry jednotlivých lamel byly $20 \times 100 \times 1000$ mm. Pro lepení lamelových nosníků byly použity lepidla, která jsou specifikována v Kapitole 4.2. Bylo vyrobeno 10 lamelových nosníků $100 \times 100 \times 1000$ mm pro každý typ použitého lepidla s množstvím nánosu 180 g/m^2 . Poté byly lamelové nosníky vkládány do lisu se světlostí etáže 200 mm pro zajištění požadovaného minimálního lisovacího tlaku 1,2 MPa. Lisovací čas byl 1 hodinu pro vzorky lepené polyuretanovým lepidlem Lear D4, 10 hodin pro fenolformaldehydové lepidlo Lignofen G/3/D. Lepené lamelové nosníky určené k máčení, byly po procesu lepení dva dny klimatizovány na skladě pro dokonalé vytvrzení lepidla. Poté byly přidány k masivním vzorkům do kádě s vodou, kde se vzorky máčely po dobu 30 dnů. U všech lepených vzorků však došlo k selhání lepidla a rozlepení jednotlivých lamel od sebe. Tyto vzorky byly následně vyřazeny.

Všechny vzorky byly před testování změřeny a zváženy. Příčné rozměry vzorků byly měřeny pomocí digitálního posuvného měřítka ve třech místech (na obou koncích a uprostřed délky nosníku). Poté z těchto třech naměřených hodnot v jednotlivých příčných směrech byl stanoven aritmetický průměr pro každý nosník. Podélné rozměry byly měřeny pomocí laserového dálkoměru a následně byly vzorky zváženy na laboratorní váze.

5.5 Analýza vad

Pro lepší poznání chování dřeva při zatížení a vyhodnocení vlivu faktorů na mechanické vlastnosti dřeva, je nutné detailně popsat vady dřeva, které se v nosnících objevovaly. U masivních nosníků byly brány v potaz všechny vyskytující se vady a ty byly zapsány

do tabulky. Pro lepené nosníky byly zjištěny vady dřeva pro jednotlivé lamely, které byly následně shrnuty pro hranol jako celek.

5.6 Výpočty před zkouškou smykových modulů, podle metody variabilního rozponu

Celý průběh zkoušky probíhal dle ČSN EN 408+A1(2012). Před začátkem zkoušky bylo nutné stanovit podle ČSN EN 408+A1 (2012) rychlost posunutí příčnicku zatěžující hlavy a rozpětí podpor pro stanovení smykových modulů metody s variabilním rozponem. Odstupy mezi rozpony byly stanoveny podle vzorce:

$$s = \left(\frac{h}{l}\right)^2 \quad (1)$$

kde: s – je odstup mezi rozpětími

h – je výška průřezu [mm]

l – je rozpětí v ohybu [mm]

Dále norma ČSN EN 408+A1 (2012) udává minimálně čtyři rozpony pro platné zkoušky pro stanovení smykových modulů a odstup rozponů od 2,5 do 35 mm. Bylo zvoleno 5 rozponů, výchozí rozpon byl zvolen 800 mm a pomocí Rovnice (1), byl stanoven odstup mezi rozpětími na 16 mm mezi rozpony. Rozpony byly 800, 784, 768, 752 a 736 mm.

Rychlost posunutí příčnicku zatěžující hlavy byl stanoven podle Rovnice (2). Tato rychlost posunutí byla stanovena na 0,05 mm/s. Vzorec z ČSN EN 408+A1 (2012) :

$$v = \frac{l \times 5 \times 10^{-5}}{6 \times h} \text{ [mm/s]} \quad (2)$$

kde: v – je rychlost posuvu čelisti [mm/s]

h – je výška průřezu [mm]

l – je rozpětí v ohybu [mm]

Stanovení maximální zatěžující síly F_{max} vychází z Rovnice (3) pro ohybovou pevnost dřeva pro zkoušku ve 3– bodém ohybu dle ČSN EN 408+A1 (2012). Víme, že maximální možná síla je $0,4F_{max}$. Vycházíme–li z obecného předpokladu a vzorce:

$$\sigma_{ohyb} = \frac{3F_{max} a}{bh^2} \quad (3)$$

kde: σ_{ohyb} – je pevnost dřeva v ohybu [MPa]

F_{max} – je maximální síla [kN]

a – je vzdálenost podpory od působící síly [mm]

b – je šířka průřezu [mm]

h – je výška průřezu [mm]

Po upravení Rovnice (3) dostáváme tvar:

$$F_{max} = \frac{\sigma_{ohyb} \times bh^2}{3a} \quad (4)$$

Pro vlhkost buku $w=12\%$ je σ_{ohyb} 103 MPa (Bergman 2010), vzdálenost podpory od působící síly pro 3– body ohyb byla 400 mm, šířka a výška průřezu byla volena 100×100 mm. Po dosazení hodnot do vzorce vychází maximální teoretická síla $F_{max} = 85,8$ kN, ze které bylo vypočítáno 40% (34,3 kN). Jelikož norma nestanovuje minimální hranici pro zatížení, rozhodli jsme v rámci experimentu pro zatížení nosníků silou 4 kN ($w < 12\%$). U vzorků s vlhkostí $w > MH$ je σ_{ohyb} nižší (Bergman (2010) uvádí 59 MPa). Vzdálenost podpory od působící síly a modelové parametry průřezu byly shodné s parametry pro $w=12\%$. Maximální teoretická síla F_{max} pro vlhkost nad MH vychází 49,2 kN a 40% z této hodnoty je 19,7 kN. Stejně jako v předchozím odstavci byla tato hodnota zatížení snížena na hodnotu zatížení 1,3 kN.

5.7 Výpočet vlhkosti váhovou metodou

Po ukončení experimentu a porušení všech nosníků, jsme jako první krok zvolili stanovení vlhkostních stavů nosníků. Vlhkost byla stanovena váhovou metodou podle ČSN 49 0103 (1979). Z nosníků 100 x 100 x 1000 mm jsme na formátovací pile odřezali nosníky 100 x 100 x 20 mm. Všechny nosníky byly pomocí digitálního posuvného měřidla změřeny a pomocí laboratorní váhy zváženy. Měřili jsme s přesností dvou desetinných míst a vážili s přesností tří desetinných míst. Po změření a zvážení nosníků jsme vložili nosníky do sušárny na teplotu 103 °C. Nosníky s vlhkostí okolo 12 % jsme sušili přibližně 7 dní a nosníky s $w > MH$ jsme sušili přibližně 15 dní. Po vysušení jsme nosníky přeměřili a následně jsme u nich vypočítali vlhkost nosníků podle vztahu z normy ČSN 49 0103 (1979):

$$w = \frac{m_w - m_0}{m_0} [\%] \quad (5)$$

kde: w – je vlhkost dřeva [%]

m_w – je hmotnost vzorku před vysušením [g]

m_0 – je hmotnost vzorku po vysušení [g]

5.8 Výpočty mechanických vlastností pro 3– body ohyb

Podle ČSN EN 408+ A1 Dřevěné konstrukce - Konstrukční dřevo a lepené lamelové dřevo - Stanovení některých mechanických vlastností byly stanoveny smykové moduly. Pro tento účel bylo nutné vypočítat některé dílčí parametry vstupující do výpočtu požadovaných smykových modulů. První z dílčích výpočtů byl výpočet zdánlivého modulu pružnosti podle Rovnice (6):

$$E_{m,app} = \frac{l_1^3 (F_2 - F_1)}{48I (w_2 - w_1)} \quad (6)$$

kde: $E_{m,app}$ – je zdánlivý modul pružnosti [MPa]

l_1 – je vzdálenost podpory od působící síly [mm]

$F_2 - F_1$ – je přírůstek zatížení na regresní přímce [N]

$w_2 - w_1$ – je přírůstek deformace odpovídající $F_2 - F_1$ [mm]

I – je moment setrvačnosti [mm⁴]

Dalším krokem byl výpočet koeficientu K_1 podle Rovnice (7):

$$K_1 = \frac{1/E_{m,app}}{(h/l)^2} \quad (7)$$

kde: K_1 – je koeficient, který udává sklon přímky [-]

$E_{m,app}$ – je zdánlivý modul pružnosti [MPa]

l – je vzdálenost podpor [mm]

h – je výška průřezu [mm]

Posledním krokem je stanovení vlastního smykového modulu G , podle Rovnice (8):

$$G = \frac{k_G}{K_1} \quad (8)$$

kde: G – je smykový modul [MPa]

K_1 – je koeficient, který udává sklon přímky [-]

k_G – je koeficient pro čtvercový nebo obdélníkový průřezy [-]

5.9 Výpočty mechanických vlastností pro 4– bodý ohyb

Dále byla zjišťována ohybová pevnost a modul pružnosti pro 4- bodou ohybovou zkoušku podle Rovnice (9):

$$E_{m,g} = \frac{3al^2 - 4a^3}{2bh^3 \left(2 \frac{(w_2 - w_1)}{F_2 - F_1} \right)} \quad (9)$$

kde: $E_{m,g}$ – je globální modul pružnosti [N/mm^2]

l – je rozpětí podpor [mm]

h – je výška průřezu [mm]

b – je šířka průřezu [mm]

$F_2 - F_1$ – je přírůstek zatížení na regresní přímce [N]

$w_2 - w_1$ – je přírůstek deformace odpovídající $F_2 - F_1$ [mm]

a – je vzdálenost mezi podporou a zatěžovací silou [mm]

Ohybová pevnost byla vypočítána podle Rovnice (10):

$$f_m = \frac{3Fa}{bh^2}$$

(10)

kde: f_m – ohybová pevnost [MPa]

F – zatížení [N]

a – vzdálenost mezi podporou a zatěžovací silou [mm]

b – šířka průřezu [mm]

h – výška průřezu [mm]

6. Výsledky a diskuze

6.1 Analýza vad jednotlivých skupin nosníků

Tabulka 11 zobrazuje zastoupení jednotlivých vad dřeva pro skupinu masivních nosníků s $w \approx 12\%$. Můžeme pozorovat, že u nosníků 6, 7 a 8 se vyskytuje nepravé jádro. Nosníky 8 a 6 navíc obsahují dřeň. Všechny nosníky obsahují drobné suky a rovněž trhliny.

Tab. 11. Druhy a objemy vad u masivních nosníků s $w \approx 12\%$

Masivní nosníky ($w \approx 12\%$)				
Č. vzorku	Druh vady	Specifikace vady	Rozměr vady b×h×l(mm)	Objem vady (mm ³)
3	Trhliny	Výsušné	1×2 ×1557	3114,00
	Suk	Otevřený, zdravý	Ø 6×20	565,49
Podíl vad na objemu vzorku (%)				0,41
5	Běl	Povrchově		
	Trhliny	Výsušné	1×2×433	866,00
		Výsušné	2×23×70	3220,00
	Odklon vláken		16°	–
	Suk	Otevřený, zdravý	Ø 5×20	392,70
Podíl vad na objemu vzorku (%)				0,05
8	Suk	Otevřený, zdravý	Ø 6×20	565,49
	Suk	Otevřený nezdravý	Ø 9×20	1272,35
	Suk	Otevřený nezdravý	Ø 7×20	769,69
	Trhlina	Dřeňová	3×27×886	71766,00
	Nepravé jádro	Jednoduché	18 %	
	Dřeň			
Podíl vad na objemu vzorku (%)				18,77
7	Nepravé jádro	Hvězdicovité	1 %	
Podíl vad na objemu vzorku (%)				1,00
6	Trhlina	Výsušná	2×19×97	3686,00
	Trhlina	Dřeňová	2×3×107	642,00
	Suk	Otevřený, nezdravý	Ø 6×20	565,49
	Suk	Otevřený, nezdravý	Ø 6×20	565,49
	Suk	Otevřený, nezdravý	Ø 4×20	251,33
	Nepravé jádro	Jednoduché	16 %	
	Dřeň			
Celkový podíl vad na objemu vzorku (%)				16,05

Následující Tabulka 12 zobrazuje vady, které se objevovaly u lepených lamelových nosníků lepených lepidlem Lear D4 s $w \approx 12\%$. Většina nosníků obsahovala pouze suky a trhliny, pouze u hranolu č. 4 se vyskytlo nepravé jádro v malém rozsahu.

Tab. 12. Druhy a objemy vad u lepených lamelových nosníků lepených lepidlem Lear D4 Lear D4 s w≈12 %

Lepené lamelové nosníky lepené lepidlem Lear D4 (w≈12 %)				
Č. vzorku	Druh vady	Specifikace vady	Rozměr vady b×h×l(mm)	Objem vady (mm ³)
3	Suk	Otevřený, nezdravý	Ø 9×23	1 463,20
	Suk	Otevřený zdravý	Ø 6×31	876,50
	Suk	Otevřený zdravý	Ø 7×56	2 155,13
Podíl vad na objemu vzorku (%)				0,73
9	Suk	Otevřený zdravý	Ø 20×37	11 623,89
Podíl vad na objemu vzorku (%)				0,11
8	Trhlina	Výsušná	2×16×134	4288,00
	Suk	Otevřený, zdravý	Ø 4×18	226,19
	Zárůst			
	Suk	Otevřený, zdravý	Ø 6×35	989,60
Podíl vad na objemu vzorku (%)				0,54
4	Nepравé jádro	Jednoduché	3 %	
	Nepравé jádro	Hvězdicovité	0,5 %	
Podíl vad na objemu vzorku (%)				3,5
7	Suk	Otevřený, zdravý	Ø 2×9	28,27
	Suk	Otevřený, zdravý	Ø 5×16	314,16
	Suk	Otevřený, nezdravý	Ø 6×32	904,78
	Suk	Otevřený, zdravý	Ø 6×27	763,41
	Trhlina	Dřeňová	1×2×87	174,00
Celkový podíl vad na objemu vzorku (%)				0,12

V Tabulce 13 můžeme vidět vady lepených lamelových nosníků lepených lepidlem Lignofen G/3/D. Lamely byly vytříděny, aby obsahovali minimum vad, můžeme si všimnout, že dva nosníky obsahovali oblínu a další dva nosníky nepravé jádro v malém rozsahu.

Tab. 13. Druhy a objemy vad v hranolech lepených lepidlem Lignofen G/3/D s w≈12 %

Lepené lamelové nosníky lepené lepidlem Lignofen G/3/D (w ≈12 %)				
Č. vzorku	Druh vady	Specifikace vady	Rozměr vady b×h×l(mm)	Objem vady (mm ³)
14	Biot. poškození		Ø 2×112	351,86
	Nepравé jádro	Paprskovité	0,2	
	Suk	Otevřený, nezdravý	Ø 8×42	2 111,15
Podíl vad na objemu vzorku (%)				0,22
11	Oblina	Krajové řezivo	3×5×472	7080,00
	Suk	Otevřený, nezdravý	Ø 8×39	1 960,35
	Suk	Otevřený, zdravý	Ø 7×33	1 269,99
	Suk	Otevřený, zdravý	Ø 3×21	148,44
Podíl vad na objemu vzorku (%)				0,12
15	Suk	Otevřený, zdravý	Ø 15×63	11 133,02
	Suk	Otevřený, zdravý	Ø 6×34	961,33

	Nepravé jádro	Jednoduché	1,5 %	
Podíl vad na objemu vzorku (%)				1,62
19	Oblina	Krajové řezivo	6×4×536	12 864,00
	Suk	Otevřený, zdravý	Ø 4×18	226,19
Podíl vad na objemu vzorku (%)				0,13
17	Oblina	Krajové řezivo	13×9×670	78 390,00
	Oblina		2×3×310	1 860,00
	Suk	Otevřený, zdravý	Ø 20×67	21 048,67
	Suk	Otevřený, zdravý	Ø 20×49	15 393,80
Celkový podíl vad na objemu vzorku (%)				1,17

Tabulka 14 zobrazuje vady, které obsahovaly masivní nosníky s vlhkostí nad MH. Nosníky obsahovaly zejména drobné vady, jako jsou suky. U jednoho hranolu se vyskytovalo nepravé jádro ve větším rozsahu.

Tab. 14. Druhy a objemy vad v masivních nosnících s $w > MH$

Masivní nosníky ($w > MH$)				
Č. vzorku	Druh vady	Specifikace	Rozměr vady b×h×l(mm)	Objem vady (mm ³)
6	Suk	Otevřený, zdravý	Ø 5×25	490,87
	Suk	Otevřený, zdravý	Ø 7×25	962,11
	Suk	Otevřený, nezdravý	Ø 10×47	3 691,37
Podíl vad na objemu vzorku (%)				0,05
4	Suk	Otevřený, nezdravý	Ø 6×25	706,86
	Suk	Otevřený, zdravý	Ø 4×25	314,16
	Zárost			
Podíl vad na objemu vzorku (%)				0,05
5	NP.J	Jednoduché	15 %	
	Suk	Otevřený, zdravý	Ø 25×40	19 634,95
	Suk	Otevřený, zdravý	Ø 4×25	314,16
	Suk	Otevřený, zdravý	Ø 27×40	69 397,78
Podíl vad na objemu vzorku (%)				15,82
9	Suk	Otevřený, zdravý	Ø 25×40	19 634,95
	Suk	Otevřený, zdravý	Ø 20×49	85 012,28
	Trhlina	Výsušná	1×5×873	4365,00
Podíl vad na objemu vzorku (%)				0,99
8	Suk	Otevřený, nezdravý	Ø 8×37	1 859,82
	Suk	Otevřený, nezdravý	Ø 4×25	314,16
	Suk	Otevřený, zdravý	Ø 5×25	490,87
Celkový podíl vad na objemu vzorku (%)				0,02

6.2 Hustota a vlhkost zkušebních nosníků

V Tabulce 15 a 16 můžeme vidět, že vlhkost pro jednotlivé skupiny nosníků zůstává velmi podobná, výjimku tvoří skupina masivních nosníků, u kterých je směrodatná

odchylka pro vlhkost 16 %. Můžeme také pozorovat odchylky v hustotě. U masivních nosníků ($w \approx 12\%$) vidíme přibližně standardní odchylku pro hustotu dřeva ($38,4 \text{ kg/m}^3$). S přibývajícím vlhkostí roste také odchylka v hustotě u nosníků masivních (s vlhkostí $> MH$) na $64,8 \text{ kg/m}^3$.

Tab. 15. Tabulka masivních nosníků pro hustotu a vlhkost

Masivní ($w \approx 12\%$)			Masivní ($w > MH$)		
Číslo vzorku	ρ	w	Číslo vzorku	ρ	w
	$[\text{kg/m}^3]$	$[\%]$		$[\text{kg/m}^3]$	$[\%]$
7	768,9	13,6	9	814,6	53,1
6	696,0	13,8	8	910,5	89,0
5	768,4	13,6	4	844,3	68,3
8	697,7	13,3	6	978,2	87,1
3	763,4	12,9	5	854,2	60,0
Průměr	738,9	13,4	Průměr	880,4	71,5
COV	5,2	2,6	COV	7,4	22,5
SD	38,4	0,4	SD	64,8	16,1

U lepených lamelových nosníků obou skupin můžeme vidět poměrně nepatrnou odchylku SD ($5,6$ a $10,7 \text{ kg/m}^3$) a variační koeficient (COV) do 2 %. Snížení variability všech vlastností je jedním z cílů kompozitních materiálů. Oproti masivním nosníkům, mají lepené nosníky také nižší směrodatné odchylky ve vlhkosti. Směrodatná odchylka vlhkosti činí 0,3 % pro oba druhy lepidel a variační koeficient je pro obě lepidla pod 3 %.

Tab. 16. Tabulka lepených nosníků pro hustotu a vlhkost

Lepené Lignofen G/3/D ($w \approx 12\%$)			Lepené Lear D4 ($w \approx 12\%$)		
Číslo vzorku	ρ	w	Číslo vzorku	ρ	w
	$[\text{kg/m}^3]$	$[\%]$		$[\text{kg/m}^3]$	$[\%]$
17	691,2	11,4	4	681,8	11,6
19	689,9	11,9	3	708,7	11,6
15	691,2	11,5	8	693,7	10,9
14	682,9	11,6	7	704,3	11,3
11	679,0	12,2	9	691,8	11,4
Průměr	686,8	11,7	Průměr	696,1	11,4
COV	0,8	2,8	COV	1,5	2,5
SD	5,6	0,3	SD	10,7	0,3

6.3 3– bodý ohyb

6.3.1 Smykový modul pružnosti z 3– bodého ohybu

Tabulka 17 zobrazuje smykové moduly pružností pro masivní nosníky s vlhkostmi ≈ 12 a $w > MH$, které jsme získali ze zkoušek 3– bodého ohybu podle ČSN EN 408+A1 (2012). Obě skupiny zobrazují velmi variabilní výsledky, což můžeme pozorovat na variačních koeficientech a směrodatných odchylkách. Guntekin et al. (2016) uvádí hodnoty pro smykové moduly G_{LT} 887 MPa a G_{LR} 1230 MPa. Smykové moduly pružnosti pro masivní nosníky s $w \approx 12$ % vyšly zhruba o 300 MPa nižší než Guntekin et al., (2016). Jedním z důvodů může být nižší množství hodnocených nosníků, s tím spojené snížení variačního koeficientu COV.

Tab. 17. Smykové moduly pružnosti ze zkoušek 3– bodého ohybu pro masivní nosníky

Masivní ($w \approx 12$ %)		Masivní ($w > MH$)	
Č. vzorku	G_{LT}	Č. vzorku	G_{LT}
7	1277,7	9	385,3
6	329,1	8	87,9
5	195,2	4	196,9
8	556,4	6	208,6
3	608,1	5	99,4
Průměr	593,29	Průměr	195,62
COV	70,42	COV	61,02
SD	417,81	SD	119,36

Smykové moduly pružnosti pro lepené lamelové nosníky vykazují větší rozdíly. U nosníků lepených lepidlem Lignofen G/3/D, můžeme vidět kromě jednoho vzorku hodnoty mezi 300 až 400 MPa a mají variační koeficient téměř 61 %. U nosníků lepených lepidlem Lear 4D, se dokonce hodnoty pohybují v rozptylu mezi 160–1407 MPa a variační koeficient 62,63 %. V porovnání s hodnotami smykových modulů pružnosti podle dalších autorů vychází poměrně nižší hodnoty. Brandner et al. (2007), uvádí smykové moduly pružnosti pro lepené smrkové nosníky v rozmezí od 650 do 830 MPa a Biblis (2001) 903 MPa, který navíc upozorňuje na vysoký variační koeficient COV. Vliv samozřejmě může být ve velikosti zkušebních nosníků, obsaženými vadami, které způsobují nižší hodnoty než u malých zkušebních vzorků bez vad dřeva.

Tab. 18. Smykové moduly pružnosti ze zkoušek 3– bodého ohybu pro lepené nosníky

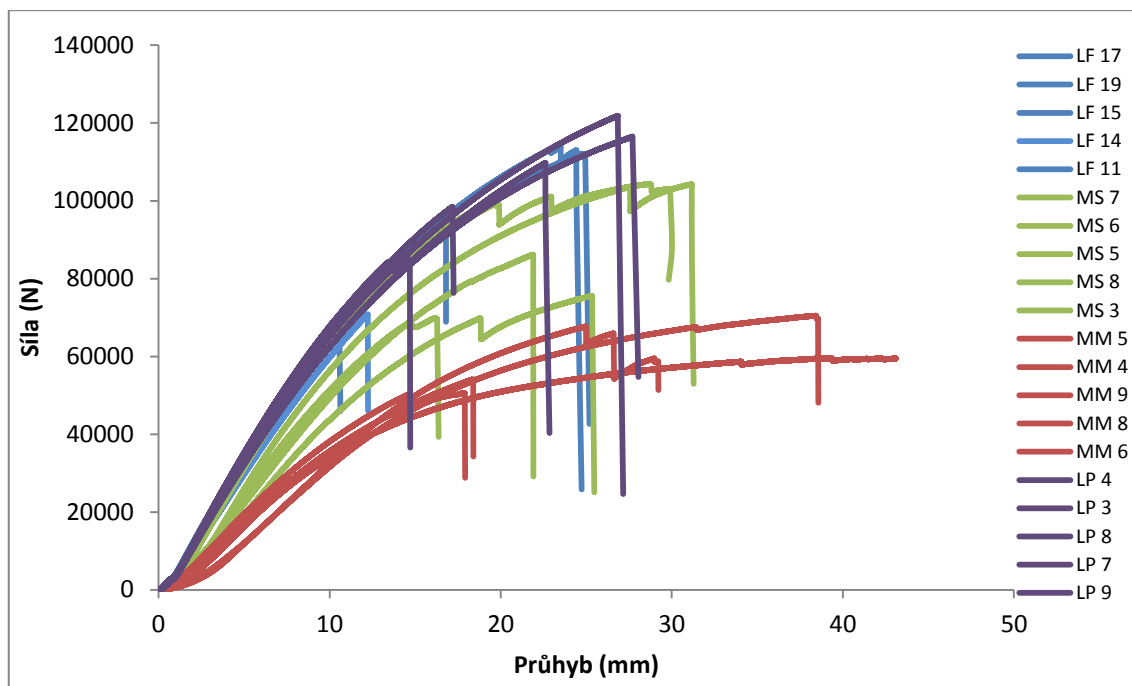
Lepené Lignofen G/3/D ($w \approx 12\%$)		Lepené Lear 4D ($w \approx 12\%$)	
Č. vzorku	G	Č. vzorku	G
17	331,1	9	159,6
19	1048,5	7	1406,8
15	411,9	3	539,5
14	312,8	4	668,7
11	418,7	8	955
Průměr	504,61	Průměr	745,84
COV	60,98	COV	62,63
SD	307,69	SD	467,11

6.4 4– bodý ohyb

6.4.1 Pracovní diagramy

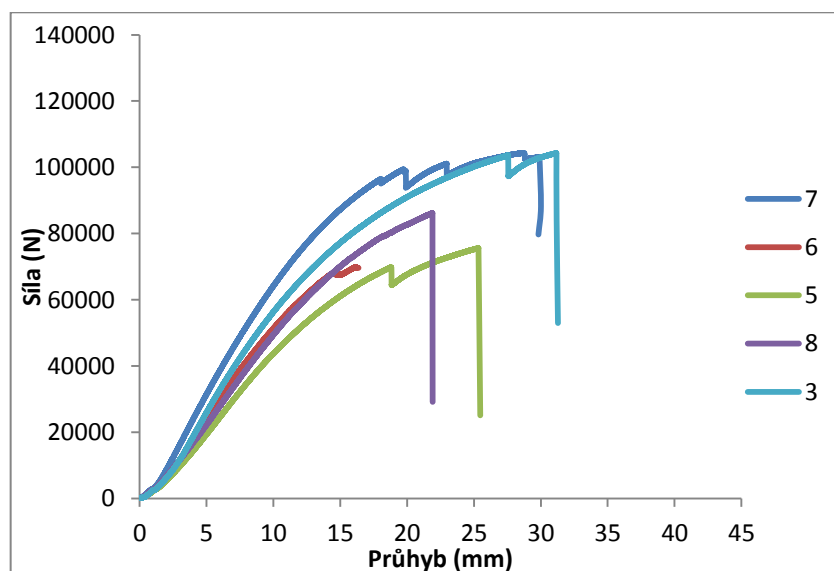
Na Obrázku 21–25 pracovních diagramů, můžeme vidět všechny 4 skupiny nosníků. Skupina LF označuje diagramy pro nosníky lepené fenolformaldehydovým lepidlem Lignofen G/3/D. Skupina MS označuje masivní nosníky s $w \approx 12\%$. Skupina MM označuje masivní nosníky s $w > MH$. Poslední skupina nese označení LP a jedná se o nosníky lepené polyuretanovým lepidlem Lear 4D.

U lepených nosníků můžeme vidět téměř totožný trend pracovních diagramů. Podobně na tom jsou nosníky masivní s $w > MH$. Výjimku tvoří masivní nosníky s $w \approx 12\%$, které mají velké rozdíly v průbězích. Jednotlivé skupiny nosníků budou rozebrány níže.



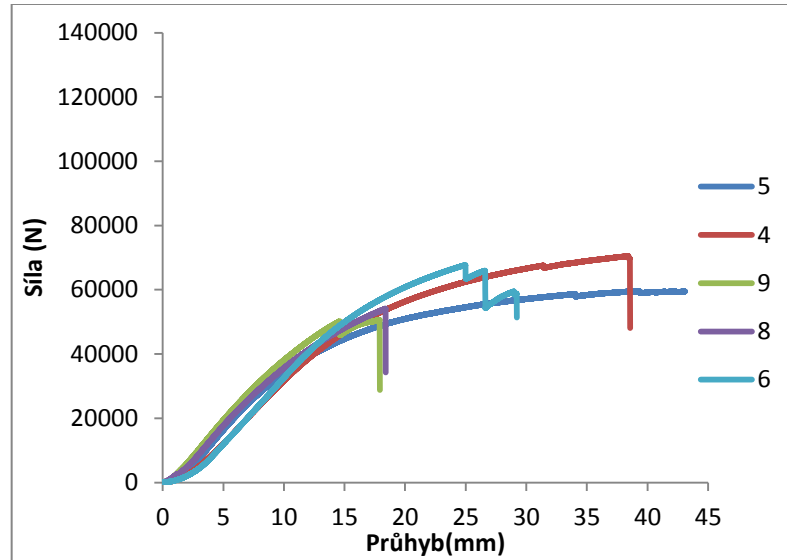
Obr. 21– Pracovní diagramy všech zkoušek

Obrázek 22 ukazuje pracovní diagramy pro nosníky masivní s $w \approx 12\%$. U některých nosníků můžeme vidět výrazné odchyly. U nosníků 6, 5 a 8 můžeme vidět výrazný vliv vad dřeva na mechanické vlastnosti, zejména dřen a odklonu vláken. Nosníky 6 a 8 obsahovali dřeň, vzorek 5 obsahoval odklon vláken, kde lze vidět výrazné snížení mechanických vlastností dřeva. Z Tabulky 11 analýzy vad můžeme dále vidět, že zmiňované nosníky 6, 8 a 5 obsahovaly procentuálně nejvyšší množství vad.



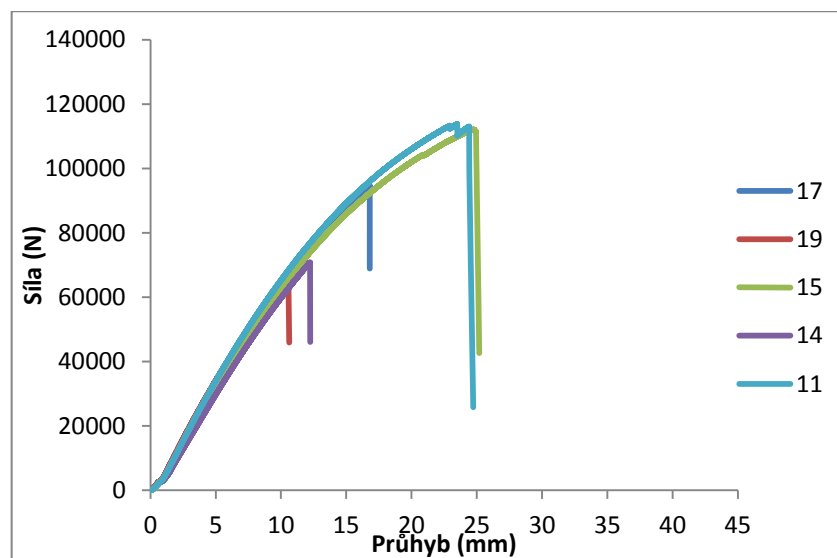
Obr. 22. Pracovní diagramy pro nosníky masivní s $w \approx 12\%$

Obrázek 23 zobrazuje pracovní diagramy pro skupinu masivní nosníků s $w > MH$. Máčené nosníky obsahovaly nejmenší počet vad, tudíž jejich variabilita není příliš vysoká, jak lze pozorovat z pracovních diagramů na Obrázku 23.



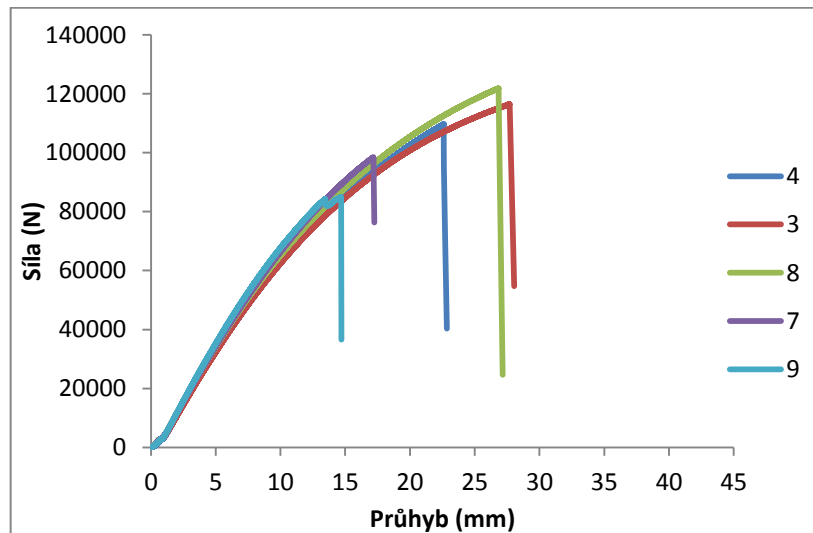
Obr. 23. Pracovní diagramy pro nosníky masivní s $w > 12\%$

Obrázek 24 znázorňuje pracovní diagramy pro lepené nosníky lepené lepidlem Lignofen G/3/D s $w \approx 12\%$. Můžeme zde pozorovat výrazné odchylky v dosažení maximální síly. Jak dokladují Obrázky 42–44 v příloze, u nosníků 19, 14 a 17 došlo k porušení lepené spáry. K porušení v lepené spáře došlo pravděpodobně kvůli nedostatečnému množství naneseného lepidla.



Obr. 24. Pracovní diagramy pro nosníky lepené fenolformaldehydem s $w \approx 12\%$

Na Obrázku 25 můžeme vidět skupinu nosníků lepené lepidlem Lear D4 s $w \approx 12\%$. U nosníků 7 a 9 můžeme vidět nízkou dosaženou maximální sílu vzhledem k ostatním nosníkům, a jak můžeme pozorovat na Obrázku 41 v Přílohách, došlo k selháním nosníků v lepené spáře. Důvod selhání v lepené spáře bude pravděpodobně způsoben nanesením nedostatečného množství lepidla na jednotlivé lamely.



Obr. 25. Pracovní diagramy pro nosníky lepené polyuretanem s $w \approx 12\%$

6.4.2 MOE, MOR– statická ohybový zkouška

Tabulka 19 ukazuje výsledky ohybových modulů pružnosti v 4– bodém ohybu vypočtených podle normy ČSN EN 408+A1 (2012). Průměrný ohybový modul pružnosti (MOE) 7 858 MPa byl stanoven s variačním koeficientem 15,2 %. Průměrná ohybová pevnost (MOR) ve 4– bodém ohybu 79 MPa byla stanovena s variačním koeficientem 16,3 %. Ozyhar et al. (2012) uvádí mechanické vlastnosti pro různé vlhkostní stavy masivních nosníků s MOE 12 400 MPa a MOR 91,8 MPa při vlhkosti 13,3 %; MOE 10 800 MPa s MOR 70,2 MPa pro vlhkost 18,7 %. Burdurlu et al. (2007) zase uvádí pro buk východní MOE 11 063 MPa a MOR 134,13. Rozdíly mezi zmiňovanými autory a našimi měřeními mohlo způsobit vyšší množství vad u masivních nosníků.

Tab. 19. Výsledky MOE, MOR ze 4 bodého ohybu

Masivní (w≈12 %)		
Č. vzorku	MOE	MOR
7	9007,7	92,5
6	8576,9	65,9
5	6992,2	72,3
8	6211,0	71,7
3	8500,7	93,6
Průměr	7858	79
COV	15,2	16,3
SD	1195,2	12,9

Tabulka 20 ukazuje MOE u pro skupinu dřev masivních s $w > MH$. Průměrný MOE 3 724 MPa byl stanoven s variačním koeficientem 9,8 %. Průměrný MOR 41 MPa byl stanoven s variačním koeficientem 12,0 %. Průměrné vlhkosti nosníků se pohybovali kolem 72 %. Ozyhar et al. (2012) uvádí MOE 9 970 MPa a MOR 58,6 MPa při vlhkosti 36,3 %. Podle Bodiga a Jayna (1993) se MOE a MOR za mezí hydroskopicity nemění, ovšem podle Požgaje (1993) mírně klesají i za mezí hydroskopicity.

Tab. 20. Výsledky MOE, MOR a G ze 4 bodého ohybu

Masivní (w>MH)		
Č. vzorku	MOE	MOR
9	4155,1	35,6
8	3845,7	37,3
4	3152,2	45,7
6	3739,5	46,9
5	3725,2	41,1
Průměr	3724	41
COV	9,8	12,0
SD	363,3	5,0

Tabulka 21 ukazuje výsledky MOE pro skupinu dřev lepených lepidlem Lignofen G/3/D s $w \approx 12$ %. Průměrný MOE 7 853 MPa byl stanoven s variačním koeficientem 4,2 %. Průměrná MOR 73 MPa byl stanoven s variačním koeficientem 25,5 %. Frese a Blaß (207) uvádí MOE a MOR pro tříděné lamelové dřevo s MOE od 12 000 po 16 000 a MOR od 50 po 92 MPa. Ve srovnání s jejich měřením, jsme ale nedisponovali tak masivními nosníky, tudíž MOE bylo patrně nižší. Oproti tomu i přes porušení nosníků

v lepené spáře, se námi uváděné pevnosti lepených nosníků téměř shodují při 5% kvantilu s těmito autory. Burdurlu et al. (2007) uvádí pevnost dokonce 148,3 MPa.

Tab. 21. Výsledky MOE a MOR ze 4 bodého ohybu

Lepené Lignofen G/3/D ($w \approx 12\%$)		
Č. vzorku	MOE	MOR
17	8049,1	75,9
19	8172,4	51,4
15	7561,2	90,5
14	7435,5	57,1
11	8046,7	92,3
Průměr	7853	73
COV	4,2	25,5
SD	330,7	18,7

V Tabulce 22 můžeme vidět výsledky modulů pružnosti v ohybu pro skupinu dřev lepených lepidlem Lear 4D s $w \approx 12\%$. Modul pružnosti v ohybu vyšla v průměru 7 693 MPa s variačním koeficientem 6,3 %. Pevnost v ohybu v průměru vyšla 83 MPa s variačním koeficientem 13,8. Pevnost této skupiny nosníků, je velmi dobře srovnatelná s literárními hodnotami, jelikož u této skupiny dřev došlo k porušení v lepené spáře pouze u jednoho hranolu.

Tab. 22. Výsledky MOE, MOR a G ze 4 bodého ohybu

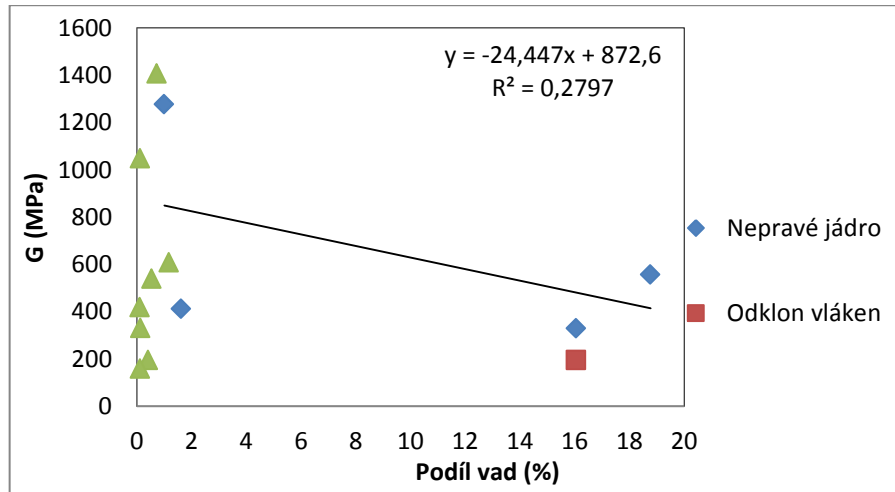
Lepené Lear 4D ($w \approx 12\%$)		
Č. vzorku	MOE	MOR
9	8394,6	66,4
7	7976,4	77,1
3	7259,1	91,0
4	7317,9	85,6
8	7518,3	94,9
Průměr	7693	83
COV	6,3	13,8
SD	482,7	11,4

6.5 Grafy závislostí

6.5.1 Grafy závislostí pro G z 3– bodého ohybu

Na Obrázku 26 můžeme vidět závislost smykového modulu pružnosti na vlhkosti. Můžeme se domnívat, že nejvíce klesá modul pružnosti po mez hydroskopivity a poté klesá velice zvolna. Bodiga a Jayne (1993) uvádí, že se stoupající vlhkostí po mez

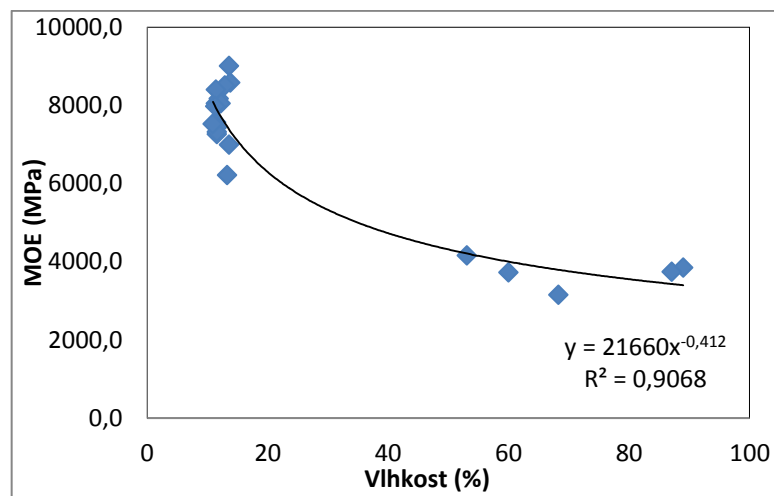
Na Obrázku 28 níže, jsme se snažili determinovat podíl vad na smykovém modulu pružnosti. Smykové moduly pružnosti mají velmi vysokou variabilitu, a vzhledem k malému množství zkušebních nosníků, je z těchto výsledků nemožné určit, zda má podíl vad vliv na smykový modul pružnosti.



Obr. 28. Závislost smykového modulu pružnosti na podílu vad dřeva

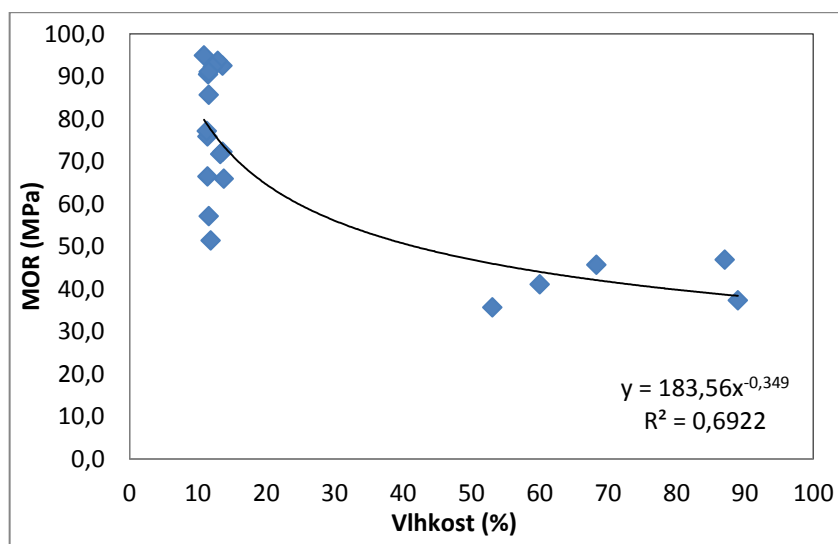
6.5.2 Grafy závislostí pro MOE a MOR ze 4– bodého ohybu

Obrázek 29 zobrazuje rozdíly trend vlivu vlhkosti na modulu pružnosti v ohybu. Předpoklad, že vlhkost dřeva ovlivňuje mechanické vlastnosti výrazným způsobem pouze po mez hydroskopicity, jsem nepotvrdil, jelikož má trend tendenci výrazně klesat téměř až ku 40 –ti procentům, což ale nevyvracuje myšlenku Požgaje (1993), že s rostoucí vlhkostí klesají mechanické vlastnosti dřeva. Pokud bychom měli více nosníků o různé vlhkosti, byla by závislost na vlhkosti patrnější.



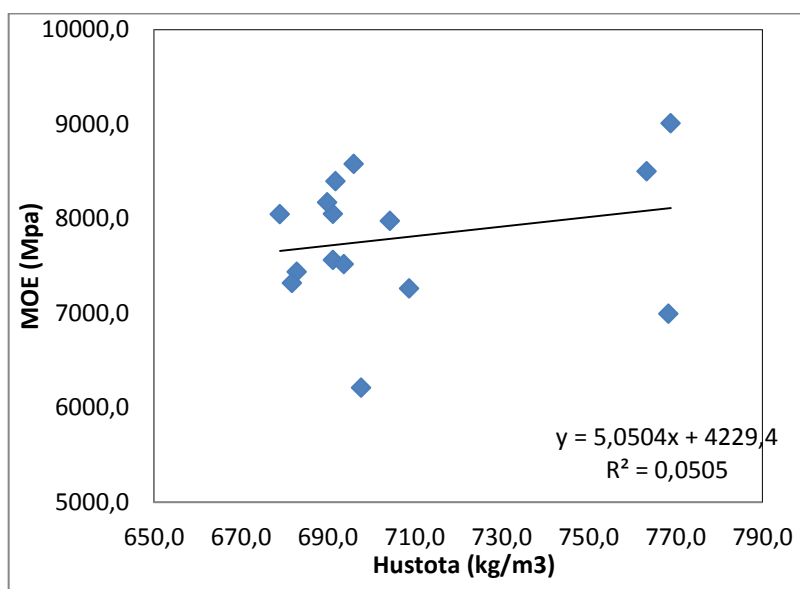
Obr. 29. Závislost MOE na vlhkosti dřeva

Pevnost dřeva výrazně ovlivňovala i vlhkost dřeva (Obrázek 30). Pevnost výrazně klesá přibližně za hranici 30 %, jedná se o podobný trend jako u předchozího grafu. Pevnost klesá s přibývajícím hustotou, to je patrné. Jestli je mez hydroskopicity výrazným mezním bodem, ale nejsme z důvodů nedostatku nosníků říci.



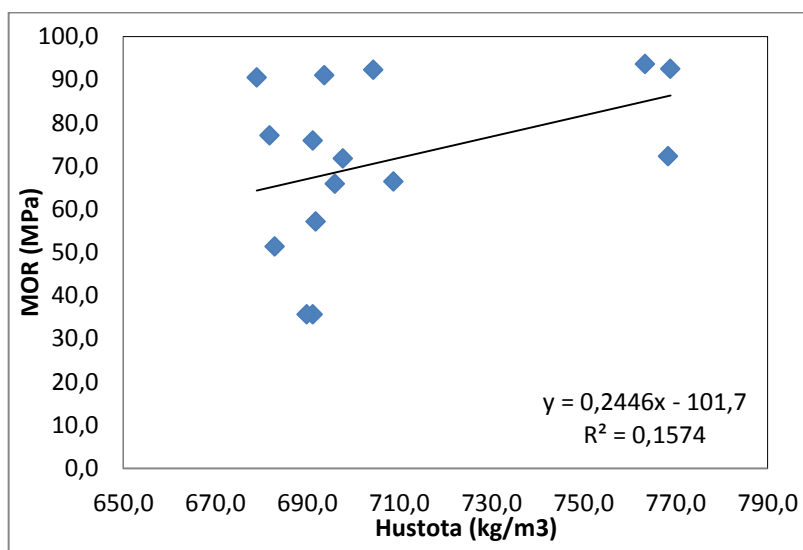
Obr. 30. Závislost MOR na vlhkosti dřeva

Obrázek 31 zobrazuje vliv hustoty na modulu pružnosti v ohybu. Nelze očekávat jakékoliv závislosti vzhledem k nízkému rozptýlu hustot a měření pro jednu dřevinu.



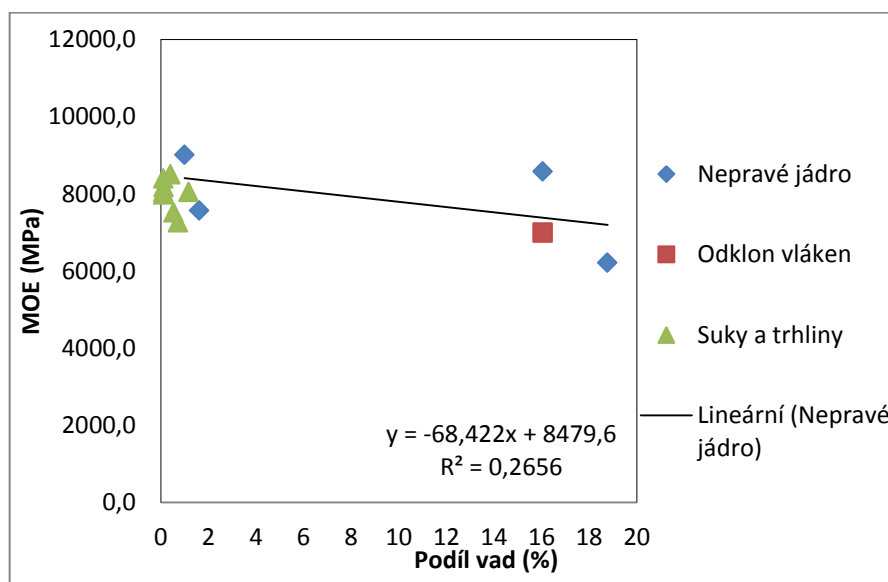
Obr. 31. Závislost ohybového modulu pružnosti na hustotě

Ani u závislosti pevnosti na hustotě, nelze prokázat tvrzení, že se vzrůstající hustotou roste i pevnost dřeva. Důvodem je zjišťování mechanických vlastností pouze pro jednu dřevinu s rozptylem hustot 100 kg/m³.



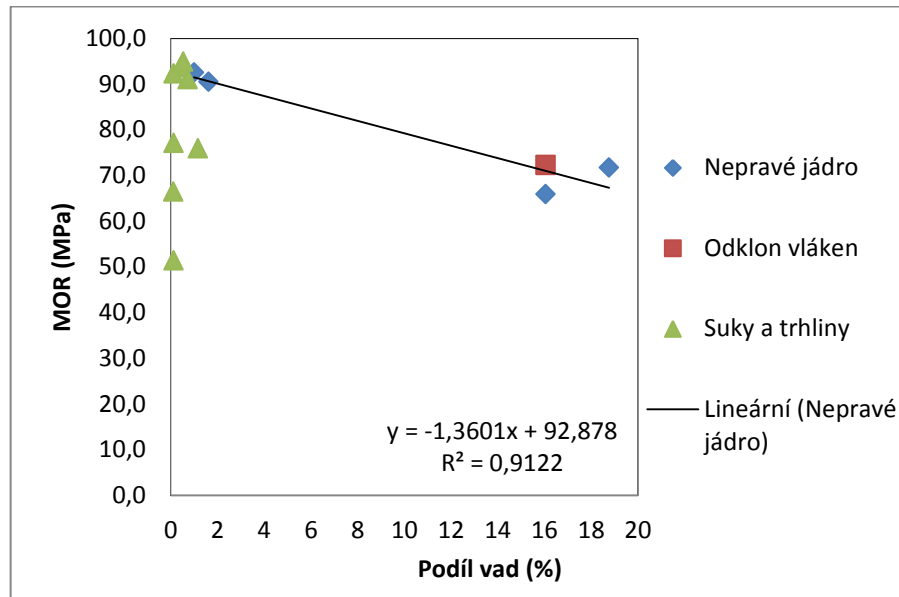
Obr. 32. Závislost MOR na hustotě dřeva

Na Obrázku 33 můžeme vidět vliv vad na modul pružnosti v ohybu. Vzhledem k malému množství zkušebních nosníků nemůžeme přesně říci, zda vady dřeva výrazným způsobem ovlivňují modul pružnosti v ohybu, můžeme se pouze domnívat, že tomu do jisté míry může být.



Obr. 33. Závislost ohybového modulu pružnosti na podílu vad

Obrázek 34 zobrazuje závislost mezi podílem vad a pevností dřeva. U tohoto grafu můžeme i přes malé množství zkušebních nosníků prohlásit, že rozsah a charakter vad má velký vliv na pevnost dřeva.

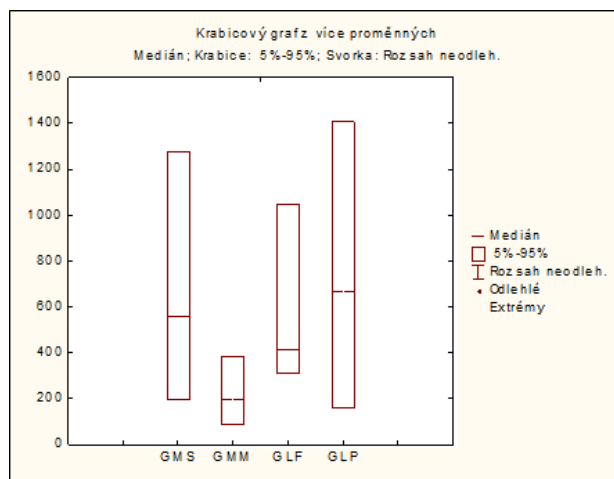


Obr. 34. Závislost ohybového modulu pružnosti na podílu vad

6.6 Popisná statistika

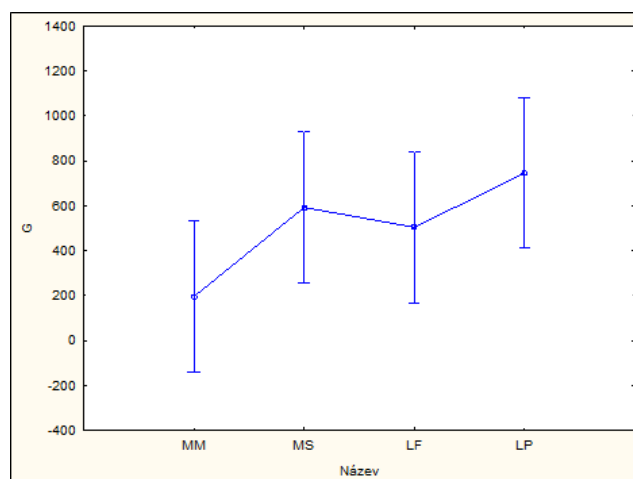
6.6.1 Popisná statistika pro G z 3- bodého ohybu

Z Obrázku 35 vidíme krabicový graf pro smykové moduly pružnosti získané z 3- bodého ohybu. Můžeme vidět, že veškeré nosníky s vlhkostí $\approx 12\%$ (MS, LF a LP) mají vysoký rozptyl hodnot. Hodnoty pro MM sice vykazují výrazně nižší rozptyl, ale právě díky vysokému rozptylu ostatních skupin, nejsou statisticky významné. Můžeme si také všimnout, že splývají hodnoty maxima a minima s 5- ti a 95- ti % kvantily.



Obr. 35. Krabicové grafy pro smykový modul pružnosti z 3– bodého ohybu

Vzhledem k vysoké variabilitě smykových modulů, nelze statisticky prokázat odlišnost mezi skupinami nosníků a tedy statisticky významné rozdíly.



Obr. 36. Graf testu rozptylu ANOVA pro G

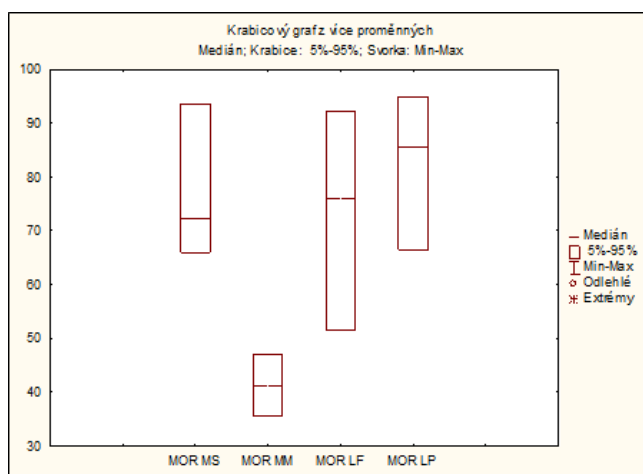
V Tabulce 23 můžeme vidět mnohonásobné srovnání hodnot smykových modulů pružnosti Tuckeyho testem. Můžeme z něj vyčíst, že u žádné navzájem posuzované skupiny nedošlo ke statisticky výraznému rozdílu.

Tab. 23– Mnohonásobné srovnání hodnot G (Tuckey– test)

Mnohonásobné porovnání pro smykové moduly				
Prokázaná rozdílnost souborů: NE				
Název	MM	MS	LF	LP
MM		0,320247	0,529207	0,106111
MS	0,320247		0,978297	0,902834
LF	0,529207	0,978297		0,707997
LP	0,106111	0,902834	0,707997	

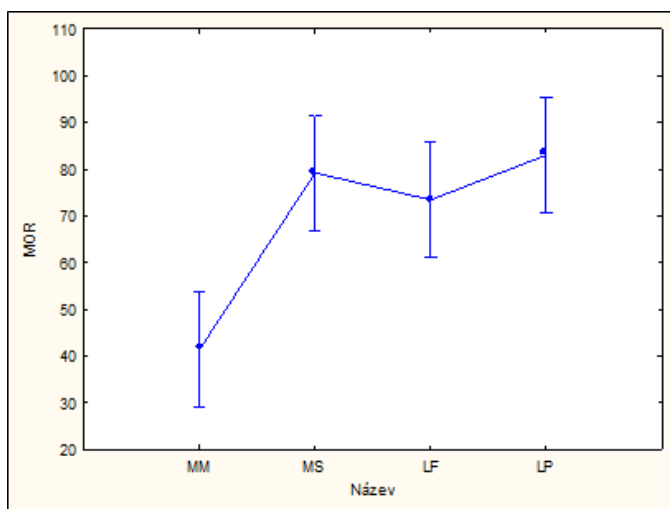
6.6.2 Popisná statistika pro MOR

Na obrázku 37 vidíme krabicový graf pro pevnost získanou ze zkoušky 4– bodého ohybu. Můžeme vidět, že veškeré nosníky s vlhkostí $\approx 12\%$ (MS, LF a LP) mají vysoký rozptyl hodnot. Hodnoty pro MM vykazují výrazně nižší rozptyl, ale i výrazně nižší hodnoty, díky nimž jsou statisticky významné. Také si můžeme všimnout, že splývají hodnoty maxima a minima s 5– ti a 95– ti % kvantily.



Obr. 37. Krabicové grafy MOR ze 4– bodého ohybu

Na výsledcích testů ANOVY pro pevnost dřeva (Obrázek 38), vidíme spojené průměrné střední hodnoty s rozptyly minima a maxima pro dané skupiny nosníků. Můžeme také vidět, že se skupina MM (masivy s $w > MH$) statisticky výrazně liší od ostatních skupin, což potvrzuje i Tuckeyho test. Ostatní skupiny překrývají, tudíž nejsou statisticky významné.



Obr. 38. Graf rozptylu ANOVA– MOR

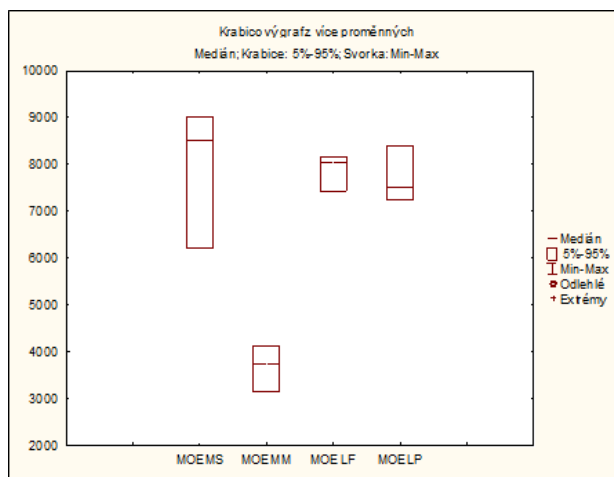
V Tabulce 24 mnohonásobného srovnání pevností, můžeme vidět červeně znázorněny statisticky významné rozdíly u skupiny nosníků MM (Masivy s $w > MH$) vůči zbývajícím třem skupinám. Toto tvrzení také potvrzuje grafická analýza ANOVA na Obrázku 38.

Tab. 24. Mnohonásobné srovnání hodnot MOR (Tuckey– test)

Mnohonásobné porovnání pro MOR				
Prokázaná rozdílnost souborů: ANO				
Název	MM	MS	LF	LP
MM		0,001591	0,006192	0,000728
MS	0,001591		0,894896	0,965957
LF	0,006192	0,894896		0,656068
LP	0,000728	0,965957	0,656068	

6.6.3 Popisná statistika pro ohybové moduly pružnosti

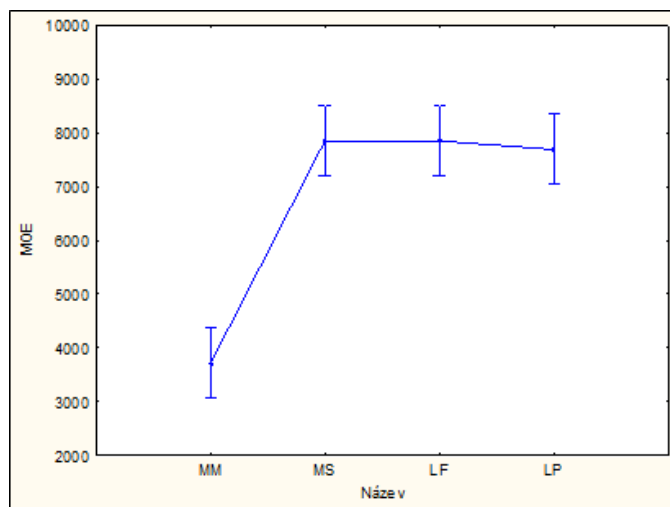
U krabicových grafů (Obrázek 39) si můžeme všimnout, že nejvyšší rozptyl můžeme vidět u nosníků MS (masivní $\approx 12\%$). U lepených nosníků můžeme vidět výrazně nižší variabilitu. Také si můžeme všimnout, že splývají hodnoty maxima a minima s 5– ti a 95– ti % kvantily.



Obr. 39. Krabicové grafy ohybových modulů pružnosti

Na výsledcích testů ANOVY pro moduly pružnosti v ohybu (Obrázek 40), vidíme spojené průměrné střední hodnoty s rozptyly minima a maxima pro dané skupiny nosníků. Můžeme také vidět, že se skupina MM (masivy s $w > MH$) statisticky výrazně

liši od ostatních skupin, což potvrzuje i Tuckeyho test. Ostatní skupiny překrývají, tudíž nejsou statisticky významné.



Obr. 40. Graf rozptylu ANOVA pro MOE

V Tabulce 25 mnohonásobného srovnání modulů pružností můžeme vidět červeně znázorněny statisticky významné rozdíly u skupiny nosníků MM (Masivy s $w > MH$) vůči zbývajícím třem skupinám. Toto tvrzení také potvrzuje grafická analýza ANOVA na Obrázku 40.

Tab. 25. Mnohonásobné srovnání hodnot ohybových modulů pružností (Tuckey– test)

Mnohonásobné porovnání pro ohybový modul pružnosti				
Prokázaná rozdílnost souborů: ANO				
Název	MM	MS	LF	LP
MM		0,000185	0,000185	0,000186
MS	0,000185		1,000000	0,981005
LF	0,000185	1,000000		0,982557
LP	0,000186	0,981005	0,982557	

6.7 Využití v praxi

Bukové dřevo vykazuje dobré ohybové a pevnostní charakteristiky, z praktického hlediska, jej ale pravděpodobně budou nahrazovat kompozity, ve kterých se bude vyskytovat, zejména kvůli jeho vysoké hustotě. Bukové dřevo je v dnešní době hodně skloňováno s možností jeho využití v praxi ve stavebním průmyslu, což vidím jako velice vítanou volbu do budoucna.

7. Závěr

Cílem bakalářské práce, bylo stanovit mechanické vlastnosti konstrukčního lepeného lamelovaného a masivního nosníku. Byly popsány smykové charakteristiky, které byly zjištěny na základě 3– bodého ohybu. V Tabulce 26 můžeme vidět smykové moduly pružnosti, které nejsou úplně v rozporu s literárními údaji, ale díky vysoké variabilitě smykových modulů a variačním koeficientům přes 60 % nelze považovat tyto hodnoty za směrodatné. Ze statistických testů víme, že ani jedna ze skupiny nejevila výrazné statistické rozdíly.

Další část práce se zabývala stanovením ohybových modulů pružnosti ve 4– bodém ohybu. U ohybových modulů pružnosti je možné vidět přirozenou variabilitu výsledků, kdy se výsledky lišily podle variačního koeficientu maximálně 15 %, což bylo u nosníků, které jevíly nejvyšší rozdíly ve vlhkostech, hustotách a vadách dřeva v rámci jedné skupiny nosníků. Z Tabulky 26 můžeme vidět, že hodnoty pro moduly pružnosti se u nosníků s $w \approx 12\%$ výrazně neliší.

Dále byla stanovena i ohybová pevnost nosníků pro jednotlivé skupiny. Můžeme si opět všimnout podobných ohybových pevností u všech nosníků s $w \approx 12\%$. Právě kvůli skutečnosti, že docházelo k porušení lepených spojů, mohli bychom se domnívat, že ohybové pevnosti lepených nosníků budou vyšší a předčí masivní nosníky.

Tab. 26. Souhrnné výsledky pro MOE, MOR a G jednotlivých skupin

Název skupiny	MOE 4– bodý ohyb	MOR 4– bodý ohyb	G 3– bodý ohyb
Masivní ($w \approx 12\%$)	7858	79	593
Masivní ($w > MH$)	3724	41	196
Lepené Lignofen G/3/D ($w \approx 12\%$)	7853	73	505
Lepené Lear 4D ($w \approx 12\%$)	7693	83	746

Dřevo potvrdilo jeho charakter, tedy jeho vysoké variabilní hodnoty. Všechny výsledky byly ovlivněny některým z faktorů, jako jsou (hustota, vlhkost i vady dřeva). Každý jeden z faktorů byl rozebrán z literárních nebo vlastních předpokladů.

8. Summary

The aim of the bachelor thesis was to determine the mechanical properties of a structural glued laminated beam and massive beam. The shear characteristics that were found based on the 3– point bend were described. The shear moduli of elasticity did not completely contradict literary sources, but due to the high shear modulus variability and variation coefficients above 60%, these values cannot be considered as standard. We know from statistical tests that none of the groups showed significant statistical differences that would be statistically significant.

Another part of the thesis deals with the determination of bending modules with elasticity in a 4 point bend. Flexural moduli of elasticity is the natural variability of the results, where the results varied by 15% according to the COV, which was the case for the beams showing the highest differences in moisture, density and defects of wood within one group of beams. The diffraction strength differs markedly.

At $w \approx 12\%$ the flexural strength did not differ significantly due to the fact that the glued joints were broken, we could believe that the bending strength of the bonded beams would be higher and exceed the massive beams.

The wood has confirmed its character, its high variable value. All the results were influenced by some factors such as (density, moisture and wood defects). Each of the factors was dissociated from literary or own assumptions.

9. Literární zdroje

- AICHER S., HÖFFLIN L., BEHRENS W., 2001. A study on tension strength of finger joints in beech timber laminations. *Otto-Graf-J.* 12: 169– 186.
- AICHER S., OHNESORGE D., 2011. Shear strength of glued laminated timber made from European beech timber., *European Journal of Wood and Wood Products.* 69: 143–154
- BERGMAN R., CARL C., CAI Z. 2010. *Wood Handbook, Wood as an Engineering Material.* Madison, Wis.(U. S.): Forest Products Laboratory (U. S.), 508 s.
- BRANDNER R., et al., 2007. Determination of Modulus of Shear and Elasticity of Glued Laminated Timber and related Examinationas. Bled, Slovenia, 14 p.,CIB W18/40–12–2
- BODIG J., JAYNE B. A., 1993. *Mechanics of Wood and Wood Composites.* Malabar: Krieger Publish.Comp., 712 s. ISBN 0–89464–777–6
- BURLUNDU E., et al., 2007. The effects of ply organization and loading direction on bending strength and modulus of elasticity in laminated veneer lumber (LVL) obtained from beech (*Fagus orientalis L.*) and lombardy poplar (*Populus nigra L.*). *Construction and Building Materials* 21.8, 1720–1725.
- EGNER K., KOLB H., 1966. Geleimte Träger und Binder aus Buchenholz. *Bauen mit Holz* (4):147– 25 154
- FRESE, M., BLAß H. J., 2007. Characteristic bending strength of beech glulam. *Materials and structures* 40.1, 3–13s.
- Harrison, K. S., 2006. Comparison of shear modulus test methods. MSc Thesis . Blacksburg, VA, USA
- HORÁČEK, P., 2008. *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva I.* Vyd. 1. V Brně: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 124 s. ISBN 80–715–7347–7
- GANDELOVÁ, L., HORÁČEK, P., ŠLEZINGEROVÁ, J., 2006. *Nauka o dřevě.* 1. vyd. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 176 s. ISBN 80–7157–194–6.
- GEHRI E., 1980. Möglichkeiten des Einsatzes von Buchenholz für Tragkonstruktionen. *Schweizer Bauwirtschaft* 56:17–21
- GEHRI E., 1985. High performance jointing techniques – State of art and development. (In German), *Holz Roh– Werkst* 43:83–88

- GUNTEKIN, E., AYDIN T. Y., AYDIN M., 2016. Elastic constants of oriental beech (*Fagus orientalis*) and sessile oak (*Quercus petraea*)."
- KOLB H., 1968. Biegeversuche und Prüfung des Brandverhaltens an Trägern aus verleimten Buchenschäl furnieren. Holz Roh- Werkst 26:277–283
- KOLEKTIV AUTORŮ, 2016. Zpráva o stavu lesa a lesního hospodářství v ČR 2015. Ministerstvo zemědělství České republiky, Praha 134s.
- KOLLMANN F., CÔTÉ W. A., 1968. Principles of Wood Science and Technology. Vol. 1. Solid Wood. 1. Vyd. Berlin, Heidelberg, New York, Verlag. 592s.
- MATOVIČ, A., 1977. Nauka o dřevě, první. Brno: Ediční středisko VŠZ, ISBN 55–918–77.
- NEČESANÝ, V., 1958. Jádru buku, struktura, vznik a vývoj. SAV, Bratislava 256s.
- OŽYHAR T., JÜSTRICH S., NIEMZ P., 2012. Tensile, compressive and bending properties of European beech wood at high moisture levels. Warsaw University of Life Sciences, 135 s.
- PÖHLER, E., KLINGNER R., KÜNNIGER T., 2005. Beech (*Fagus sylvatica* L.) – Technological properties, adhesion behaviour and colour stability with and without coatings of the red heartwood. 2005. DOI: 10.1051/forest:2005105.
- POUCHANIČ, J., 2011. Porovnání vybraných vlastností bělového dřeva a dřeva nepravého jádra. Brno, Bakalářská práce. Mendelova univerzita.
- POŽGAJ, A., CHOVANEC, D., KURJATKO, S., BABIAK, M., 1993. Štruktúra a vlastnosti dreva. 2. vyd. Bratislava: Príroda, 485 s. ISBN 80–07–00960–4
- ŠLEZINGEROVÁ J., GANDELOVÁ L., 2008. Stavba dřeva, Brno: Ediční středisko MZLU, ISBN 978–80–7157–636–5.

Normy:

- ČSN EN 408 + A1, 2012. Dřevěné konstrukce–Konstrukční dřevo a lepené lamelové dřevo–Stanovení některých fyzikálních a mechanických vlastností, 32 s.
- ČSN 73 2823, 2011. Dřevěné konstrukce – Konstrukční dřevo obdélníkového průřezu tříděné podle pevnosti, 32s.
- ČSN 49 0103, 1979. Drevo. Zisťovanie vlhkosti při fyzikálních a mechanických zkouškách Praha: Vydavatelství Úřadu pro normalizaci a měření, 8 s.
- ČSN EN 350–1, 1996. Trvanlivost dřeva a materiálů na jeho bázi. Přirozená trvanlivost rostlého dřeva. Část 2: Návod na zkoušení a klasifikaci přirozené trvanlivosti dřeva, 20s.

ČSN EN 335, 2013. Trvanlivost dřeva a materiálů na bázi dřeva – Třídy použití: definice, aplikace na rostlé dřevo a na výrobky na bázi dřeva, 20 s.

ČSN EN 338, 2010. Konstrukční dřevo – Třídy pevnosti, 8s.

Internetové zdroje:

<<http://www.msdk.cz/projekty/op-vk-oblast-podpory-1-1-zvysovani-kvality-ve-vzdelavani-o-projektu/zajimavosti-ze-sveta-dreva/drevo/>>

10. Seznam příloh

10.1 Charaktery poškození u vybraných nosníků:



Obr. 41– Porušení lepené spáry u hranolu č. 9



Obr 42– Porušení lepené spáry u hranolu č. 17



Obr. 43– Porušení v lepené spáře u hranolu č. 14



Obr. 44. Porušení v lepené spáře u hranolu č. 19



Obr. 45. Porušení masivního hranolu se dřeni



Obr. 46. Porušení porušení masivního hranolu se dřeni