

Mendelova univerzita v Brně
Lesnická a dřevařská fakulta

Ústav nauky o dřevě

**Analýza mechanického chování konstrukčního masivního a lepeného hranolu
z bukového dřeva**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem práci: Analýza mechanického chování konstrukčního masivního a lepeného hranolu z bukového dřeva zpracoval 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 ve znění pozdějších předpisů a v souladu s platnou Směrnicí o zveřejňování vysokoškolských závěrečných prací.

Jsem si vědom, že se na moji práci vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, a že 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 nákladu spojených se vznikem díla, a to až do jejich skutečné výše.

V Brně, dne:..... podpis studenta

Poděkování:

Rád bych na tomto místě především poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Janu Tippnerovi, Ph.D. a dále bych rád poděkoval konzultantovi Ing. Martinovi Brabcovi za odborné vedení a vstřícný přístup při poskytování cenných rad a poznatků.

A také bych rád poděkoval své rodině a přátelům za podporu během studia.

Autor: Tomáš Musil

Název práce: Analýza mechanického chování konstrukčního masivního a lepeného hranolu z bukového dřeva

Abstrakt

Cílem práce bylo analyzovat vliv vlhkosti a masivní vs. lamelové skladby včetně druhu lepidla na mechanické chování dřevěných nosníků. K výrobě nosníků o rozměrech $100 \times 100 \times 1\,000$ mm bylo použito dřevo buku lesního (*Fagus sylvatica* L.). Polovina z každé skupiny hranolů byla máčena 30 dní ve vodě, druhá polovina byla ponechána bez máčení. Mechanické chování nosníků namáhaných statickým symetrickým 4-bodým ohybovým zatížením bylo analyzováno prostřednictvím napětově-deformačních vztahů, ze kterých byly získány pevnostní a pružnostní charakteristiky jako jsou mez pevnosti, modul pružnosti, průhyb na určité úrovni zatížení. Pokročilá analýza deformačního pole byla provedena metodou korelace digitálního obrazu. Statistické testy k průhybu a relativní poloze neutrální osy neprokázaly statisticky významné rozdíly, analyzované na čtyřech úrovních zatížení. Pouze u mokrých nosníků byly statisticky významné rozdíly vůči ostatním, a to v případě statistických testů při modulu pružnosti a pevnosti. Při porovnávání modulu pružnosti z optiky a příčnicku byly zjištěny statisticky významné rozdíly pouze u skupin Lepený suchý červený a Masiv mokrý.

Klíčová slova: Čtyř-bodá ohybová zkouška, Pevnost, Modul pružnosti, Průhyb, Neutrální osa, Korelace digitálního obrazu (DIC), Buk

Name: Tomáš Musil

Title: The analysis of mechanic behavior of solid and glued squared timber from beech wood

Abstract

The aim of the work was to describe the influence of humidity and behaviour of solid and laminated squared timber including also the type of glue on mechanical behaviour of wooden beams. On production of beams sized $100 \times 100 \times 1\,000 \text{ mm}^3$ was used beech wood (*Fagus sylvatica* L). One half of beams was under water for about 30 days, the other half was left without soaking. The mechanical behaviour of beams, strained by 4-pointed symmetrical bending, was analyzed by using relations between tensions and deformations, from which were gained the characteristics of strength and elasticity which are modulus of elasticity, modulus of rupture the bend on specific level of strain. Advanced analysis of deformation field was accomplished by the method of digital image correlation. The statistical tests for deflection and neutral axis not prove statistically significant results. Only with wet beams were statistically significant results despite others, in case of statistical tests for modulus of elasticity and modulus of rupture. At comparison modulus of elasticity from optics and testing machine were statistically significant results only group Laminated beams dry red and solid beams wet.

Key words: 4 pointed symmetrical bending test, Modulus of rupture, Modulus of elasticity, Deflection, Neutral axis, Digital image correlation (DIC), Beech

Obsah

1	Seznam obrázku grafů a tabulek.....	8
1.1	Seznam tabulek	8
1.2	Seznam obrázků	9
2	Úvod	12
3	Cíl práce.....	13
4	Literární přehled	14
4.1	Mechanické vlastnosti	14
4.1.1	Pevnost dřeva	14
4.1.2	Tuhost dřeva	14
4.2	Faktory ovlivňující pevnost a tuhost dřeva	15
4.2.1	Vlhkost.....	15
4.2.2	Hustota	17
4.2.3	Vady dřeva	18
4.3	Teorie ohybu nosníků.....	18
4.3.1	Ohybové zatížení	18
4.3.2	Jednoduchý ohyb	19
4.3.3	Složité ohyb	20
4.3.4	Lepené nosníky	20
4.4	Literární řešerše.....	21
4.4.1	Poloha neutrální osy u ohýbaných nosníků	21
4.4.1	Modul pružnosti a pevnost u ohýbaných nosníků	22
4.5	Metoda korelace digitálního obrazu (Digital image correlation).....	22
4.5.1	Vývoj metody korelace digitálního obrazu.....	22
4.5.2	Princip metody korelace digitálního obrazu (DIC).....	23
4.6	Ostatní nekontaktní metody pro optické měření deformací	24
4.6.1	Moiré interferometrie.....	24
4.6.2	Metody „Speckle“	25
4.6.3	Fotoelasticimetrie.....	25
5	Materiál a metodika	26
5.1	Suroviny	26
5.1.1	Dřevní surovina.....	26
5.2.1	Lepidla	26
5.2	Příprava zkušebních vzorků	26

5.2.1	Výroba masivních hranolů.....	26
5.2.2	Výroba lepených hranolů.....	26
5.2.4	Máčení a třídění hranolů.....	27
5.3	Stanovení vlhkosti hranolů.....	27
5.2.3	Stanovení hustoty hranolů.....	27
5.4	Mechanické testy.....	28
5.4.1	Zatížení.....	28
5.4.2	Měření deformací.....	29
5.4.3	Kalibrace optického systému a nastavení pozice kamer.....	30
5.4.4	Akvizice dat a přesnost měření.....	31
5.5	Stanovení pevnosti a modulu pružnosti v ohybu.....	31
5.6	Stanovení relativní polohy neutrální osy.....	32
6	Výsledky a diskuze.....	33
6.1	Vybrané fyzikální vlastnosti vzorků.....	33
6.2	Pracovní diagramy.....	34
6.2.1	Pracovní diagramy pro jednotlivé vzorky.....	34
6.2.2	Porovnání pracovních diagramů z optiky a příčnicku.....	37
6.3	Distribuce smykových a axiálních poměrných deformací.....	40
6.4	Pevnost v ohybu a modul pružnosti v ohybu.....	45
6.3.1	Porovnání pevnosti a modulu pružnosti v ohybu s literaturou.....	49
6.3.2	F a T testy pro modul pružnosti z optiky a příčnicku.....	52
6.3.3	Statistické testy pro pevnost a modul pružnosti v ohybu z Optiky.....	54
6.5	Průhyb.....	56
6.5.1	Statistické testy k Průhybu z optiky.....	57
6.6	Relativní polohy neutrální osy.....	61
6.6.1	Statistické testy k relativní poloze neutrální osy.....	62
6.7	Využití v praxi.....	65
7	Závěr.....	66
8	Summary.....	67
9	Seznam literatury.....	68
10	Seznam příloh.....	71
10.1	Zkušební vzorky po provedené zkoušce.....	71

1 Seznam obrázku grafů a tabulek

1.1 Seznam tabulek

Tab. 1– Souhrnná tabulka s vlhkostí a hustotou pro jednotlivé skupiny	33
Tab. 2 – Souhrnná tabulka s pevností v ohybu (MOR) pro jednotlivé skupiny	45
Tab. 3 – Popisná statistika pro pevnost v ohybu (MOR) pro jednotlivé skupiny.....	45
Tab. 4 – Souhrnná tabulka s modulem pružnosti v ohybu (MOE) z optiky pro jednotlivé vzorky	46
Tab. 5 – Popisná statistika pro modul pružnosti v ohybu (MOE) z optiky pro jednotlivé skupiny.....	47
Tab. 6 – Souhrnná tabulka s modulem pružnosti v ohybu (MOE) z příčnicku pro jednotlivé vzorky	47
Tab. 7 – Popisná statistika pro modul pružnosti v ohybu (MOE) z příčnicku pro jednotlivé skupiny.....	47
Tab. 8 – Hodnoty pevnosti v ohybu udávané v literatuře a naměřené v této studii.....	49
Tab. 9 – Hodnoty modulu pružnosti v ohybu uváděné v literatuře a naměřené v této studii.....	51
Tab. 10 – Dvouvýběrový F-test pro rozptyl a T-test s rovností rozptylů, skupina Lepený suchý černý	52
Tab. 11 – Dvouvýběrový F-test pro rozptyl a T-test s rovností rozptylů, skupina Lepený suchý červený	53
Tab. 12– Dvouvýběrový F-test pro rozptyl a T-test s rovností rozptylů, skupina Masiv suchý	53
Tab. 13– Dvouvýběrový F-test pro rozptyl a T-test s rovností rozptylů, skupina Masiv mokrá	54
Tab. 14– Mnohonásobné porovnání středních hodnot MOR (Tuckey-test).....	55
Tab. 15 – Mnohonásobné porovnání středních hodnot MOE (Tuckey-test)	55
Tab. 16 – Mnohonásobné porovnání středních hodnot k průhybu odpovídajícímu 25 % max. zatížení (Tuckey-test).....	57
Tab. 17 – Mnohonásobné porovnání středních hodnot k průhybu odpovídajícímu 50 % max. zatížení (Tuckey-test).....	58
Tab. 18 – Mnohonásobné porovnání středních hodnot k průhybu odpovídajícímu 75 % max. zatížení (Tuckey-test).....	59
Tab. 19 – Mnohonásobné porovnání středních hodnot k průhybu odpovídajícímu 100 % max. zatížení (Tuckey-test).....	60
Tab. 20 – Mnohonásobné srovnání středních hodnot relativní polohy neutrální osy na úrovni 25 % zatížení (Tukey-test)	62

Tab. 21 – Mnohonásobné srovnání středních hodnot relativní polohy neutrální osy na úrovni 50 % zatížení (Tukey-test)	63
Tab. 22 – Mnohonásobné srovnání středních hodnot polohy neutrální osy na úrovni 75 % zatížení (Tukey-test).....	64
Tab. 23 – Mnohonásobné srovnání středních hodnot relativní polohy neutrální osy na úrovni 100 % zatížení (Tukey-test)	65

1.2 Seznam obrázků

Obr. 1: Zatížení dřeva v ohybu kolmo na vlákna v radiálním směru, převzato z Požgaj et al. (1997).....	14
Obr. 2: Znárodnění obecného pracovního diagramu, převzato z Matovič (1993).....	15
Obr. 3: Napět'ově-deformační chování douglasky zatížené v tlaku napříč vláken v radiálním směru,	16
Obr. 4: Vztah meze pevnosti a meze úměrnosti při stlačení rovnoběžně s vlákny a obsahu vlhkosti pro douglasku, převzato z Bodig a Jayne (1982).....	17
Obr. 5: Typický lineární vztah mezi mechanickými vlastnostmi při zatížení v ohybu a obsahem vlhkosti,	17
Obr. 6: Vliv hustoty a vlhkosti dřeva na modul pružnosti při zatížení v tlaku podél vláken,.....	18
Obr. 7: Dřevěný nosník s ortogonálně anizotropní strukturou, převzato z Bodig a Jayne (1982).....	19
Obr. 8: Ohýbaný nosník: (a) deformovaný nosník, (b) výřez deformovaného nosníku, 19	
Obr. 9: Technický nosník podrobený složitému zatížení, převzato z Bodig a Jayne (1993).....	20
Obr. 10: Materiálová reorganizace vrstvením; zvýšení účinnosti od (a) do (g),	20
Obr. 11: Příklady skvrnitých vzorů (patternu), převzato ze Sutton (2009)	23
Obr. 12: Jednoduché znárodnění principu DIC metody, převzato z LaVision.....	24
Obr. 13: Univerzální zkušební stroj LabTest 6.500H.....	29
Obr. 14: Experimentální nastavení 4-bodé ohybové zkoušky s optickým snímáním deformací	29
Obr. 15: Poloha kamer vůči zkušebnímu vzorku.....	30
Obr. 16 - Kalibrační mřížka s roztečí 15 mm použitá při kalibraci	30
Obr. 17: Diagram zatížení-průhyb v oblasti lineárně elastického chování dřeva,.....	32
Obr. 18- Souhrnný pracovní diagram pro skupinu Lepený suchý černý	34
Obr. 19 – Souhrnný pracovní diagram pro skupinu Lepený suchý červený.....	34

Obr. 20 – Souhrnný pracovní diagram skupinu pro Masiv suchý	35
Obr. 21 – Souhrnný pracovní diagram pro skupinu Masiv mokrý	36
Obr. 22 – Pracovní diagram průměrných křivek jednotlivých skupin.....	36
Obr. 23– Průměrný pracovní diagram z optiky a příčnicku pro skupinu Lepený suchý černý s kvantifikovaným rozdílem průhybů	37
Obr. 24– Průměrný pracovní diagram z optiky a příčnicku pro skupinu Lepený suchý červený s kvantifikovaným rozdílem průhybů	38
Obr. 25– Průměrný pracovní diagram z optiky a příčnicku pro skupinu Masiv suchý s kvantifikovaným rozdílem průhybů	38
Obr. 26– Průměrný pracovní diagram z optiky a příčnicku pro skupinu Masiv mokrý s kvantifikovaným rozdílem průhybů	39
Obr. 27 - Distribuce normálových poměrných deformací ve směru podélné osy nosníku (ϵ_{xx}) a smykových poměrných deformací (ϵ_{xy}) po výšce nosníku (h) pro skupinu Lepený suchý – černý	40
Obr. 28 - Distribuce normálových poměrných deformací ve směru podélné osy nosníku (ϵ_{xx}) a smykových poměrných deformací (ϵ_{xy}) po výšce nosníku (h) pro skupinu Lepený suchý – červený	41
Obr. 29 - Distribuce normálových poměrných deformací ve směru podélné osy nosníku (ϵ_{xx}) a smykových poměrných deformací (ϵ_{xy}) po výšce nosníku (h) pro skupinu Masiv suchý	42
Obr. 30 - Distribuce normálových poměrných deformací ve směru podélné osy nosníku (ϵ_{xx}) a smykových poměrných deformací (ϵ_{xy}) po výšce nosníku (h) pro skupinu Masiv mokrý.....	43
Obr. 31– Krabicový graf pro pevnost v ohybu (MOR) pro jednotlivé skupiny vzorků .	46
Obr. 32– Krabicový graf pro modul pružnosti v ohybu (MOE) z optiky pro jednotlivé skupiny vzorků.....	48
Obr. 33 – Graf testu rozptylu ANOVA – MOR	54
Obr. 34–Graf testu rozptylu ANOVA – MOE.....	55
Obr. 35 – Krabicový graf průhybu pro jednotlivé skupiny vzorků	56
Obr. 36– Graf testu rozptylu ANOVA k průhybu odpovídajícímu 25 % max. zatížení	57
Obr. 37–Graf testu rozptylu ANOVA – 50 % úroveň zatížení k průhybu	58
Obr. 38– Graf testu rozptylu ANOVA – 75 % úroveň zatížení k průhybu	59
Obr. 39– Graf testu rozptylu ANOVA – 100 % úroveň zatížení k průhybu	60
Obr. 40– Krabicový graf relativní polohy neutrální osy pro jednotlivé skupiny vzorků 61	

Obr. 41– Graf testu rozptylu ANOVA k relativní poloze neutrální osy na úrovni 25 % maximálního zatížení	62
Obr. 42– Graf testu rozptylu ANOVA k relativní poloze neutrální osy na úrovni 50 % maximálního zatížení	63
Obr. 43– Graf testu rozptylu ANOVA k relativní poloze neutrální osy na úrovni 75 % maximálního zatížení	64
Obr. 44– Graf testu rozptylu ANOVA k relativní poloze neutrální osy na úrovni 100 % maximálního zatížení	65
Obr. 45- Vzorek č.1 ze skupiny Lepený suchý černý, po zkoušce	71
Obr. 46- Vzorek č.2 ze skupiny Lepený suchý černý, po zkoušce	71
Obr. 47- Vzorek č.3 ze skupiny Lepený suchý černý, po zkoušce	71
Obr. 48- Vzorek č.4 ze skupiny Lepený suchý černý, po zkoušce	72
Obr. 49 - Vzorek č.5 ze skupiny Lepený suchý černý, po zkoušce	72
Obr. 50 - Vzorek č.1 ze skupiny Lepený suchý červený, po zkoušce	72
Obr. 51 - Vzorek č.2 ze skupiny Lepený suchý červený, po zkoušce	73
Obr. 52 - Vzorek č.3 ze skupiny Lepený suchý červený, po zkoušce	73
Obr. 53 - Vzorek č.4 ze skupiny Lepený suchý červený, po zkoušce	73
Obr. 54 - Vzorek č.5 ze skupiny Lepený suchý červený, po zkoušce	74
Obr. 55 - Vzorek č.1 ze skupiny Masiv suchý, po zkoušce	74
Obr. 56 - Vzorek č.2 ze skupiny Masiv suchý, po zkoušce	74
Obr. 57 - Vzorek č.3 ze skupiny Masiv suchý, po zkoušce	75
Obr. 58 - Vzorek č.4 ze skupiny Masiv suchý, po zkoušce	75
Obr. 59 - Vzorek č.5 ze skupiny Masiv suchý, po zkoušce	75
Obr. 60 - Vzorek č.1 ze skupiny Masiv mokrý, po zkoušce	76
Obr. 61 - Vzorek č.2 ze skupiny Masiv mokrý, po zkoušce	76
Obr. 62 - Vzorek č.3 ze skupiny Masiv mokrý, po zkoušce	76
Obr. 63 - Vzorek č.4 ze skupiny Masiv mokrý, po zkoušce	77
Obr. 64 - Vzorek č.5 ze skupiny Masiv mokrý, po zkoušce	77

2 Úvod

Dřevěné prvky, jako jsou nosníky či sloupy se ve stavebnictví využívají od nepaměti. Dřevěné nosníky se využívají například při konstrukci krovu nebo také ve stropní konstrukci jako hlavní nosné trámy. Oproti betonovým prvkům se dřevěné vyznačují poměrně nižší hmotností se srovnatelnými mechanickými vlastnostmi. Dále se u betonové konstrukce musí využívat kombinace s ocelí, jelikož tvoří část nosné konstrukce. Jednou z největších výhod je, že u výroby dřevěných konstrukcí odpadají technologické přestávky na tzv. vytvrnutí betonu a celkové zrání betonu, které se pohybují okolo 28 dní. V neposlední řadě dřevěné konstrukce vypadají esteticky více přijatelně než beton, který se ve většině případů právě z estetických důvodů dodatečně obkládá.

Za hlavní důvod pro výrobu lepených nosníků, jako náhrady za masivní nosníky, lze považovat zvýšení tuhosti a celkové pevnosti nosníku oproti masivu, čehož se dosahuje vymanipulováním většiny vad při výrobě lamel a dodržováním principu symetrie vrstvených materiálů při lepení lamel. V této práci byly testovány nosníky z buku lesního (*Fagus sylvatica* L.). Podle posledních klimatických prognóz má tato dřevina vysoký potenciál stát se významným materiálem ve stavebnictví, kde doposud dominuje dřevo smrku ztepilého (*Picea abies*, L. Karst). Obecně buk patří mezi dřeviny s velice dobrými mechanickými vlastnostmi.

Tyto skutečnosti byly impulsem pro zpracování této bakalářské práce zabývající se analýzou mechanických vlastností konstrukčního masivního a lepeného bukového dřeva. Experimentálně byly zjišťovány především tuhost a pevnost nosníků ve 4-bodém ohybu v závislosti na faktorech, jako jsou vlhkost a kvalita lepení. Testování probíhalo dle předepsaných postupů v ČSN EN 408 + A1 (2012). Analýza deformací byla prováděna pomocí plno-polní optické metody využívající princip korelace digitálního obrazu. Tato metoda poskytuje ve srovnání s konvenčními metodami měření deformací (příčnick, externí tenzometry) přesnější výsledky a umožňuje detailnější a komplexnější analýzu deformačního pole, což je vzhledem k jeho velké heterogenitě velmi přínosné.

3 Cíl práce

Cílem této bakalářské práce je analyzovat vliv vlhkosti a skladby dřevěných nosníků (masiv vs. lamely) na jejich mechanické chování při zatížení ve statickém 4-bodém ohybu. Za účelem naplnit cíl práce byly vytyčeny tyto dílčí úkoly:

- 1) Porovnat napět'ově-deformační chování jednotlivých skupin nosníků prostřednictvím statistického zhodnocení podobnosti pevnostních a pružnostních charakteristik získaných na základě pracovních diagramů.
- 2) Analyzovat distribuci a velikost deformací na povrchu nosníků během zatížení pomocí plno-polní optické metody využívající princip korelace digitálního obrazu (DIC).

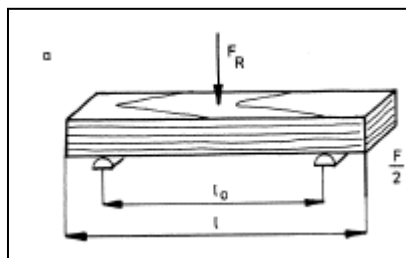
4 Literární přehled

4.1 Mechanické vlastnosti

Dřevo patří mezi materiály, které mají své nenahraditelné vlastnosti, což ho zařazuje mezi materiál široce se uplatňující v praxi. Z pohledu mechanických vlastností dřevo vyniká především svým nízkým poměrem hmotnosti k pevnosti a dobrou tuhostí (Požgaj et al. 1993). Tyto mechanické charakteristiky předurčují hlavní využití dřeva pro konstrukční účely.

4.1.1 Pevnost dřeva

Požgaj et al. (1993) definuje pevnost dřeva jako odpor nebo odolnost dřeva proti jeho trvalému porušení. Číselně se pevnost vyjadřuje vnitřním napětím, při kterém se poruší soudržnost dřeva. Podle způsobu zatížení lze pevnost dřeva rozdělit na 5 základních typů, a to pevnost v tahu, pevnost v tlaku, pevnost v krutu, pevnost ve smyku a v neposlední řadě pevnost v ohybu, která je zkoumána v téhle práci, přičemž ohybové zatížení bylo aplikováno kolmo na vlákna (Obr. 1).



Obr. 1: Zatížení dřeva v ohybu kolmo na vlákna v radiálním směru, převzato z Požgaj et al. (1997)

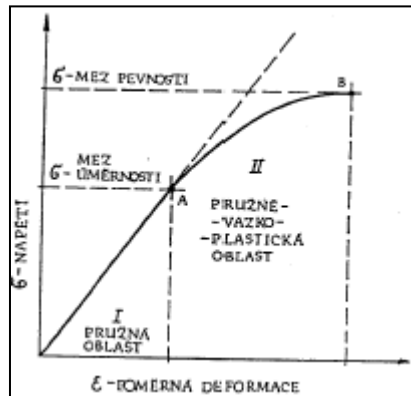
Pevnost dřeva v ohybu má široké uplatnění v praxi (např. trámy, lamelové prvky anebo nosníky). Podle Požgaj et al. (1997) lze obecně pro pevnost domácích dřev v ohybu kolmo na vlákna uvažovat s hodnotami 50 až 130 MPa při vlhkosti 12 %. Variabilita se pohybuje mezi 10 až 17 %.

4.1.2 Tuhost dřeva

Tuhost dřeva vyjadřuje odpor proti deformaci při působení vnějších sil (Požgaj et al. (1997). Dřevo je z pohledu deformovatelnosti elasticko-visko-plastický materiál, kdy při zatížení dřeva vnějšími silami postupně vznikají deformace pružné (elastické), pružné v čase (viskózní) a nepružné (plastické), které zůstávají i po odtížení. Pro kvantifikaci tuhosti dřeva se používá charakteristika označovaná jako modul pružnosti (Lexa et al. 1952). Ve vztahu mezi vnitřním napětím materiálu a jeho deformací vystupuje modul pružnosti jako materiálová konstanta úměrnosti. V oblasti elastických deformací tento vztah popsal v roce 1660 anglický vědec Robert Hooke, podle kterého je nazýván jako Hookeův zákon.

Elastický modul pružnosti se stanovuje na základě sklonu lineární části pracovního diagramu (Obr. 2), tj. závislosti mezi napětím a deformací, který se získává záznamem síly a odpovídajícího posunutí během experimentálních zkoušek (Matovič 1993). U

dřeva se stanovují elastické moduly pružnosti, stejně jako meze pevnosti, pro různá zatížení (tah, tlak, ohyb, smyk a krut). Požgaj et al. (1993) uvádí hodnoty modulu pružnosti dřeva v ohybu kolmo na vlákna pro domácí dřeviny v intervalu 7 000 – 15 000 MPa při 12 % vlhkosti dřeva.



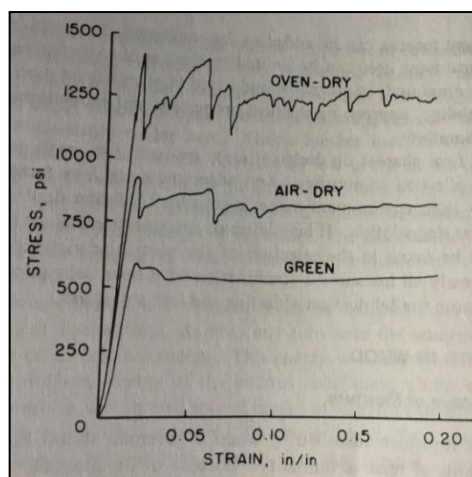
Obr. 2: Znázornění obecného pracovního diagramu, převzato z Matovič (1993)

4.2 Faktory ovlivňující pevnost a tuhost dřeva

Mechanické vlastnosti dřeva a kompozitních materiálů na bázi dřeva závisí mimo jiné na množství vody absorbované v materiálu, teplotě materiálu, hustotě materiálu, struktuře materiálu na všech měřítcích pozorování od různých anatomických elementů dřeva až po druhovou a strukturní skladbu kompozitních materiálů na bázi dřeva, množství a charakteru přirozených i během zpracování vzniklých imperfekcí, chemickém složení atd. V této práci byl analyzován vliv třech vybraných faktorů, a to množství vody ve struktuře, hustoty a strukturní skladby včetně druhu lepidla na mechanické charakteristiky nosníků na bázi dřeva.

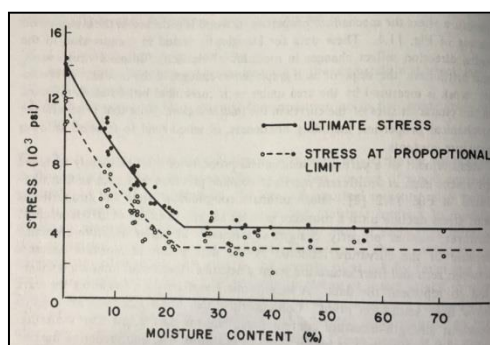
4.2.1 Vlhkost

Dle Horáčka (2008) se vody přítomná ve dřevě označuje jako vlhkost. Dle Bodig a Jane (1993) se množství vlhkosti absorbované do dřeva (rovnovážná vlhkost dřeva) řídí téměř výhradně relativní vlhkostí okolního prostředí, avšak v menším měřítku také teplotou okolního prostředí. Bodig a Jayne (1993) uvádí, že vlhkost má zásadní vliv téměř na všechny fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva. Vliv vlhkosti na napěťově-deformační chování dřeva při tlakovém zatížení napříč vláken v radiálním směru lze pozorovat na Obr. 3, kde jsou jasně patrné změny v pevnosti a v menší míře i v modulu pružnosti při rozdílných vlhkostech.



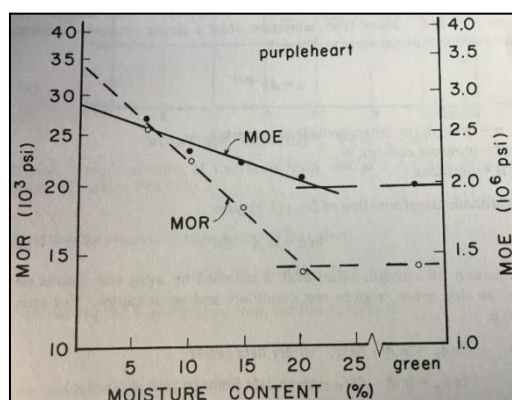
Obr. 3: Napět'ově-deformační chování douglasky zatížené v tlaku napříč vláken v radiálním směru, převzato z Bodig a Jayne (1993)

Za účelem kvantifikace míry vlivu obsahu vlhkosti ve dřevě na jeho mechanické vlastnosti je nutné provést pro každý druh zatížení sérii mechanických zkoušek na dostatečném počtu zkušebních těles s různým obsahem vlhkosti (Wakefield 1957). Následně se provede vynesení hodnot mechanických vlastností v závislosti na obsahu vlhkosti, kterými se proloží křivka nejlépe aproximující měřené body. Obr. 4 znázorňuje tuto analýzu pro zatížení tlakem podél vláken pro douglasku. Z grafu je patrné, že mez pevnosti i mez úměrnosti výrazně klesají do zhruba 25 % a pak jsou konstantní, což je způsobeno dosažením meze hygroscopicity. Tuto skutečnost potvrzuje také Gandelová et al. (2008), která uvádí, že se stoupající vlhkostí do meze hygroscopicity se pevnostní a pružnostní vlastnosti dřeva v tlaku podél vláken snižují. Bodig a Jayne (1993) upozorňuje, že pokles mechanických vlastností dlouhou exponenciální křivkou není v žádném případě univerzální vztah pro všechny způsoby zatížení. Některé mechanické vlastnosti, zejména pevnost, může dosáhnout maximální hodnoty asi při 5 % obsahu vlhkosti a poklesu na nižších úrovních vlhkosti. Někteří výzkumníci věří, že pokles pevnosti v obsahu vlhkosti nižší než 5 %, může být v důsledku mikro poruch v buňce, které se vyskytují v průběhu sušení. Křivky, které jsou uvedeny na Obr. 4, je možné použít pro širokou škálu druhů dřeva, nicméně se považují za orientační.



Obr. 4: Vztah meze pevnosti a meze úměrnosti při stlačení rovnoběžně s vlákny a obsahu vlhkosti pro douglasku, převzato z Bodig a Jayne (1982)

Exponenciální vztah mezi mechanickými vlastnostmi a obsahem vlhkosti se pro většinu způsobů zatížení obvykle aproximuje na vztah lineární (Obr. 5).

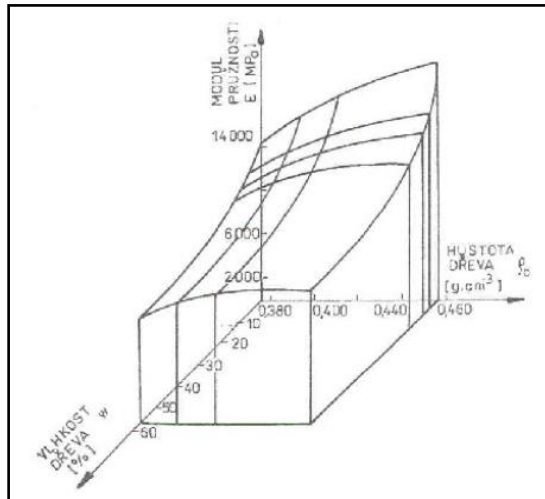


Obr. 5: Typický lineární vztah mezi mechanickými vlastnostmi při zatížení v ohybu a obsahem vlhkosti, převzato z Wangaard (1957)

4.2.2 Hustota

Dle Gandelová et al. (2008) se hustotou rozumí podíl hmotnosti dřeva a jeho objemu. S rostoucí hustotou se obecně zvyšuje pevnost a pružnost dřeva, ale korelace nemusí být vždy významná. Požgaj et al. (1997) uvádí, že vliv hustoty se nejvíce projeví u suchého dřeva naopak při vysoké vlhkosti nad mez hygroskopicity není tak výrazný. Dále tento autor uvádí, že modul pružnosti závisí nejenom na počtu vazeb, tj. hustotě, ale také na tuhosti jednotlivých druhů vazeb, tj. na chemickém složení. Existují však mechanické charakteristiky, u kterých je naopak typická velká těsnost korelace s hustotou jako např. pro modul pružnosti při zatížení napříč vlákny, kdy při zvýšení hustoty dřeva o $0,1 \text{ g/cm}^3$ se zvýší modul pružnosti zhruba o 1 až 9 %.

Současný vliv obsahu vlhkosti a hustoty na modul pružnosti při zatížení v tlaku podél vláken znázorňuje Obr. 6.



Obr. 6: Vliv hustoty a vlhkosti dřeva na modul pružnosti při zatížení v tlaku podél vláken, převzato z Požgaj et al. (1993)

4.2.3 Vady dřeva

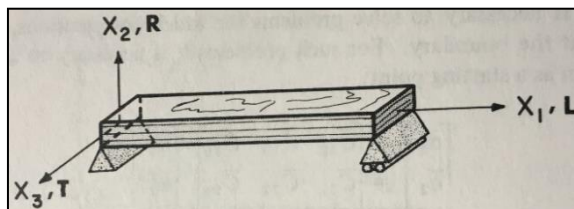
Obecně lze tvrdit, že jakékoliv vady dřeva způsobující necelistvost, jako jsou například suky, trhliny nebo hniloba snižují mechanické vlastnosti dřeva. Obdobný vliv může mít také vyžralé dřevo. V případě zatížení ohybem je vliv necelistvosti odvislý také od její pozice v rámci zkušebního tělesa. Rostoucí vliv necelistvosti lze očekávat se vzdalováním pozice necelistvosti od neutrální roviny, což je spojeno s nárůstem normálového napětí. Nosníky na bázi dřeva testované v této práci obsahovaly především výsušné trhliny a nepravé jádro v různých formách, které narušovaly celistvost nosníku.

4.3 Teorie ohybu nosníků

4.3.1 Ohybové zatížení

Vzhledem ke spolehlivosti a jednoduchosti testu patří ohybový test k jedné z nejpoužívanějších mechanických zkoušek materiálů na bázi dřeva (Bodig a Jayne 1993). Požgaj et al. (1993) uvádí, že v závislosti na způsobu navození ohybového momentu může být v nosníku indukováno pouze normálové napětí (jednoduchý ohyb), nebo normálové napětí společně s tangenciálním napětím (složitý ohyb). Jednoduchý ohyb je specifickým případem ohybu, který v praxi téměř nenachází uplatnění s výjimkou stanovení ohybových charakteristik nosníků na bázi dřeva, kdy je cíleně více či méně úspěšně simulován např. pomocí 4-bodého ohybu. Naopak složitý ohyb je běžně se vyskytující případ v technické praxi nosníků, nejčastěji ve formě 3-bodého ohybu. Proto Bodig a Jayne (1993) charakterizují analytický výpočet průhybu technického nosníku při definovaném zatížení jako trojrozměrnou složitější úlohu s tahovým, tlakovým a smykovým napětím. Vzhledem k této skutečnosti je analýza experimentálních dat z ohybových testů ve srovnání s ostatními mechanickými testy složitější. Selhání nosníků na bázi dřeva při ohybovém zatížení je obvykle způsobeno, nezávisle na způsobu navození ohybového momentu, porušením nosníku na vnější straně ohybu.

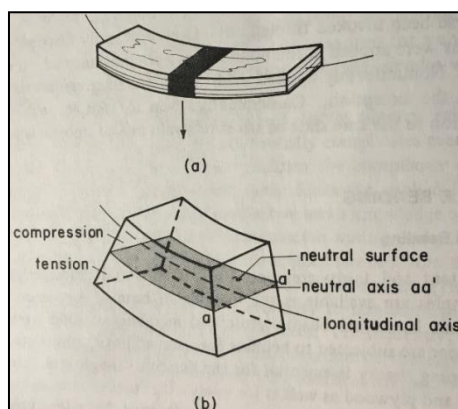
Teorie ohybu se uplatňuje při navrhování jednoduchých konstrukcí na bázi dřeva, ale také v rámci dimenzování složitých soustav dřevěných prvků. Bodig a Jayne (1993) zakládají teorii ohybu nosníku na představě dlouhého hranolu, který se skládá z nekonečného počtu tenkých vláken orientovaných rovnoběžně s délkou prvku vytvářejících ortogonálně anizotropní strukturu (Obr. 7). V rámci této struktury lze rozlišit tři základní směry, tj. podélný, radiální a tangenciální.



Obr. 7: Dřevěný nosník s ortogonálně anizotropní strukturou, převzato z Bodig a Jayne (1982)

4.3.2 Jednoduchý ohyb

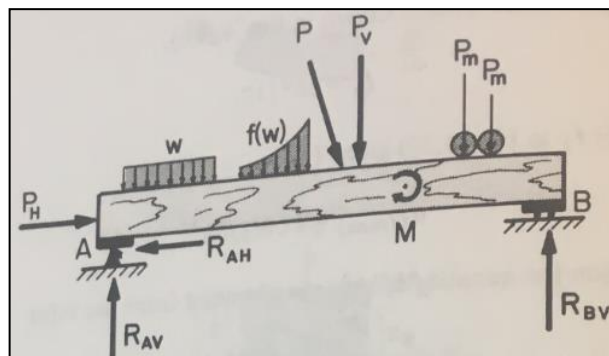
Jednoduchý ohyb nosníku, též označovaný jako čistý ohyb, lze navodit pomocí dvou stejně velkých, ale opačných ohybových momentů současně působících na obou koncích nosníku (Bodig a Jayne 1993). Výsledkem je konstantní ohybový moment po celé délce nosníku, který indukuje v příčném průřezu pouze tahové a tlakové normálové napětí s gradientní distribucí po výšce nosníku. Vrstva s nekonečně malou tloušťkou oddělující tahové a tlakové napětí je označována jako “neutral surface“ s českým ekvivalentem neutrální rovina. Na Obr. 8 znázorňující část výřezu nosníku ohýbaného čistým ohybem lze pozorovat, že vlákna nacházející se nad neutrální rovinou (vnitřní strana ohybu) jsou namáhána tlakem, a naopak vlákna nacházející se pod neutrální rovinou (vnější strana ohybu) jsou namáhána tahem, přičemž velikost normálového napětí se do meze úměrnosti dřeva lineárně zvětšuje s rostoucí vzdáleností od neutrální osy. Z toho vyplývá, že vlákna ležící v neutrální rovině nejsou namáhána žádným normálovým ani jiným napětím (Bodig a Jayne 1993).



Obr. 8: Ohýbaný nosník: (a) deformovaný nosník, (b) výřez deformovaného nosníku, převzato z Bodig a Jayne (1993)

4.3.3 Složitý ohyb

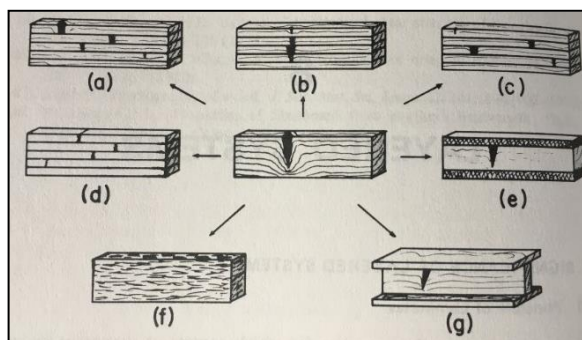
Složitý ohyb nosníku je charakteristický nenulovým gradientem ohybového momentu po délce nosníku, který indukuje kromě normálových napětí také napětí tangenciální (smykové). Zatímco normálové napětí je indukováno vždy po celé délce ohybu, smykové napětí může být v závislosti na typu, rozmístění a orientaci zatěžujících sil navozujících složitý ohyb distribuováno pouze po části délky nosníku. V místech, kde je indukováno normálové napětí společně se smykovým, je po průřezu nosníku exponenciálně distribuováno ještě smykové napětí, které dosahuje maximální hodnoty v neutrální rovině. Z toho plyne, že neutrální rovina je sice prostá normálového napětí, avšak současně je vrstvou s maximálním tangenciálním napětím. Příklad složitěho ohybu, kdy je nosník podroben ohybovému momentu, jež se mění podél délky nosníku, je zobrazen na Obr. 9. Podpora A umožňuje rotaci v rovině obrázku vedoucí k rozvoji vertikálních a horizontálních sil R_{AV} a R_{AH} , zatímco podpora B se může pohybovat pouze ve vertikálním směru a vyvolává pouze vertikální sílu R_{BV} (Bodig a Jayne 1993).



Obr. 9: Technický nosník podrobený složitěmu zatížení, převzato z Bodig a Jayne (1993)

4.3.4 Lepené nosníky

Bodig a Jayne (1993) uvádí, že lamelové nosníky patří do třídy kompozitů, u nichž jsou vlastnosti optimalizovány již řadu let s cílem dosáhnout maximálního využití i méně kvalitní suroviny při minimalizaci nákladů na výrobu. Princip dvojnásobného optimalizačního kritéria umožňuje stále širší uplatnění v technické praxi. Základní principy zhodnocení méně kvalitní vstupní suroviny vrstvením znázorňuje Obr. 10.



Obr. 10: Materiálová reorganizace vrstvením; zvýšení účinnosti od (a) do (g),
převzato z Bodig a Jayne (1993)

Uprostřed se nachází hranol s vadou. Rozřezáním hranolu na lamely a následným splením v rozdílném pořadí, jak je tomu u (a) až (d) nebo také splením do nejefektivnějšího uspořádání, tzv. kosmického nosníku (g), lze v porovnání s původním masivním hranolem s vadou zvýšit tuhost a pevnost nosníku (Bodig a Jayne 1993).

4.4 Literární rešerše

4.4.1 Poloha neutrální osy u ohýbaných nosníků

U masivních dřevěných nosníků analyzovali polohu neutrální osy např. Betts et al. (2010) a Davis et al. (2012), zatímco u kompozitních nosníků na bázi dřeva (OSB, DVD a MDF) např. Niemz et al. (2009). Ohyb nosníků byl ve všech případech navozen pomocí 4-bodého zatížení. Polohu neutrální osy autoři určovali v zóně čistého ohybu, tj. mezi dvěma zatěžovacími trny, kde je deformační pole oproštěno od smykové deformace. Betts et al. (2010) a Davis et al. (2012) získali plno-polní deformační data pomocí optické metody měření deformací založené na principu DIC, zatímco Niemz et al. (2007) ke stejnému účelu použil metodu Moiré.

Betts et al. (2010) hledal neutrální osu u malých nosníků s příčným průřezem $25 \times 25 \text{ mm}^2$, přičemž část z nich neobsahovala žádné vady a část z nich obsahovala suk. Cílem zkoušky bylo zjistit, jak přítomnost suku v nosníku ovlivní polohu neutrální osy. Z výsledků je patrné, že suk vždy lokálně odchýlil neutrální osu na opačnou stranu, tzn., že suk nacházející se v tlakově namáhané části nosníku lokálně rozšířil tlakovou zónu vychýlením neutrální osy do původně tahové oblasti, kdežto suk nacházející se v tahové oblasti způsobil opačné změny. U suku situovaného v místě původní neutrální osy (v blízkosti středu výšky nosníku) bylo prokázáno, že směr lokálního vychýlení neutrální osy je v tomto případě dán umístěním (tlaková nebo tahová zóna) většinové části suku, avšak tahová tuhost je náchylnější na odklon vláken.

Davis et al. (2012) rozšířil výzkum vlivu přítomnosti suků na polohu neutrální osy testováním nosníků s větším příčným průřezem ($38 \times 89 \text{ mm}^2$), které obsahovaly větší počet suků. Cílem výzkumu bylo analyzovat vliv různého uspořádání suků v nosníku na pozici neutrální osy. Podařilo se prokázat, že se zmenšující se vzdáleností mezi sukly ve směru délky ohýbaného nosníku se lokální charakter výchylky pozice neutrální osy mění na globální. Pozice neutrální osy v takovém případě nevykazuje lokální výchylky, ale je celkově posunuta směrem k vnitřní nebo vnější straně ohybu. Dále bylo zjištěno, že s rostoucí vzdáleností suku od středu tloušťky nosníku se výchylka pozice neutrální osy snižuje a má spíše globální charakter.

U bezvadých nosníků pozoroval Betts et al. (2010) neutrální osu posunutou mírně mimo střed výšky nosníku směrem k vnější straně ohybu, zatímco Davis et al. (2012) publikoval polohu neutrální osy u bezvadých nosníků naopak blíže k vnitřní straně ohybu. Oba tyto závěry potvrzují poznatky uvedené v publikaci Kollmann a Côté (1968), kde je uvedena poloha neutrální osy pro malé bezvadé nosníky ve výšce 44 % výšky nosníku směrem od vnější strany ohybu. Podle Niemz et al. (2009) nelze tyto poznatky přenést i na kompozitní nosníky na bázi dřeva jako jsou dřevotřískové či dřevovláknité desky, u kterých se neutrální osa nachází přesně uprostřed výšky nosníku.

4.4.1 Modul pružnosti a pevnost u ohýbaných nosníků

Stanovením modulu pružnosti a pevnosti ve 4-bodém ohybu masivního dřeva evropského buku se zabývali např. Obataya et al. (2007) nebo Ožyhar et al. (2012). Cílem výzkumů bylo analyzovat modul pružnosti a pevnost v závislosti na vlhkosti, popřípadě porovnat hodnoty pro buk s hodnotami pro jiné dřeviny.

Ožyhar et al. (2012) prováděl tahové, tlakové a ohybové zkoušky na dřevu buku. Cílem zkoušek bylo analyzovat vliv vysoké vlhkosti na pevnostní a pružnostní vlastnosti buku. Experiment probíhal na nosnících $400 \times 20 \times 20 \text{ mm}^3$. Z výsledků lze pozorovat, že se zvyšující se vlhkostí nosníku klesají zjišťované vlastnosti. Pro nosníky s 13% vlhkostí byl naměřen modul pružnosti 12 400 MPa a pevnost 91,8 MPa, zatímco u nosníku s 36% vlhkostí byl naměřen modul pružnosti 9 970 MPa a pevnost pouze 58,6 MPa.

Obataya et al. (2007) analyzoval rozdíly mezi pružnostními vlastnostmi bambusu a buku. Zkouška probíhala na malých nosnících $240 \times 8 \times 8 \text{ mm}^3$. Z výsledků zkoušek je patrné, že u bambusu docházelo k vyšší deformaci, jelikož jeho vnější vrstva je schopná přenášet větší tahové napětí v porovnání s bukem, zatímco pórovitější vnitřní struktura vykazuje velkou deformovatelnost bez celkového porušení. Toto chování bambusu se odráží ve vyšších modulech pružnosti v ohybu (16 200 MPa) ve srovnání s bukem (12 600 MPa).

Pevnostní a pružnostní vlastnosti ve 4-bodém ohybu u lepených nosníků analyzoval např. Frese a Blaß (2007). Pro zkoušku byly použity 8-vrstvé bukové lepené nosníky s rozměry $40 \times 115 \times 5 100 \text{ mm}^3$ a 14-vrstvé bukové lepené nosníky s rozměry $43 \times 115 \times 5 100 \text{ mm}^3$. Ohyb byl prováděn dle normy EN 408 (1996). Z výsledků je patrné, že počet lamel v nosníku se nějak výrazně nepodepsal na výsledné pevnosti a pružnosti nosníku. Pevnost 8-vrstvého nosníku byla přibližně o 14 % vyšší než pevnost 14-vrstvého nosníku, zatímco modul pružnosti byl pro oba typy nosníků totožný.

Papadopoulos (2008) pojednává o účinku acetylace na pevnost v ohybu masivního a lepeného bukového dřeva. Pro zkoušku byly použity vzorky s rozměry $20 \times 20 \times 360 \text{ mm}^3$. Nosníky byly vyrobeny a testovány dle EN 385 (2001) s následnou impregnací a vysušením. Pevnost neupraveného masivního dřeva dosahovala 104,32 MPa a modul pružnosti 10 850 MPa, zatímco pevnost neupravených lepených hranolů byla 59,12 MPa a modul pružnosti 9860 MPa. Po acetylaci se pevnost lepených hranolů snížila na 34,52 MPa a modul pružnosti na 6045 MPa.

4.5 Metoda korelace digitálního obrazu (Digital image correlation)

4.5.1 Vývoj metody korelace digitálního obrazu

Počátky měření změny tvaru a rozměrů pozorovaných objektů, které je založeno na práci s obrazy těchto objektů, spadají do oboru fotogrammetrie (Doyle 1964). Poznatky o perspektivě a snímání se datují do spisů Leonarda da Vinciho z roku 1480 a jeho dalších studií publikovaných v roce 1492. Klíčový rozvoj ovšem nastal až o 3 století později, kdy Heinrich Lambert definoval základní matematické vztahy popisující perspektivu a snímání (Sutton 2009).

Samotná metoda korelace digitálního obrazu (DIC) je do značné míry spjata s rozvojem techniky pro digitalizaci obrazu. Prvky této metody se objevily v práci Gilberta Hobroughta z roku 1950, který srovnával podobnost objektů na fotografiích z různých

pohledů (Hobrough 1970). V roce 1961 Houbrough navrhl a sestrojil stroj pro korelaci s vysokou přesností u fotografií s vysokým rozlišením za účelem přesnějšího měření v nestálých podmínkách (Hobrough, 1970). Praktické využití metody umožnil až cenově dostupný výpočetní výkon v podobě osobního počítače. Na úspěšném vývoji této metody se podílela především skupina vědců z Univerzity v Jižní Karolině (USA). Peters a Ranson (1981) veřejně publikovali první použití současné podoby DIC metody pro 2D aplikaci, kdy dokázali měřit posunutí a deformace rovinného povrchu zkušební tělesa ve dvou prostorových osách (x a y) při zatížení v tahu. Nicméně technika, kterou Peters a Ranson (1981) použili, nebyla ještě aplikovatelná pro většinu případů, kdy dochází vlivem zatížení k pohybu bodů na snímaném povrchu objektu i ve třetí prostorové ose (z). Jak uvádí Sutton (2008) nejtěžším úkolem při rozšíření DIC na 3D aplikace bylo vyvinout způsob kalibrace minimálně dvou snímacích jednotek takovým způsobem, aby byly schopny pracovat ve stereoskopickém zapojení, a tak zachytit i pohyb bodů v ose z . Jako první se podařilo stereo systém zkalibrovat McNeill et al. (1988) pro rekonstrukci snímané plochy objektu ve všech třech prostorových osách (x ; y ; z).

Vývoj metody DIC je v oblasti numerických výpočtů a programování spjatý s aplikací nově vyvinutých korelačních algoritmů pro celo-pixelové i sub-pixelové posunutí. V rámci technického pokroku se namísto laseru začalo používat bílé difúzně rozptýlené světlo. V oblasti akvizice experimentálních dat se přešlo od analogových záznamových zařízení k digitálním vysokorychlostním kamerám s vysokým rozlišením (Rastogi 2000). Obecně pokrok ve vědě a technice minimalizuje výpočetní náročnost metody DIC a zvyšuje přesnost výsledků, což umožňuje stále širší rozsah aplikací, např. aplikace v reálném čase – kontrola a řízení výroby (Sutton 2008).

4.5.2 Princip metody korelace digitálního obrazu (DIC)

Obecně lze korelaci digitálního obrazu definovat jako nekontaktní (optickou) metodu měření posunutí a deformací objektů na základě sledování pohybu bodů na jejich povrchu opatřeném tzv. „speckle pattern“ neboli skvrnitým vzorem (Obr. 11). Skvrnitý vzor musí mít nerepetitivní a isotropní strukturu s vysokým kontrastem.



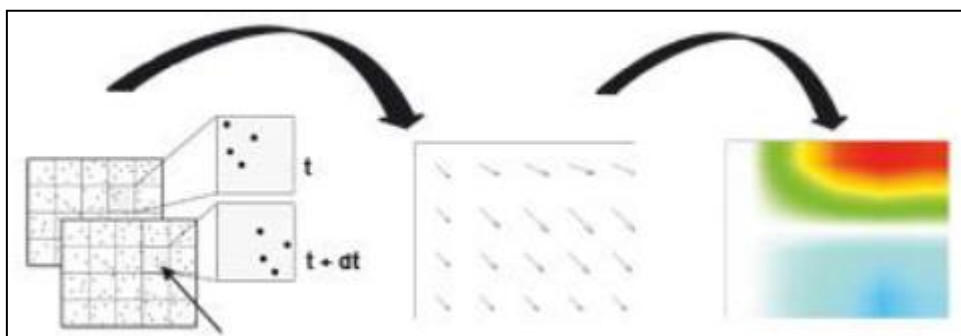
Obr. 11: Příklady skvrnitých vzorů (patternu), převzato ze Sutton (2009)

Při sledování pohybu bodů na povrchu objektu se podle Sharpe (2008) uplatňují dva základní předpoklady. První z nich předpokládá přímou shodu neboli souvislost mezi pohyby bodů na obrazu povrchu objektu a pohyby reálných bodů na objektu. Pokud bude tento předpoklad platit, tak se pohyby bodů na obraze mohou použít k určení posunu bodů na objektu. Druhý předpoklad považuje sledovaný objekt za kontinuum,

tzn., těleso se souvisle se spojitě se měnícími vlastnostmi. Nesplnění tohoto předpokladu v podobě trhlin nebo jiných necelistvostí objektu může vést k výpočtu tzv. falešných deformací.

Základní princip metody korelace obrazu spočívá v párování jednotlivých bodů (pixelů) na dvou digitálních obrazech. Jedním obrazem je vždy referenční snímek, tj. snímek nedeformovaného povrchu objektu, druhým obrazem je vždy snímek deformovaného povrchu objektu. Po nalezení totožného pixelu se odečtou jeho souřadnice na referenčním snímku od jeho souřadnic na aktuálním snímku povrchu objektu, čímž se získá posunutí daného bodu v pixelech. Přepočtový vztah mezi pixelovými a reálnými délkovými jednotkami se definuje při kalibraci záznamového zařízení (Pan et al. 2009). Pro jednoznačnou identifikaci každého pixelu na obou snímcích se využívá identifikační okolí pixelu, které je označováno jako podmnožina „Subset“.

znázorňuje princip metody DIC, kde levý obrázek zobrazuje počáteční a aktuální polohu sledovaných bodů, středový obrázek zachycuje velikost a směr vektoru posunutí sledovaných bodů a pravý obrázek uvádí příklad typické grafické interpretace vypočteného posunutí sledovaných bodů po interpolaci a vytvoření plno-polní sítě dat posunutí.



Obr. 12: Jednoduché znázornění principu DIC metody, převzato z LaVision

4.6 Ostatní nekontaktní metody pro optické měření deformací

4.6.1 Moiré interferometrie

Moiré interferometrie je důležitou metodou optického měření deformací v průmyslovém výzkumu. Tato metoda se používá k měření malé deformace tuhých těles, způsobených mechanickými silami, změnami teploty nebo jinými změnami parametrů okolního prostředí (Sharpe 2008). Dále Sharpe (2008) uvádí, že Moiré metoda byla použita například pro studium kompozitních materiálů, vrstvených materiálů, lepených materiálů, anebo také pro konstrukční prvky a konstrukční spoje. Pro měření posuvu v rovině se technologie vyvinula z geometrického Moiré malé citlivosti na interferometrické Moiré s velkou citlivostí. Superpozicí dvou mřížek, z nichž každá sestává z pravidelně uspořádaných světlých a tmavých pásků vznikají Moiré kontury (Post a Han 2008). Pomocí parametrů Moiré kontur lze zpětně zrekonstruovat vzájemné posunutí dvou překrývajících se mřížek. Vzhledem k tomu, Moiré reaguje pouze na geometrické změny, lze použít pro kvantifikaci elastické, viskoelastické i plastické deformace izotropních, ale i ortotropních a anizotropních materiálů (Sharpe 2008).

4.6.2 Metody „Speckle“

Dle Sharpe (2008) hrají metody „Speckle“ důležitou roli v experimentální mechanice. Nejpoužívanější metodou je tzv. „Shearography“, která je vhodná pro měření v terénu v rámci nedestruktivního měření deformací. Základní pojmy a vyhodnocení interferometrických metod „Speckle“ jsou popsány v Sharpe (2008).

4.6.3 Fotoelasticimetrie

Jedná se o nekontaktní metodu, která, jak uvádí Sharpe (2008), má několik variant. Od konvenční fotoelasticimetrie až po digitální fotoelasticimetrii. Zavedení digitální fotoelasticimetrie umožnilo přesnější a efektivnější měření deformací. Princip této metody využívá jev dočasného dvojlomu světelných paprsků, který lze pozorovat u průhledných amorfních polymerů, které mají rozdílné optické vlastnosti při různém napěťovém stavu. Zkoušených materiálem může být sám polymer, příp. jakýkoliv jiný materiál, na který se vrstva tohoto polymeru dá aplikovat v takové formě, aby se mohly deformace testovaného materiálu během zatížení plně přenášet do vrstvy polymeru. Fotoelasticimetrie je jedinou plno-polní metodou, která umožňuje u objektů vyrobených přímo z průhledného polymeru s výše popsanými optickými vlastnostmi analyzovat nejen deformace, ale i napětí na povrchu, ale také ve vnitřní struktuře testovaného objektu (Sharpe 2008). Sharpe (2008) dále uvádí, že metoda má mnoho variant, které lze použít pro různorodé aplikace.

5 Materiál a metodika

5.1 Suroviny

5.1.1 Dřevní surovina

Pro výrobu zkušebních těles, kterými byly masivní a lepené hranoly, bylo použito dřevo buku lesního (*Fagus sylvatica* L.), které pocházelo z lesních porostů 3kolního lesního podniku. Surovina obsahovala nepravé jádro, přičemž bylo snahou jeho podíl v testovaných hranolech snížit vhodným rozmanipulováním materiálu na minimum.

5.2.1 Lepidla

Pro zhotovení lepených hranolů byla využita dvě různá lepidla. Jedno z nich bylo lepidlo Lear D4-polyuretanové jednosložkové pro vysoce vodovzdorné montážní a plošné lepení dřeva. Využívá se pro lepení veškerého dřeva, MDF, překližek, izolačních a pěnových hmot. Dále se lepidlo využívá pro výrobu truhlářských výrobků či hranolů nebo pro lepení dveří, kde je požadována odolnost vůči vodě. Toto lepidlo spadá do třídy odolnosti vůči vodě D4, tudíž lepený spoj je schopný odolávat i zvýšené vlhkosti. Lepidlo musí být nanášeno pouze na čisté a suché plochy bez nečistot.

Jako druhé lepidlo bylo použito fenol-formaldehydové lepidlo Lignofen G/3/D. Jedná se o plně vodovzdorné lepidlo s tmavým zbarvením, odolné proti stárnutí a mikroorganismům. Toto lepidlo se využívá například pro lepené nosníky, které jsou využívány v exteriéru, kde jsou vystaveny povětrnostním vlivům. Pokud lepidlo dostatečně nevytverdne je rozpustné ve vodě. Lepidlo lze využít i pro dřevo s vyšší vlhkostí, zhruba do 25 %.

5.2 Příprava zkušebních vzorků

5.2.1 Výroba masivních hranolů

Hranoly z rostlého bukového dřeva se nejprve nařezaly se na hrubé rozměry na pile a následně byly převezeny do výzkumného centra v Útěchově, kde byly následně vysušeny na zhruba 12 % vlhkosti a nařezány na čisté rozměry. Celkem bylo vyrobeno 20 kusů hranolů o nominálních rozměrech $100 \times 100 \times 1000 \text{ mm}^3$.

5.2.2 Výroba lepených hranolů

Lamely o rozměrech $22 \times 100 \times 1000 \text{ mm}^3$ byly nařezány z bukových fošen v celkovém počtu 100 ks. Pro zvýšení přilnavosti lepidla byly dvě protilehlé plochy lamel ohoblovány na výslednou tloušťku 20 mm. Jeden lepený hranol se skládal z 5 lamel, tudíž celkový počet lepených hranolů byl 20 ks a výsledné nominální rozměry hranoly byly shodné s nominálními rozměry masivních hranolů, tj. $100 \times 100 \times 1000 \text{ mm}^3$. Lamely byly lepeny podle pravidel symetrie využívajících se pro výrobu vrstvených materiálů na bázi dřeva. Polovina hranolů byla lepena polyuretanovým lepidlem Lear D4, polovina fenol-formaldehydovým lepidlem Lignofen G/3/D. Obě lepidla se nanášela s gramáží 180 g/m^2 pouze na jednu lepenou plochu. Do 15 minut od nanesení lepidla proběhlo složení souborů a vložení do lisu.

Lisování proběhlo v jednoetážovém hydraulickém lisu MENDELU se světlostí etáže 200 mm. Lis je vybaven vytápěnými lisovacími deskami o rozměrech $1300 \times 1200 \text{ mm}^2$. Hranoly lepené lepidlem Lignofen G/3/D byly lisovány po dobu

10 hodin pod tlakem 1,2 MPa za zvýšené teploty. Po vyjmutí z lisu byly hranoly klimatizovány a označeny červenou barvou. Hranoly lepené polyuretanovým lepidlem Lear D4 byly v lisu pouze 1 hodinu, taktéž pod tlakem 1,2 MPa, ale za běžné teploty. Po vyjmutí byly hranoly označeny černou barvou.

5.2.4 Máčení a třídění hranolů

Polovina hranolů z každé skupiny, tj. 10 ks masivních, 5 kusů hranolů lepených fenol-formaldehydovým lepidlem a 5 kusů lepených polyuretanovým lepidlem byla ponořena do nádoby s vodou po dobu 30 dnů. Po ukončení máčení byly mokré hranoly znovu změřeny a zváženy. U lepených hranolů došlo během máčení k rozlepení, tudíž nebylo možné změřit jejich rozměry, ani je dále použít pro mechanické testy s ohybovým zatížením. Ze skupiny masivních suchých a masivních mokrých hranolů bylo pro mechanické testování vybráno po 5 ks s nejmenším obsahem nepravého jádra a ostatních viditelných vad. Ze skupiny suchých lepených hranolů červených a černých bylo mechanickým testům podrobena všech 5 ks hranolů z každé skupiny.

5.3 Stanovení vlhkosti hranolů

Vlhkost hranolů v době provádění mechanických zkoušek byla stanovena na malých vlhkostních vzorcích o rozměrech $100 \times 100 \times 20 \text{ mm}^3$, které byly odebrány z hranolů ihned po provedení mechanických testů. Z každého hranolu byly vyřezány 2 vlhkostní vzorky ve vzdálenosti 100 mm od konců hranolu a 2 vlhkostní vzorky ze středové části. Stanovení vlhkosti malých vlhkostních vzorků bylo provedeno pomocí gravimetrické metody předepsané normou ČSN 49 0103 (1979). Výsledná vlhkost hranolu byla vypočtena průměrováním ze všech 4 vlhkostních vzorků. Hmotnost vzorků byla měřena na digitální váze RADWAG WPX 650 s přesností 0,001 g. Vysušení vzorků proběhlo v laboratorní sušárně SANYO MOV-212P při teplotě $103 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$. Sušení bylo ukončeno, jakmile hmotnostní gradient mezi dvěma po sobě jdoucími kontrolními váženími klesl pod 0,1 g. Výpočet vlhkosti zkušebních vzorků se prováděl dle rovnice (1):

$$w = \frac{m_w - m_o}{m_o} \cdot 100 \quad (1)$$

kde:

w ...vlhkost dřeva [%]

m_w ...hmotnost vzorků před vysušením [kg]

m_o ...hmotnost vzorků po vysušení [kg]

5.2.3 Stanovení hustoty hranolů

Délka hranolů byla měřena pomocí laserového měřiče Bosh GLM 50 Professional, výška a šířka hranolů byla měřena pomocí digitálního posuvného měřítka XTline s přesností na 0,01 mm. Příčné rozměry byly měřeny na třech místech, a to na obou čelech a pak i uprostřed. Výsledné rozměry byly získány průměrováním těchto třech naměřených hodnot. Vážení hranolů proběhlo na můstkové laboratorní váze LESAR A12 s přesností na 10 g. Z naměřených dat byla stanovena hustota dle metody

předepsané normou ČSN 49 0103 (1979). Výpočet hustoty zkušebních vzorků se prováděl dle rovnice (2):

$$\rho_w = \frac{m_w}{V_w} \quad (2)$$

kde:

ρ_w ...hustota dřeva [kg/m³]

m_w ...hmotnost vzorků [kg]

V_w ...objem vzorku [m³]

5.4 Mechanické testy

5.4.1 Zatížení

Hranoly byly zatíženy statickým symetrickým 4-bodým ohybem podle ČSN EN 408+A1 (2012) na univerzálním testovacím stroji LabTest 6.500H (Obr. 13) při standardních laboratorních klimatických podmínkách. Masivní hranoly byly zatěžovány v radiálním směru, lepené hranoly byly zatíženy ve směru tloušťky lamel, tj. kolmo na lepené spáry. Zatížení bylo vyvozeno pomocí trnů s poloměrem zaoblení 40 mm. Rozpon podpěrných trnů činil 800 mm, zatímco rozpon tlačných trnů byl stanoven jako jedna třetina z rozponu podpěrných trnů, tedy 267 mm. Pro zajištění dosednutí trnů po celé šířce hranolů, bylo použito před-zatížení o velikosti 100 N. Zatížení bylo aplikováno rychlostí 0,05 mm/s, která byla stanovena ze vztahu () uvedeného v ČSN EN 408+A1 (2012). Zkouška byla ukončena v okamžiku, kdy došlo k výraznému poklesu síly s viditelným porušením vzorku.

$$v = \frac{l \times 5 \times 10^{-5}}{6 \times h} \quad (3)$$

kde:

v ...rychlost posunu čelisti [mm/s]

h ...výška průřezu [mm]

l ...rozpětí v ohybu [mm]



Obr. 13: Univerzální zkušební stroj LabTest 6.500H

5.4.2 Měření deformací

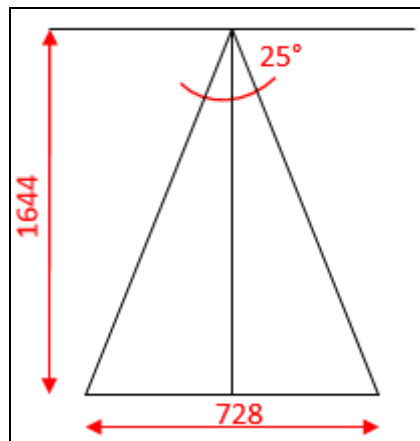
Průhyb hranolu byl snímán přes pozici příčnicku s tlačnými trny. Velikost posunu příčnicku však obvykle není totožná s reálnou hodnotou průhybu měřenou přímo na zkušebním tělese. Z toho důvodu, posunutí odečtené z příčnicku sloužilo pouze pro kontrolu a řízení ohybové zkoušky nikoliv pro analýzu mechanických charakteristik testovaných hranolů. Skutečný průhyb hranolu a deformační pole na povrchu hranolů bylo snímáno pomocí plno-polního optického systému, který využívá principy metody DIC. Vzhledem k malé barevné kontrastnosti povrchu dřevěných hranolů, bylo nutné před vlastním mechanickým testováním na snímáný povrch hranolu aplikovat body s kontrastním pozadím, které bude možné následně pomocí DIC identifikovat a sledovat jejich pohyb. Stochastický a vysoce kontrastní vzor byl na příslušný povrch hranolu nanesen pomocí bílého a černého spreje. Pro snímání byla použita optická sestava skládající se ze dvou CCD kamer AVT Stingray Copper F-504B s velikostí čtvercové světlocitlivé buňky $3,45 \mu\text{m}$ na snímacím senzoru s rozlišením 2452×2056 pixelů, tj. 5 MPX. Kamery byly vybaveny objektivy Pentax C2514-M s ohniskovou vzdáleností 25 mm. Kontrast na povrchu vzorků byl zvýšen svítidly SobrietyCube 360 vybavenými LED senzory Luminus Phlatlight CSM-360. Pro zajištění automatické lokalizace oblasti zájmu z celkové snímáné scény při zpracování obrazových dat, byly zatěžovací a podpěrné trny obaleny do černé látky, která byla použita i pro vytvoření jednobarevného pozadí (Obr. 14).



Obr. 14: Experimentální nastavení 4-bodé ohybové zkoušky s optickým snímáním deformací

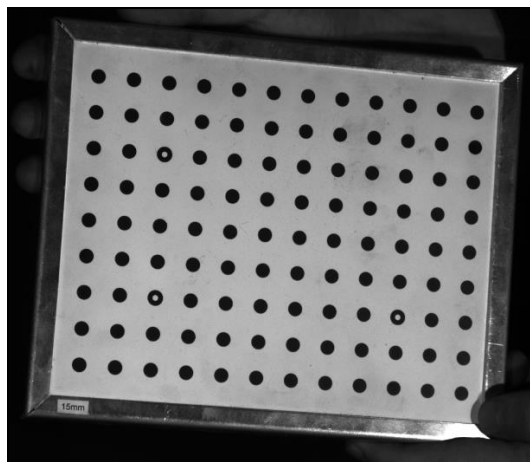
5.4.3 Kalibrace optického systému a nastavení pozice kamer

Pro dosažení maximálního prostorového rozlišení měřených deformací byl optický systém zkalibrován v takové měřicí vzdálenosti, aby rozsah zorného pole kamer nejlépe odpovídal oblasti zájmu, která zabírala zhruba polovinu hranolu, tj. plochu $100 \times 520 \text{ mm}^2$. Měřicí vzdálenost, ve které byla tato podmínka splněna, odpovídala vzdálenosti 1644 mm, která byla změřena pomocí laserového dálkoměru Bosh GLM 50 Professional. Měřicí vzdálenost byla dále využita pro výpočet optimální vzdálenosti kamer od sebe s ohledem na vrcholový úhel sevřený optickými osami kamer. Dle doporučení výrobce optického systému má vrcholový úhel dosahovat 25° , což po přepočtu odpovídá vzdálenosti mezi kamerami 728 mm. Kamery byly natočeny tak, aby každá z nich svírala přesně polovinu z celkového úhlu, a to $12,5^\circ$ (Obr. 15).



Obr. 15: Poloha kamer vůči zkušebnímu vzorku

Clony v kamerách byly nastaveny na hodnotu $f/4$, která byla zvolena pro zajištění dostatečné hloubky ostroty, která je schopná plně pokrýt pozici snímání oblasti zájmu. Výše popsané rozestavení optického systému bylo zkalibrováno pomocí 60 snímků kalibrační mřížky s roztečí 15 mm v různých geometrických pozicích vůči kamerám. Kalibrační systému byl vytvořen společný souřadný systém pro obě kamery s konverzním faktorem 4,2 px/mm.



Obr. 16 - Kalibrační mřížka s roztečí 15 mm použitá při kalibraci

5.4.4 Akvizice dat a přesnost měření

Všechna experimentální data byla během zatěžování ukládána synchronně každou jednu vteřinu (1 Hz). Tento akviziční interval se ukázal jako optimální vzhledem ke kvazistatické rychlosti aplikovaného ohybového zatížení a taktéž s ohledem na dostačující úspěšnost sledování pohybu bodů skvrnitého vzoru mezi jednotlivými snímky. Poměrné deformace byly vypočteny z parciálních derivací posunutí sledovaných bodů s využitím Lagrangova tenzoru deformací ve vyhodnocovacím softwaru Vic-3D v. 2010. Za účelem získání maximální přesnosti pozice neutrální osy po výšce hranolu a zároveň s maximálním prostorovým rozlišením po délce hranolu, byly poměrné deformace počítány co nejvíce lokálně s minimální možnou velikostí prostorového filtru 5×5 pixelů. Zvolená velikost subsetu 31 pixelů a kroku subsetu 5 pixelů poskytla optimální poměr mezi hustotou sledovaných bodů ($0,8$ bodů/mm²) a robustností vlastního sledování bodů. Průměrná přesnost měření byla stanovena na základě obecně udávané rozlišovací schopnosti metody DIC a šumu kamer, který byl kvantifikován jako velikost posunutí, příp. poměrné deformace vypočtené z 10 snímků povrchu hranolu bez aplikovaného zatížení. Poměrná normálová deformace ve směru délky hranolu byla stanovena s přesností 0,034 %, poměrná smyková deformace byla stanovena s přesností 0,033 %.

5.5 Stanovení pevnosti a modulu pružnosti v ohybu

Pevnost v ohybu pro 4-bodý ohyb (f_m) byla stanovena na základě vzorce (4) dle normy ČSN EN 408+A1 (2012):

$$f_m = \frac{3 * F_{max} * a}{b * h^2} \quad (4)$$

kde:

F_{max} ...maximální zatěžovací síla [N]

a ...vzdálenost mezi působištěm zatížení a nejbližší podporou [mm]

b ...rozměr příčného průřezu kolmo na směr zatížení, tj. šířka hranolu [mm]

h ...rozměr příčného průřezu ve směru zatížení, tj. výška hranolu [mm]

Modul pružnosti ($E_{m,g}$) byl vypočten dle vzorce (5) pro výpočet globálního modulu pružnosti ohýbaného nosníku uvedeného v normě ČSN EN 408+A1 (2012):

$$E_{m,g} = \frac{3 * a * l^2 - 4 * a^3}{2 * b * h^2 \left(2 * \frac{w_2 - w_1}{F_2 - F_1} \right) - \frac{6 * a}{5 * G * b * b * h}} \quad (5)$$

kde:

a ...vzdálenost mezi působištěm zatížení a nejbližší podporou [mm]

l ...rozpon podpěrných trnů [mm]

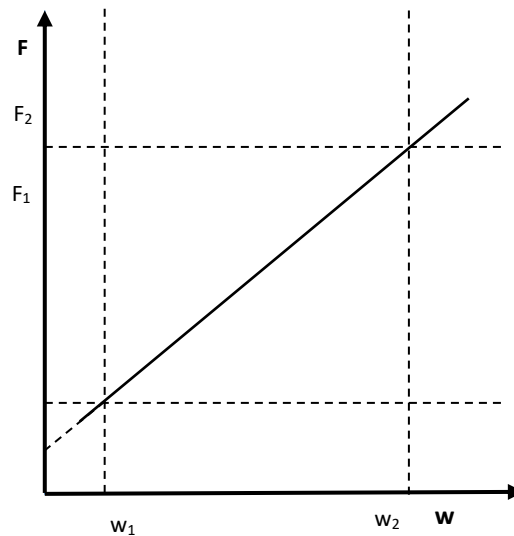
b ...rozměr příčného průřezu kolmo na směr zatížení, tj. šířka hranolu [mm]

h ...rozměr příčného průřezu ve směru zatížení, tj. výška hranolu [mm]

G ...modul pružnosti ve smyku

$F_2 - F_1$...přírůstek zatížení na regresivní přímce s $R = 0,99$ nebo lepším [N]

$w_2 - w_1$...přírůstek průhybu odpovídající $F_2 - F_1$ [mm] (viz Obr. 17)



Obr. 17: Diagram zatížení-průhyb v oblasti lineárně elastického chování dřeva, podle ČSN EN 408+A1 (2012)

Jelikož se procentuální změna globálního modulu pružnosti v ohybu po odečtení vlivu modulu pružnosti ve smyku pohybovala průměrně okolo 0,000001 %, byl člen $\frac{6 \cdot a}{5 \cdot G \cdot b \cdot b \cdot h}$ popisující vliv smykového modulu pružnosti ve vzorci (5) zanedbán.

5.6 Stanovení relativní polohy neutrální osy

Relativní poloha neutrální osy vzhledem k výšce hranolu byla stanovena v pozici pod horním tlačným trnem dle vztahu (6).

$$\text{Relativní poloha NO} = \frac{X - \left(\frac{h}{2}\right)}{h} * 100 \quad (6)$$

kde:

X ...souřadnice průsečíku lineárního trendu poměrné normálové deformace ve směru podélné osy hranolu (ε_{xx}) s osou y (bod nulové normálové deformace) v pozici pod horním tlačným trnem [mm]

h ...rozměr příčného průřezu ve směru zatížení, tj. výška hranolu [mm]

6 Výsledky a diskuze

6.1 Vybrané fyzikální vlastnosti vzorků

Tab. 1– Souhrnná tabulka s vlhkostí a hustotou pro jednotlivé skupiny

Název skupiny	Lepené suché červené					Lepené suché černé				
Číslo vzorku	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Hustota ρ [kg/m ³]	691,2	698,9	691,2	682,9	679,0	681,8	708,7	693,7	704,3	691,8
Průměrná ρ [kg/m ³]	686,8					696,1				
průměrná w [%]	11,4	11,9	11,5	11,6	12,2	11,6	11,6	10,9	11,3	11,4
Celková průměrná w [%]	11,7					11,4				
Název skupiny	Masiv suchý					Masiv mokrý				
Číslo vzorku	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Hustota ρ [kg/m ³]	768,9	696,0	768,4	697,7	763,4	854,2	844,3	814,6	910,5	978,2
Průměrná ρ [kg/m ³]	738,9					880,4				
průměrná w [%]	13,7	13,8	13,6	13,3	12,9	60,0	68,3	53,1	89,0	87,1
Celková průměrná w [%]	13,4					71,50				

kde:

Lepené suché červené...použito lepidlo Lignofen G/3/D

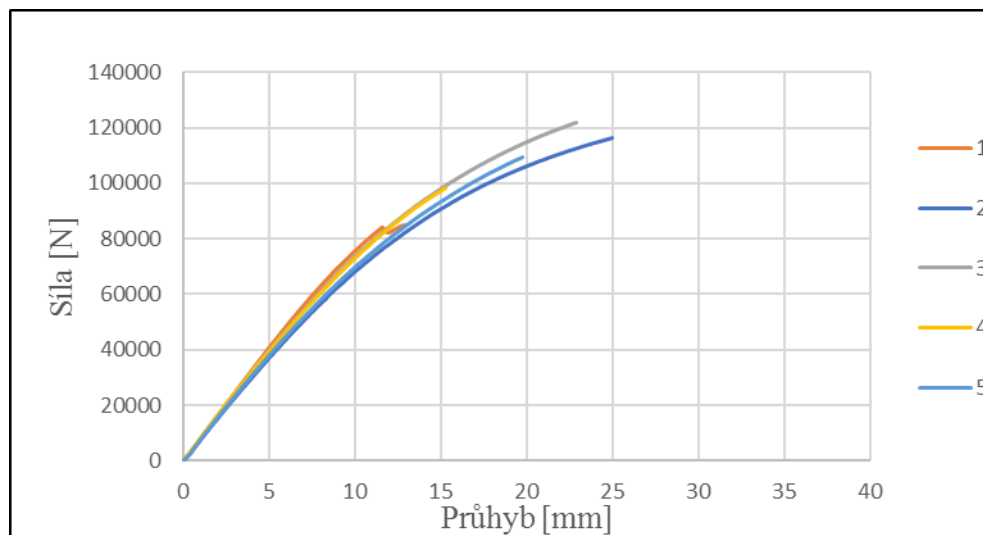
Lepené suché černé... použito lepidlo Lear D4

V tab. 1 lze vidět hodnoty vlhkosti a hustoty pro jednotlivé vzorky. U skupiny Lepené suché černé vychází nejmenší průměrná hodnota vlhkosti vzorků vzhledem k ostatním, a to pouze 11,4 %. Hustota zde kolísá na hranici 700 kg/m³. U druhé skupiny lepených, vlhkost je zde nepatrně vyšší, a to 11,7 %. Ale naopak průměrná hustota u této skupiny vyšla o něco nižší 686,8 kg/m³, a to s tím že ani jeden ze vzorků nepřesáhl hranici hustoty 700 kg/m³. Pro další dvě skupiny Masivních vzorků vyšly celkově vyšší hodnoty. Konkrétně u suchých Masivních se průměrná hodnota dostala na 738,9 kg/m³ s průměrnou vlhkostí 13,4 %. Jsou zde dva vzorky s hustotou pod 700

kg/m³. Ve skupině Masiv mokrý se hodnoty vyšplhaly nejvýše. Hustota se téměř dostala přes hranici 900 kg/m³, což bylo způsobené hlavně vysokou vlhkostí, jelikož průměrná vlhkost činila u této skupiny 71,5 %.

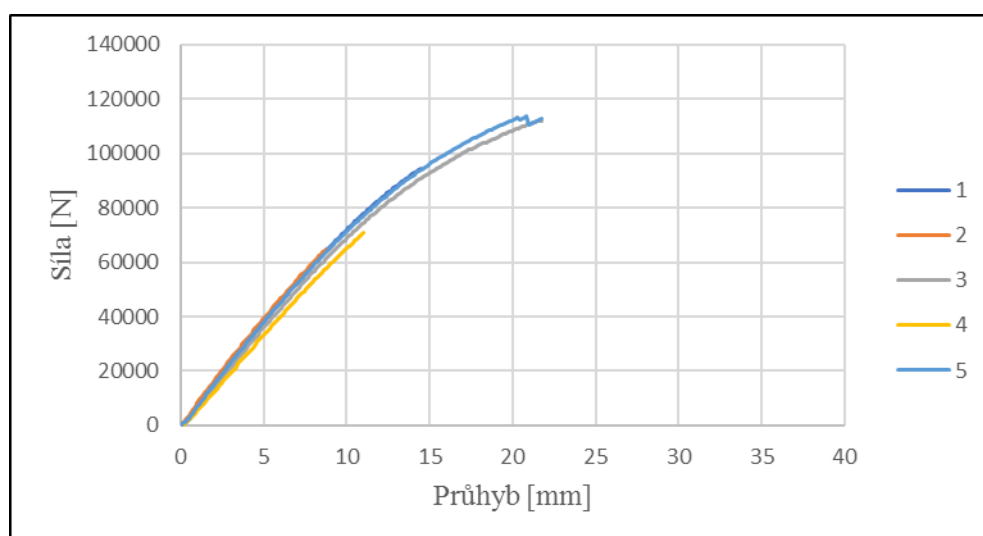
6.2 Pracovní diagramy

6.2.1 Pracovní diagramy pro jednotlivé vzorky



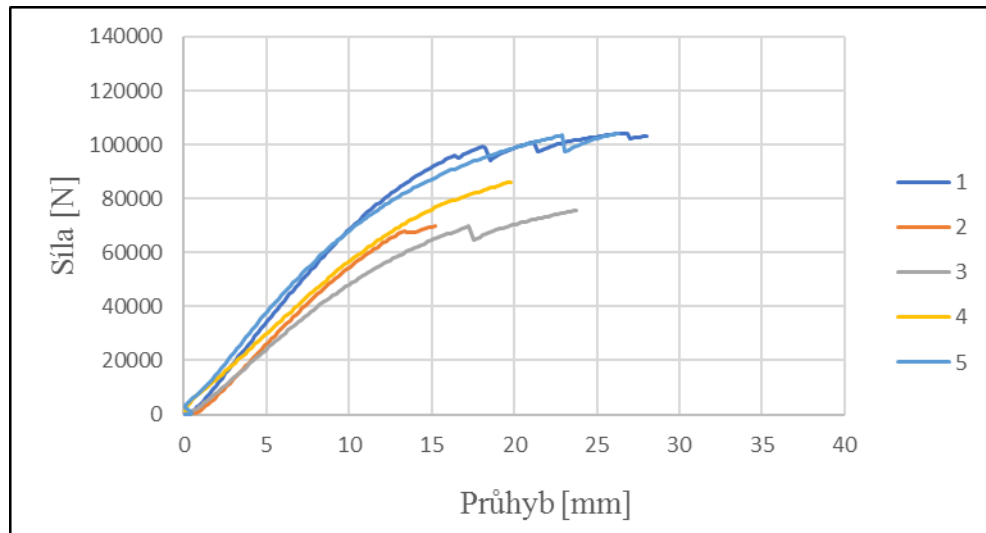
Obr. 18- Souhrnný pracovní diagram pro skupinu Lepený suchý černý

V obr. 18 je pracovní diagram pro vzorky ze skupiny Lepený suchý – černý. Vyskytuje se zde lineární část všech křivek do 40 000 N neboli jinak řečeno mez úměrnosti dále, pak nastává mírný odklon všech křivek grafu, až na vzorek 1, který nabývá téměř lineární část až do 60 000 N. Nejvyšších hodnot dosahují vzorky 2 a 3, přičemž vzorek 3 se dostal až na hodnotu 121 812,5 N a vzorek 2 dosáhl max. síly 116 469,5 N. Naopak nejnižší hodnoty dosahuje vzorek 1, který dosáhl max. síly pouze 84 820 N. Průhyb u této skupiny nepřesáhl hranici 25 mm. Min. průhyb se zde pohybuje kolem 10 mm, které samozřejmě dosáhly vzorky s menší maximální silou.



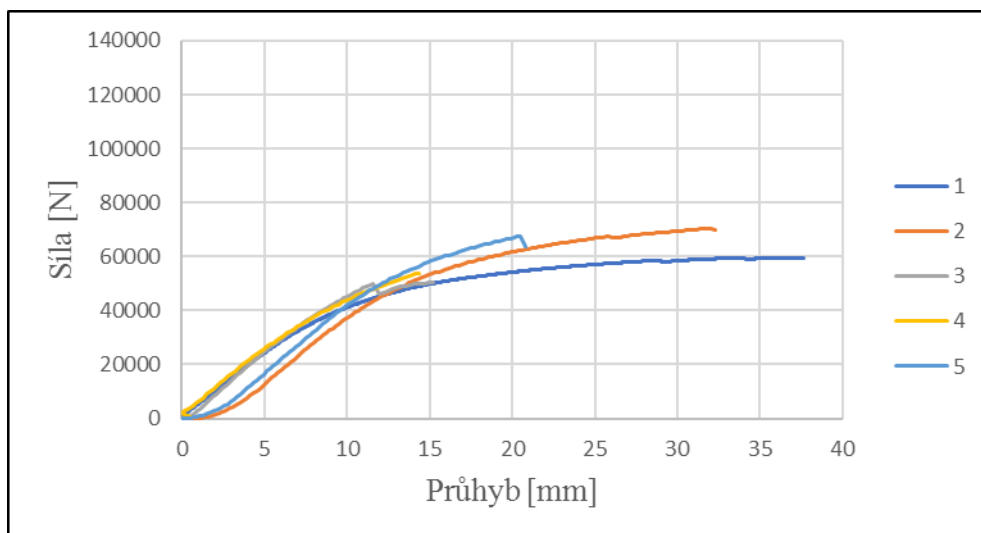
Obr. 19 – Souhrnný pracovní diagram pro skupinu Lepený suchý červený

Z obr. 19 je vidět pracovní diagram pro vzorky ze skupiny Lepený suchý – červený. Jako o u předchozího pracovního diagramu lze pozorovat mez úměrnosti do 40 000 N, dále pak nastává odklon. Nejnižší max. síly v tomto případě dosahuje vzorek 2, který má max. sílu pouze 65 213,5 N. Dále i vzorek 4 dosahuje abnormálně nízké max. síly, a to pouze 70 710,5 N. Naopak nejvyšších hodnot dosahují vzorky 3 a 5, a to max. síly kolem 114 000 N. Průhyb se zde, jak v předchozím případě pohybuje kolem stejných hranic, a to max. cca 23 mm a min. kolem 10 mm.



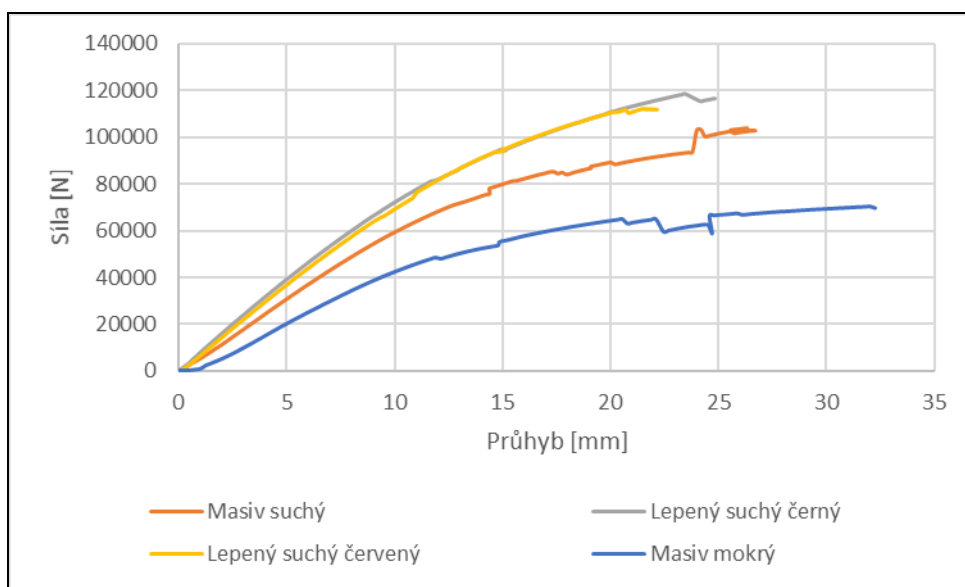
Obr. 20 – Souhrnný pracovní diagram skupinu pro Masiv suchý

Na obr. 20 je opět pracovní diagram, ale pro vzorky ze skupiny Masiv suchý. Lze pozorovat větší rozptyl křivek, než jak tomu bylo u předchozích dvou pracovních diagramů, což je s největší pravděpodobností způsobené tím, že se nejedná o lepené vzorky, u kterých bylo cílem dosažení eliminace vad, či alespoň její reorganizace vrstvením. Jsou zde dvě křivky, které dosahují relativně vyšší max. síly, než ostatní tři křivky. Konkrétně vzorek 1, který dosáhl max. síly 104 103,5 N a vzorek 5, u kterého max. síla byla ještě o něco vyšší, a to 104 278,5 N. Nejmenší max. sílu 69 811,5 N dosahuje vzorek 2, dále pak vzorek 3 dosahuje max. síly 75 557 N. Poslední vzorek 4 dosáhl max. síly 86 145,5 N. Pokud se podíváme na dosažený průhyb můžeme vidět, že se pohybuje od cca 15 mm do cca 28 mm. Jedná se o srovnatelný průhyb s Lepenými skupiny.



Obr. 21 – Souhrnný pracovní diagram pro skupinu Masiv mokrý

Na obr. 21 je poslední pracovní diagram, a to pro skupinu Masiv mokrý. Z grafu lze vyčíst, že zde nenastává takový rozptýl v max. síle, jak tomu bylo v předchozím případě, ale naopak je zde větší variabilita v dosaženém průhybu. Také se u mokrých nosníků projevil vyšší podíl plastické deformace, než jak tomu bylo v předchozích skupinách. Je to především způsobené vysokou vlhkostí. Nejvyšší max. síly dosahuje vzorek 2, který se jako jediný dostal přes 70 000 N, a to přesně na max. sílu 70 424 N. Naopak nejnižší max. sílu 50 513,5 N dosáhl vzorek 3. Pokud se podíváme na dosažený průhyb je zde na první pohled vidět, že mokré vzorky dosahují až dvakrát většího průhybu než vzorky suché. Ale jsou zde i dva vzorky s relativně nízkým průhybem, a to vzorky 3 a 4, a taktéž jejich max. síla patří k nejnižším.

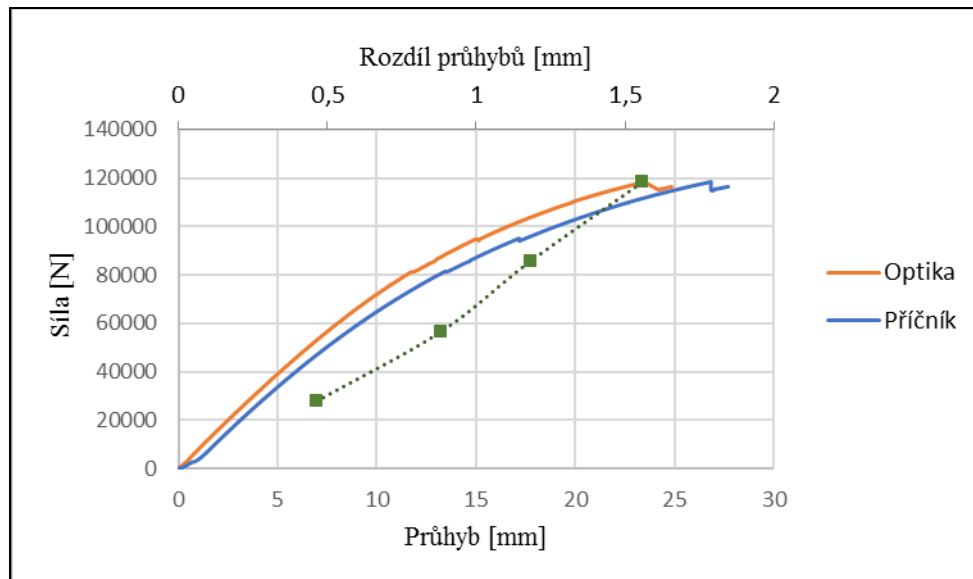


Obr. 22 – Pracovní diagram průměrných křivek jednotlivých skupin

Z obr. 22 je vidět celkový rozdíl průměrných křivek jednotlivých skupin. Je patrné, že Masiv mokrý opravdu dosáhl nižších max. sil, ale s vyšším podílem plastické deformace. Dále je patrné, že obě Lepené skupiny dosáhli vyšší průměrné max. síly, než u Masivu mokrého a suchého. Také je vidět, že křivky Lepených vzorků dosáhli téměř totožných pracovních diagramů, ale průměrná max. síla byla u skupiny

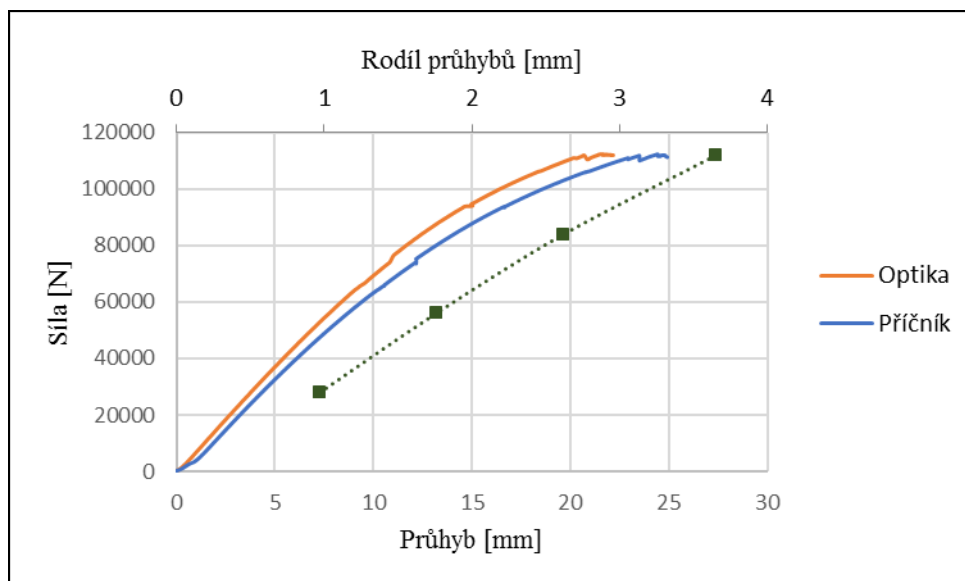
Lepený suchý černý, lepená lepidlem Lear D4, se dostala na nepatrně vyšší max. sílu, a to kolem 121 000 N.

6.2.2 Porovnání pracovních diagramů z optiky a příčnicku



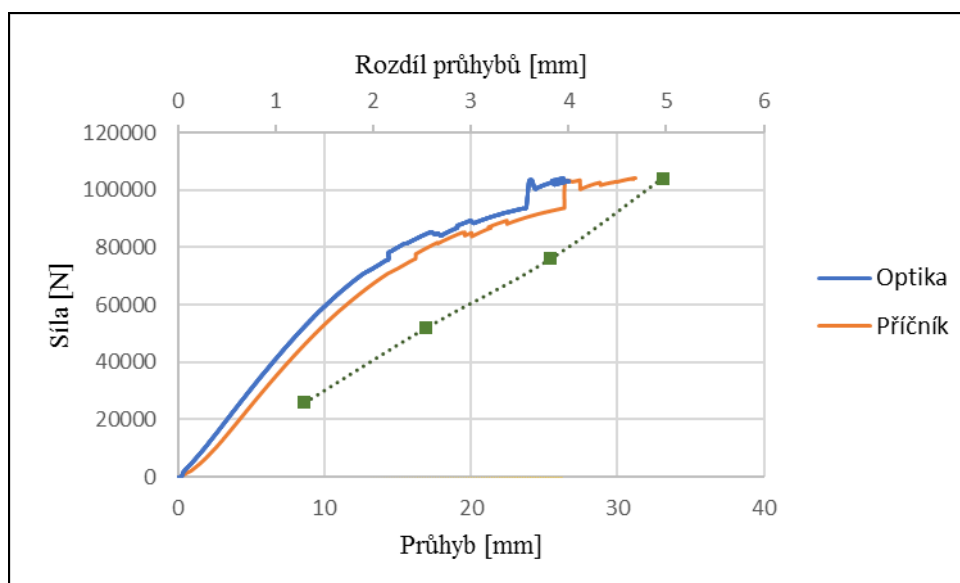
Obr. 23– Průměrný pracovní diagram z optiky a příčnicku pro skupinu Lepený suchý černý s kvantifikovaným rozdílem průhybů

Na obr. 23 je porovnání pracovních diagramů z optiky a z příčnicku skupiny Lepený suchý černý. Dále je zde křivka, která ukazuje rozdíl průhybů pro 4 úrovně zatížení (25 %, 50 %, 75 % a 100 % z max. síly). Celkově vidíme, že optika udává nižší průhyb. Tento fakt je způsobený tím, že hodnoty z příčnicku zahrnují další faktory, jako je například otláčení zatěžovacích a podporových trnů, které zkreslují celkovou deformaci. Při dosažení 25 % max. zatížení rozdíl deformací dosáhl 0,46 mm. Při 50 % max. zatížení se rozdíl téměř zdvojnásobil, a to na rozdíl 0,88 mm. U 75 % max. zatížení jsme se dostali na rozdíl přes jeden milimetr, přesněji 1,18 mm. Při dosažení maximální síly činil rozdíl 1,56 mm. Z tohoto porovnání se potvrdilo, že měření průhybu nosníku přímo na jeho povrchu pomocí optiky poskytuje přesnější hodnoty, než jak je tomu u příčnicku.



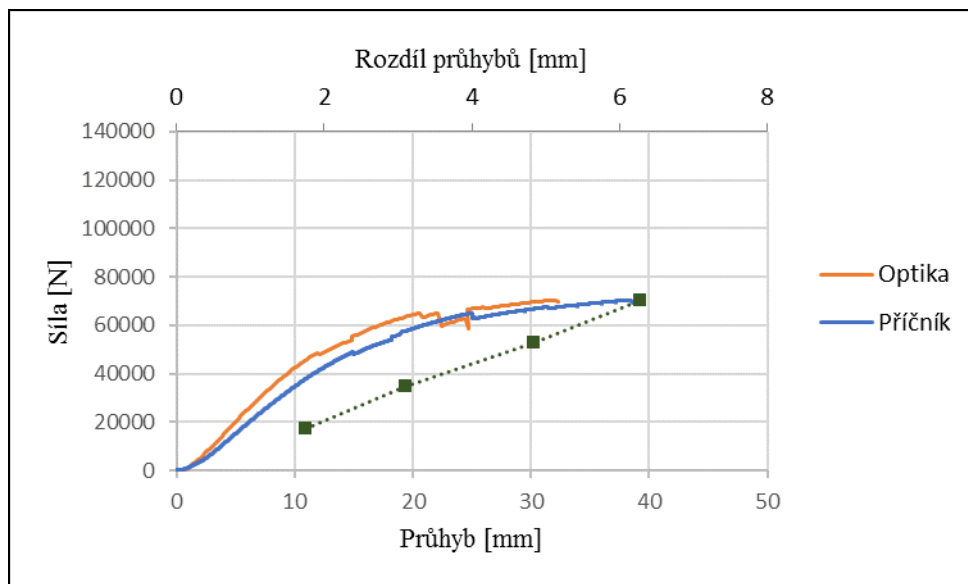
Obr. 24– Průměrný pracovní diagram z optiky a příčnicku pro skupinu Lepený suchý červený s kvantifikovaným rozdílem průhybů

Na obr. 24 je opět pracovní diagram, ale pro skupinu Lepený suchý červený, ve kterém vidíme průměrné křivky z hodnot optiky a příčnicku. Dále zde je opět křivka, která vykazuje rozdíly deformací při 4 úrovních zatížení. Na první pohled, lze opět tvrdit, že optika vykazuje menší deformaci se stejnou dosaženou maximální silou. Stejně, jako u předchozího případu zde vstupuje faktor otlacení zatěžovacích a podporových trnů, které zkreslují konečnou deformaci. Při porovnání jednotlivých rozdílů. Se už na 25 % zatížení dostáváme na téměř milimetrový rozdíl deformace, a to na hodnotu 0,97 mm. Při 50 % max. zatížení činí rozdílná deformace 1,76 mm. U 75 % zatížení se dostáváme k hranici rozdílu 3 mm, konkrétně 2,62 mm. A při dosažení max. síly, činí konečný rozdíl deformací 3,65 mm.



Obr. 25– Průměrný pracovní diagram z optiky a příčnicku pro skupinu Masiv suchý s kvantifikovaným rozdílem průhybů

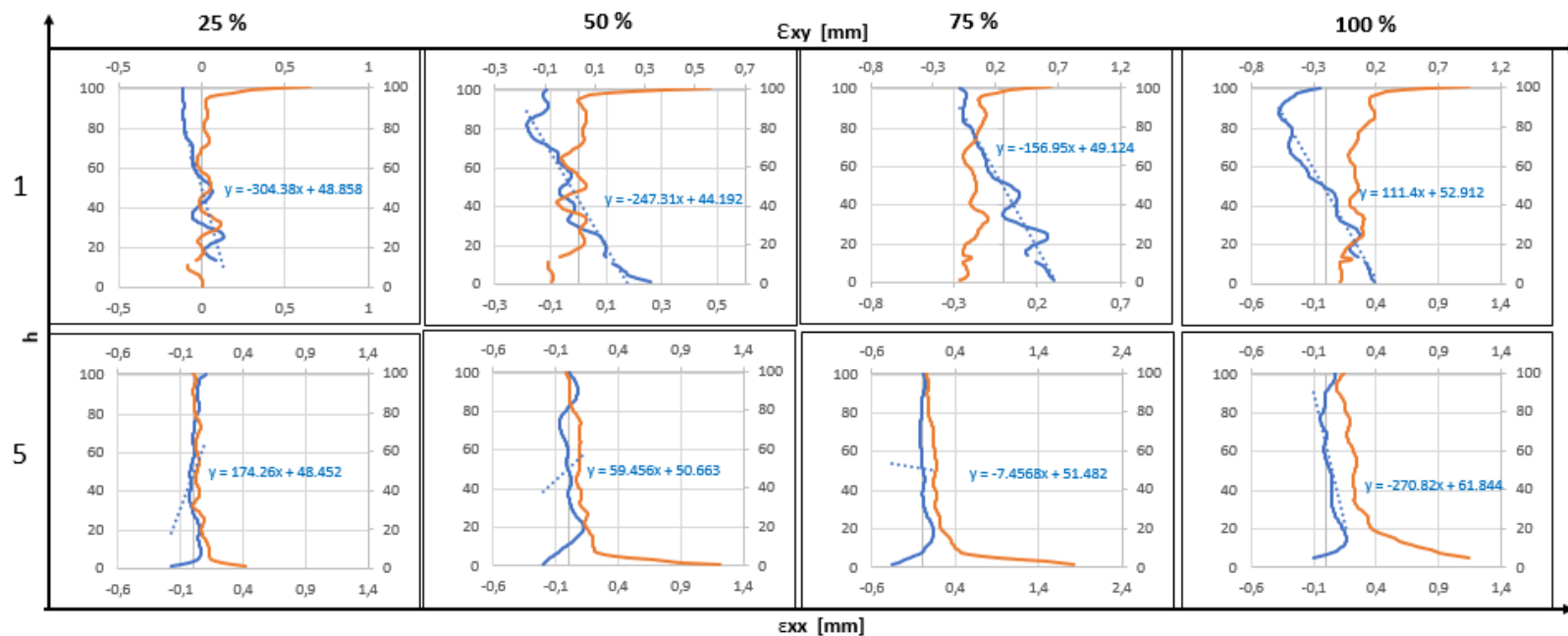
Na obr. 25 je také pracovní diagram, ale pro skupinu Masiv suchý, ve kterém jsou průměrné křivky z hodnot optiky a příčnicku a také křivku rozdílu deformací. I zde je na první pohled vidět, že tu proběhlo zkreslení deformací vlivem trnů na příčnicku. Rozdíly deformací se zde pohybují ve vyšších hodnotách. Je to především způsobené tím, že se nejedná o Lepené nosníky, nýbrž o masivní nosníky. A to, protože u lepením lamel bylo dosaženo větší tuhosti a pevnosti nosníku. Když se podíváme na konkrétní hodnoty vidíme, že při dosažení 25 % max. zatížení je rozdíl už 1,29 mm. U 50 % max zatížení se rozdíl deformací téměř zdvojnásobil na hodnotu 2,53 mm. Dále při 75 % max. zatížení dosahujeme rozdílu 3,82 mm. A u max. síly se rozdíl deformací vyšplhal až k 5 mm, konkrétně 4,97 mm.



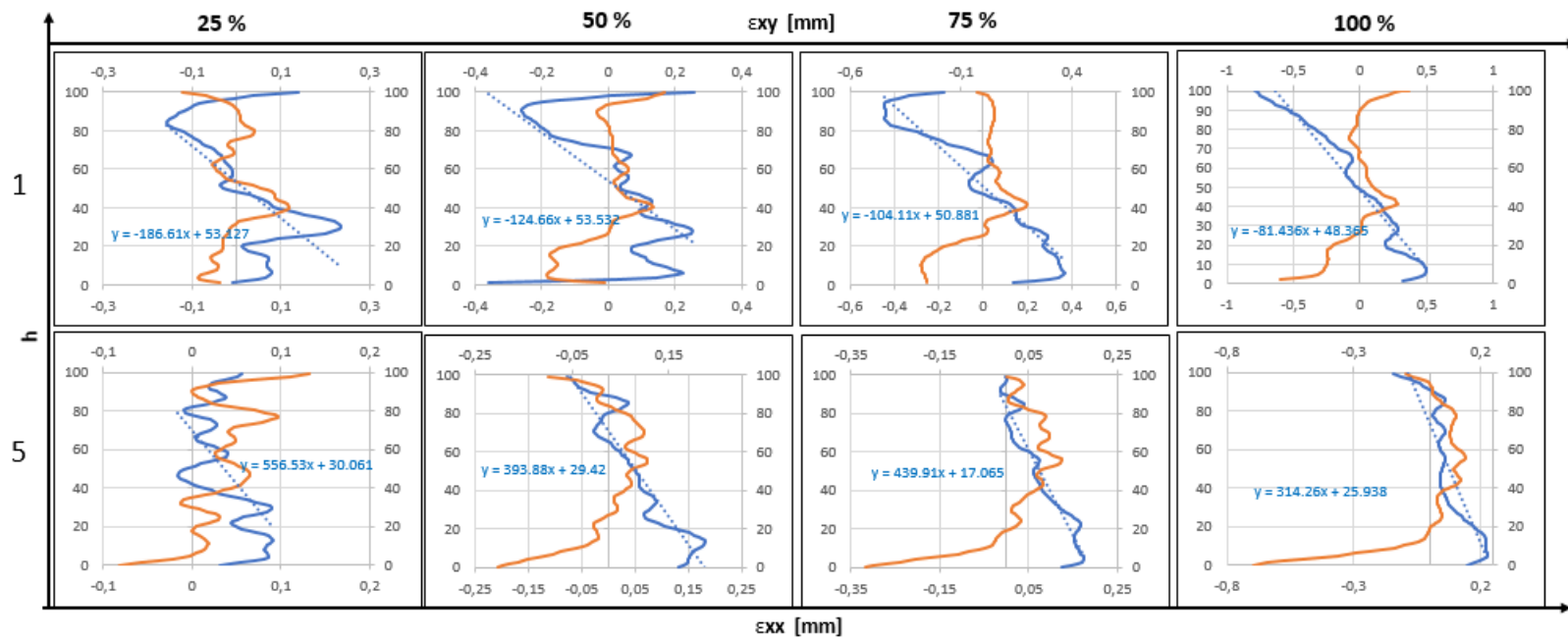
Obr. 26– Průměrný pracovní diagram z optiky a příčnicku pro skupinu Masiv mokrý s kvantifikovaným rozdílem průhybů

Na obr. 26 je poslední pracovní diagram, ale pro skupinu Masiv mokrý, ve kterém vidíme průměrné křivky z hodnot optiky a příčnicku a také křivku rozdílu deformací. Tak jak u předchozí skupiny jde i tu vidět, že se rozdíl deformací projevil nejvíce u masivu, zde u mokrého masivu se dosáhlo nejvyššího rozdílu deformací při dosažení max. síly. I zde je to způsobené vlivem tlačných a podporových trnů, ale zde zasahuje další hlavní faktor, a to vlhkost, která způsobila to, že se trny více vtláčili do nosníku, jelikož byly tzv. více houbovitě díky vyššímu obsahu vlhkosti. Při porovnání deformací, tak při 25 % max. síly byl rozdíl 1,75 mm. U dosažení 50 % byl rozdíl už 3,10 mm. Po dosažení 75 % max. zatížení činil rozdíl 4,84 mm. A při max. síle byl rozdíl razantně vyšší než u předchozích skupin, a to 6,29 mm. Na základě výsledků, lze tvrdit, že nejen tlačné a podporové trny vstupují, jako negativní faktory pro analýzu pracovních diagramů, ale s kombinací s vysokou vlhkostí se dosahuje ještě vyšších rozdílu a tím pádem také zvýšená vlhkost negativně ovlivňuje analýzu pracovních diagramů.

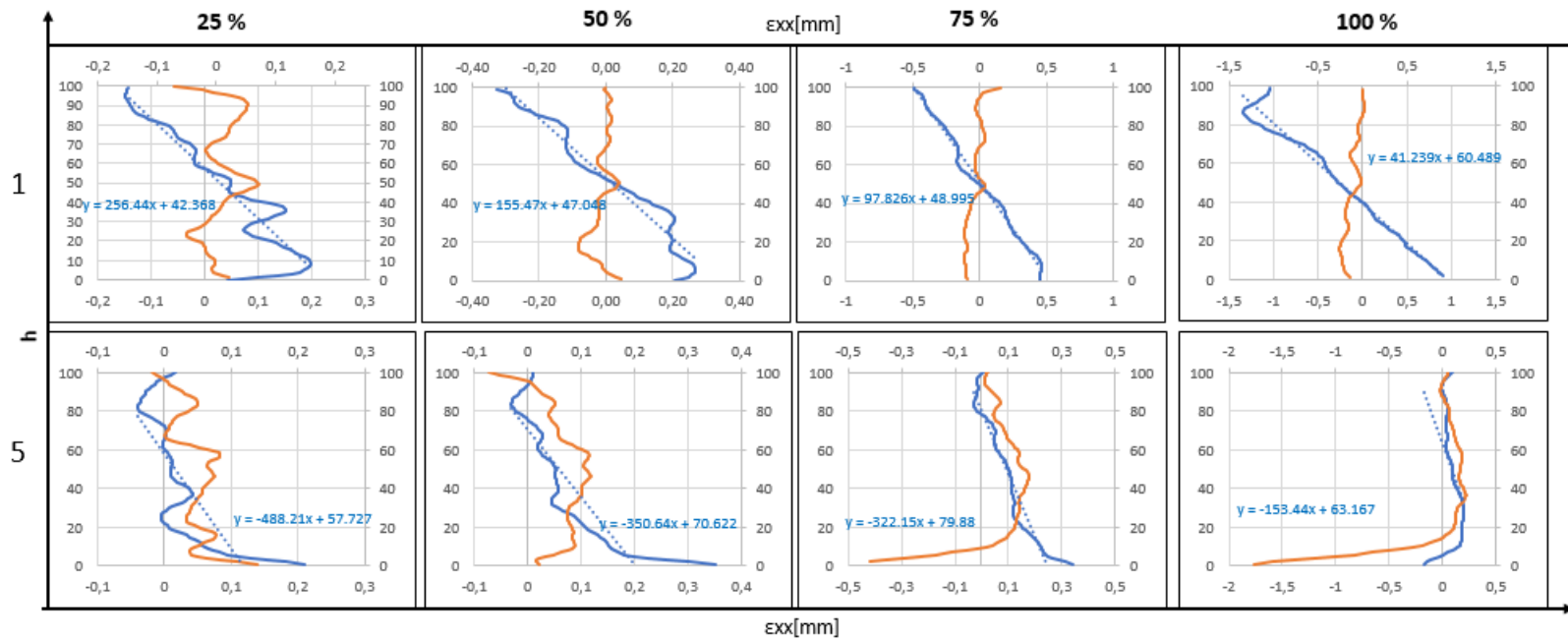
6.3 Distribuce smykových a axiálních poměrných deformací



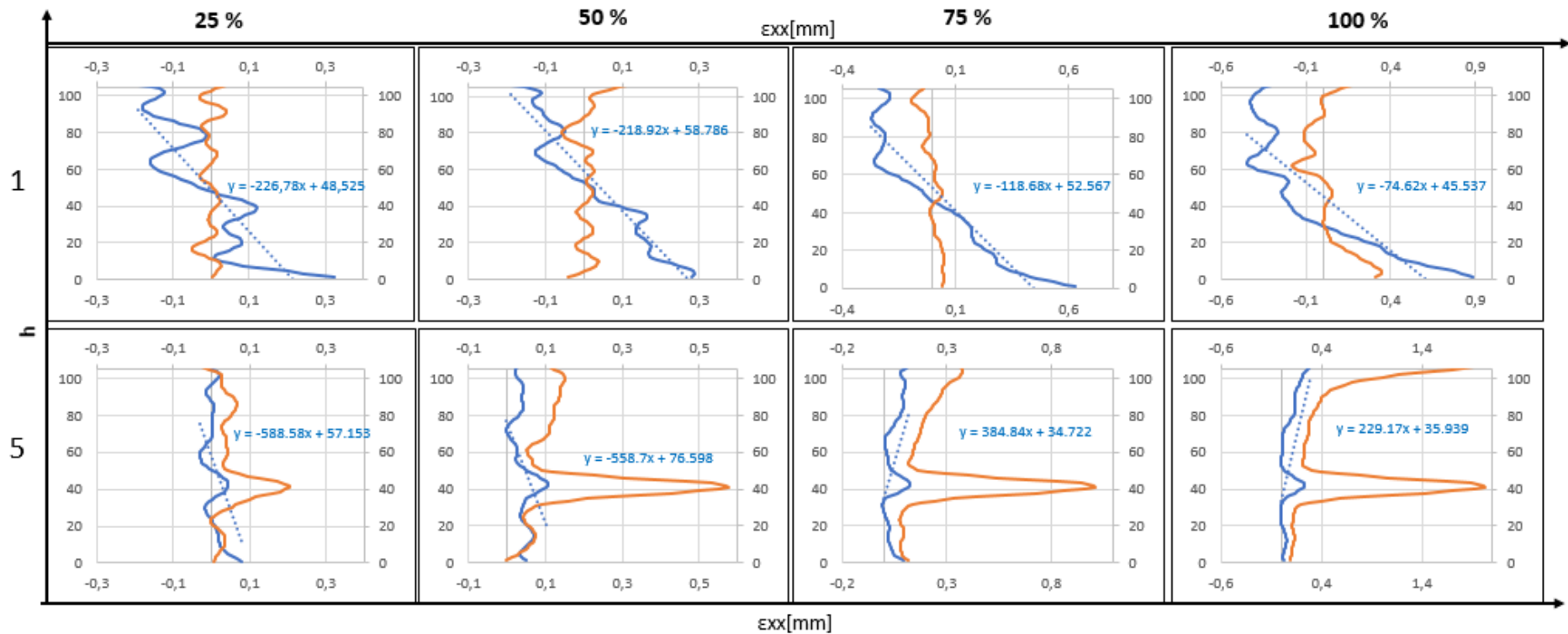
Obr. 27 - Distribuce normálových poměrných deformací ve směru podélné osy nosníku (ϵ_{xx}) a smykových poměrných deformací (ϵ_{xy}) po výšce nosníku (h) pro skupinu Lepený suchý – černý



Obr. 28 - Distribuce normálových poměrných deformací ve směru podélné osy nosníku (ϵ_{xx}) a smykových poměrných deformací (ϵ_{xy}) po výšce nosníku (h) pro skupinu Lepený suchý – červený



Obr. 29 - Distribuce normálových poměrných deformací ve směru podélné osy nosníku (ϵ_{xx}) a smykových poměrných deformací (ϵ_{xy}) po výšce nosníku (h) pro skupinu Masiv suchý



Obr. 30 - Distribuce normálových poměrných deformací ve směru podélné osy nosníku (ϵ_{xx}) a smykových poměrných deformací (ϵ_{xy}) po výšce nosníku (h) pro skupinu Masiv mokrý

Na obr. 27 až 30 jsou distribuce smykových a axiálních poměrných deformací po výšce nosníku na čtyřech úrovních zatížení. První řádek (1) se vztahuje k pozici pod zatěžovacím tlačným trnem a druhý řádek (5) se vztahuje k pozici nad podporovým trnem. V každém obrázku se vždy jedná o jeden vybraný vzorek ze skupiny. Kdy ve všech případech modrá křivka značí axiální poměrné deformace (ϵ_{xx}) a oranžová křivka značí smykové poměrné deformace (ϵ_{xy}). Na křivkách pozorujeme, že s přibývajícím zatížením se ustalují a nedochází u nich k tak častým amplitudám. Toto je s největší pravděpodobností způsobené šumem kamer, který vstupuje do vykreslení poměrných deformací jako oscilace s konstantní velikostí. S rostoucím zatížením se snižuje podíl šumu z užitečného signálu, tudíž oscilace jsou méně patrné. Pokud se podíváme na modré křivky pro pozici (1) vidíme, že s rostoucím zatížením dochází k naklání křivky v důsledku rostoucí tlakové a tahové normálové deformace během zvyšování vnitřního napětí v nosníku. Rozložení axiálních deformací se v těchto případech shoduje s teorií ohybu nosníku (Požgaj et al. 1993), tj. tlakově namáhaná část průřezu vykazuje zápornou normálovou poměrnou deformaci, zatímco tahově namáhaná část průřezu nosníku vykazuje kladnou normálovou poměrnou deformaci.

V pozici (5) se rozložení normálových poměrných deformací po výšce nosníku se vzrůstajícím zatížením téměř nemění, přičemž velikost normálových deformací je menší, což je dáno podstatně menším ohybovým momentem v této oblasti a zároveň přítomností smykové deformace. Podle teorie ohybu by měla smyková poměrná deformace dosahovat svého maxima v neutrální rovině, tj. kolem ve středu výšky nosníku, kde dochází k nejvyššímu smykovému napětí. Taková distribuce deformací by měla být pozorovatelná v pozici (5), kde je značný podíl smykové deformace na rozdíl od pozice (1), která se nachází na hranici s oblastí ohraničenou dvěma tlačnými trny, kde by se smyková deformace neměla vyskytovat vůbec.

Toto se ovšem neprojevuje u skupiny Lepený suchý – červený, u kterého dochází k výše zmiňované distribuci deformací v pozici (1). Tento jev může být způsobený smykovou trhlinou podél nosníku viz obr. 50 v přílohách. V pozici (5) se nám vyskytuje distribuce deformací, kde se vyskytuje značný podíl smykové deformace. Dále lze pozorovat, že jednotlivé peaky, v pozici (5) při max. zatížení se vyskytují vždy v lepené spáře (tj. 20 mm). Z tohoto lze tvrdit, že ve spárách docházelo k největšímu šíření smykového napětí.

V pozici (5) u skupiny Lepený suchý – černý ovšem zmiňovaná distribuce smykových deformací nebyla nalezena. Jeden z faktorů, díky kterému to může být způsobené je kvalita lepení, která ovlivnila rozložení smykové deformace v okolí lepených spár. Objevuje se zde pouze rostoucí lineární část těsně u povrchu nosníku, která v obou případech (1) i (5) nabývá kladných hodnot. Tento jev se projevuje u většiny skupin, s výjimkou Masivu suchého pozice (1). Výše uvedený jev nastává i u axiálních deformací v pozici (5) pro všechny úrovně zatížení a v pozici (1) při max. zatížení. Jelikož se jedná o postupně se zvětšující lineární část během nárůstu zatížení, lze usoudit, že se jedná o vliv tlačných a podpěrných trnů, které lokálně změnily deformační pole.

Z obr. 29 jsou patrné potvrzení teorie ohybu nosníku dle Požgaje et al. (1993). Ovšem v pozici (5) se nevyskytuje výrazná smyková deformace, nýbrž velmi nízká, ovšem v úrovni 40 % výšky nosníku. Poloha této max. poměrné smykové deformace mohla být způsobená vlivem suku.

Z obr. 30 je si třeba povšimnout max. peaků v pozici (5). Domnívám se, že lokální peak axiální deformace byl způsoben přítomností suku. A zvětšující se peak u smykové deformace byl s největší pravděpodobností způsoben smykovou trhlinou podél nosníku, jak je patrné i z obr. 60 v přílohách.

Pokud porovnáme jednotlivé obr. mezi sebou, lze vycházet s tvrzením, že docházelo k srovnatelným axiálním poměrným deformacím. Rozdíl ovšem nastal mezi jednotlivými smykovými deformacemi. Nejpravděpodobnější vliv rozdílu byl lepení u Lepených nosníku na rozdíl od masivních nosníků.

Rovnice lineární spojnice trendu pro axiální poměrnou deformaci byly využity ke stanovení relativní pozice neutrální osy po výšce nosníku. Neutrální osa je definována jako bod po výšce nosníku, kde je nulové normálové napětí, a tedy nulová normálová deformace, proto byla absolutní pozice neutrální osy ztotožněna s absolutním členem v předpisu regresní přímky. Tento způsob stanovení neutrální osy se použil pro všechny analyzované úrovně zatížení.

6.4 Pevnost v ohybu a modul pružnosti v ohybu

Tab. 2 – Souhrnná tabulka s pevností v ohybu (MOR) pro jednotlivé skupiny

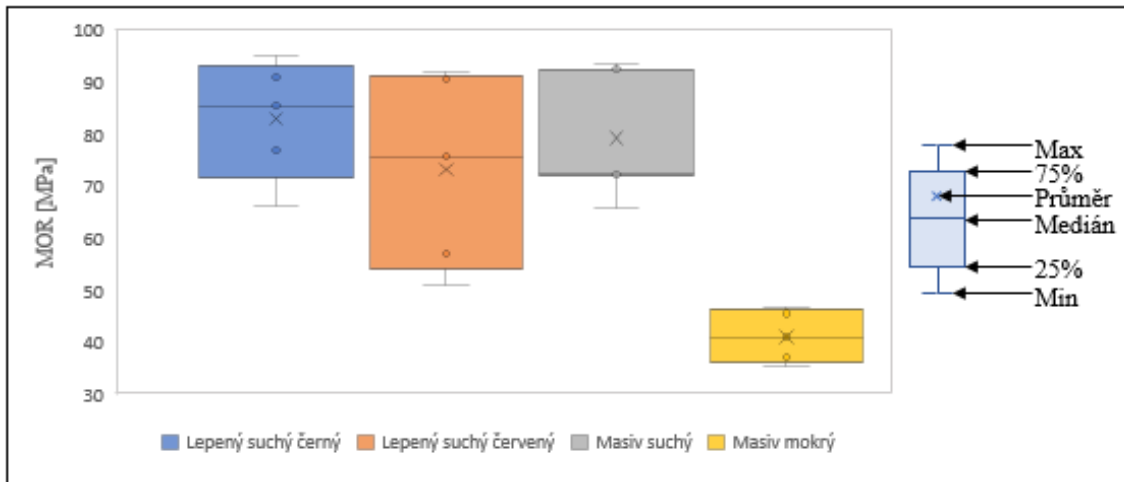
MOR					
Název skupiny vzorků	1	2	3	4	5
Lepený suchý černý	66.42	91.0	94.9	77.1	85.6
Lepený suchý červený	75.9	51.4	90.5	57.1	92.3
Masiv suchý	92.5	65.9	72.3	71.7	93.6
Masiv mokrá	41.1	45.7	35.6	37.3	46.9

Tab. 3 – Popisná statistika pro pevnost v ohybu (MOR) pro jednotlivé skupiny

Název skupiny vzorků	Aritmetický průměr	Směrodatná odchylka	Variační koeficient
Lepený suchý černý	83.01	11.4	0.138
Lepený suchý červený	73.42	18.7	0.255
Masiv suchý	79.20	12.9	0.163
Masiv mokrá	41.32	5	0.121

V Tab. 2 jsou vidět jednotlivé hodnoty pevnosti vypočtené dle vzorce (4), dále v tab. 3 popisnou statistiku pro pevnost v ohybu. Vidíme, že nejnižších hodnot dosahují vzorky Masivu mokrého, což je způsobeno vlhkostí, která dosahovala průměrně 71,5 %. Pokud se podíváme na suché Masivy, vidíme, že jsou zde relativně vysoké hodnoty, až na vzorek číslo 2, který vykazuje vůči ostatním nízkou hodnotu. Takhle nízkou hodnotu lze vysvětlit nižší hustotou s relativně vyšší vlhkostí, kterou tenhle vzorek dosáhl vůči ostatním. Podle mě se jedná o tyto dva hlavní faktory, díky kterým vzorek vykazuje tak nízkou pevnost. Lepené vzorky dosahují vůči masivu relativně srovnatelné až vyšší pevnosti. Je to způsobené hlavně výrobou nosníku, kdy byl brán ohled na reorganizaci vad vrstvením. Ovšem jsou zde vzorky 1, 2 a 4 z Lsčervený a 1, 4 Lsčerný, které vykazují relativně nižší hodnotu vůči ostatním lepeným. Konkrétně u těchto 5 vzorků

došlo během zkoušky k porušení v lepené spáře. Proto se domnívám, že při výrobě došlo k chybě lidského faktoru, z čehož vyplývá, že došlo ke špatnému nanesení lepidla na lamely. Což vyvolalo následnou nízkou pevnost při zkoušce.



Obr. 31– Krabicový graf pro pevnost v ohybu (MOR) pro jednotlivé skupiny vzorků

Z obr. 31 je patrný krabicový graf pro pevnost jednotlivých skupin vzorků. První tři skupiny vzorků se pohybují v podobném intervalu, a to zhruba od 50 do 100 MPa. Pouze krabice skupiny Lepený suchý červený nabývá hodnot s větším rozptylem. To je způsobené již výše diskutovanou nízkou pevností několika vzorků způsobenou pravděpodobně špatným lepením. Toto lze také vyčíst z popisné statistiky z tab. 3, která uvádí největší směrodatnou odchylku pro tuto skupinu, a nejnižší pro Masiv mokrý, který jak můžeme vidět dosahuje i celkově nejnižších hodnot, a to kolem 40 MPa. Domnívám se, že takto nízkých pevností bylo dosaženo přítomností vody, která homogenizuje strukturu dřeva.

Tab. 4 – Souhrnná tabulka s modulem pružnosti v ohybu (MOE) z optiky pro jednotlivé vzorky

MOE					
číslo vzorku	1	2	3	4	5
Lepený suchý černý	9026.547	7718.358	8213.958	8290.429	8598.684
Lepený suchý červený	8721.733	8631.392	8310.587	8001.619	8518.174
Masiv suchý	9231.933	8919.134	7493.301	6696.572	9105.779
Masiv mokrý	4194.302	4054.139	4973.632	4533.829	4641.110

Tab. 5 – Popisná statistika pro modul pružnosti v ohybu (MOE) z optiky pro jednotlivé skupiny

Název skupiny vzorků	Aritmetický průměr	Směrodatná odchylka	Variační koeficient
Lepený suchý černý	8369.595	484.424	0.058
Lepený suchý červený	8436.701	287.657	0.034
Masiv suchý	8289.344	1131.623	0.137
Masiv mokrý	4479.402	365.891	0.082

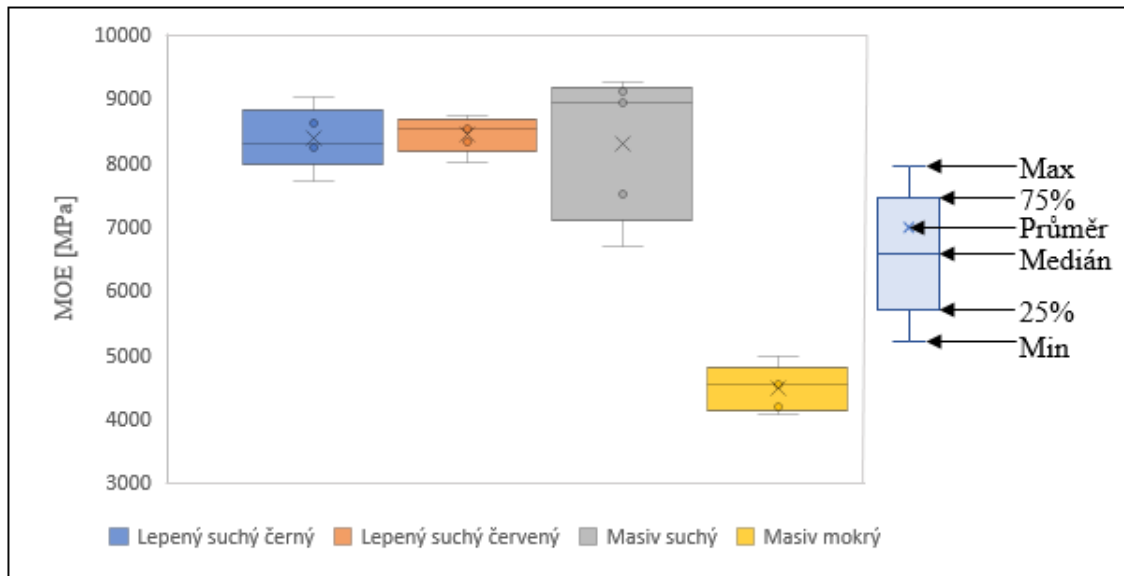
Tab. 6 – Souhrnná tabulka s modulem pružnosti v ohybu (MOE) z příčnicku pro jednotlivé vzorky

MOE					
číslo vzorku	1	2	3	4	5
Lepený suchý černý	7318	7259	7518	7976	8395
Lepený suchý červený	8049	8172	7561	7436	8047
Masiv suchý	9008	8577	6992	6211	8501
Masiv mokrý	3739	3152	4115	3846	3725

Tab. 7 – Popisná statistika pro modul pružnosti v ohybu (MOE) z příčnicku pro jednotlivé skupiny

Název skupiny vzorků	Aritmetický průměr	Směrodatná odchylka	Variační koeficient
Lepený suchý černý	7693.2	482.8	0.063
Lepený suchý červený	7853	330,5	0.042
Masiv suchý	7857.8	1195.4	0.152
Masiv mokrý	3715.4	351.7	0.095

V tab. 4-7 jsou hodnoty a popisnou statistiku modulu pružnosti v ohybu (MOE) stanoveného na základě průhybů měřených Optikou a Příčnickem. Při jednotlivém porovnání zjistíme, že absolutně všechny hodnoty Optiky vykazují razantně vyšší modul pružnosti. Konkrétně rozdíl průměrů u Lepených vzorků činí zhruba 500 MPa. Totéž se dá tvrdit i o Masivu suchém, kde je rozdíl 434 MPa. Skupina Masiv mokrý celkově vykazuje nejnižších hodnot a rozdíl se také pohybuje kolem 500 MPa. Nejvyšších MOE celkově dosahují Lepené vzorky, které jsou v průměru o 150 MPa vyšší oproti Masivu suchému. Tento stav odpovídá pracovním diagramům, na základě, kterých bylo jasné, že modul pružnosti bude muset vycházet ve vyšších hodnotách z důvodu menších průhybů měřených optikou vůči příčnicku. Pokud se podíváme na popisnou statistiku i zde je patrné, že MOE z optiky vykazuje nižší směrodatnou odchylku vyjma skupiny Lepený suchý – černý, která vykazuje vyšší směrodatnou odchylku u optiky než u příčnicku.



Obr. 32– Krabicový graf pro modul pružnosti v ohybu (MOE) z optiky pro jednotlivé skupiny vzorků

Na obr. 32 jsou krabicové grafy pro modul pružnosti jednotlivých skupin vzorků vyhodnocených z optiky. V první řadě si třeba povšimnout, že pouze Masiv suchý vykazuje vysoký rozptyl hodnot, jak jsme již mohli zjistit z popisné statistiky, kde hodnota směrodatné odchylky byla cca 1 100 MPa. Naopak ostatní tři skupiny vykazují směrodatnou odchylku zhruba kolem 300 až 500 MPa. V případě hodnot modulu pružnosti v ohybu dosahuje skupina Masiv mokrý opět nejnižších hodnot v porovnání s ostatními skupinami, což vypovídá o velmi podobné reakci pevnosti a modulu pružnosti v ohybu na změnu vlhkosti, tudíž o jejich těsné kladné korelaci při proměnlivé vlhkosti. Pak tedy lze potvrdit, že čím vyšší MOR, tím vyšší MOE. Hodnota MOE u mokrých vzorků se pohybuje v rozmezí 4 000 – 5 000 MPa. Ostatní tři skupiny dosahují modulu pružnosti téměř přes 9 000 MPa.

6.3.1 Porovnání pevnosti a modulu pružnosti v ohybu s literaturou

Tab. 8 – Hodnoty pevnosti v ohybu udávané v literatuře a naměřené v této studii

	Druh hranolu	Zkušební metoda	Rozměry vzorku b x h x l [mm]	MOR [MPa]	Vlhkost [%]
S.I.Vanin (1955)	Buk masiv	4-bodý ohyb	-	92,182	15
Ugolev (1986)	Buk masiv	4-bodý ohyb	-	106,462	12
Ugolev (1986)	Buk masiv	4-bodý ohyb	-	66,685	30
Lexa (1952)	Buk masiv	-	-	105	12
Ozyhar et al. (2012)	Buk masiv	4-bodý ohyb	20 x 20 x 400	91,8	13
Ozyhar et al. (2012)	Buk masiv	4-bodý ohyb	20 x 20 x 400	58,6	36
Ozyhar et al. (2012)	Buk masiv	4-bodý ohyb	20 x 20 x 400	52,8	113
Frese a Blaß (2007)	Lepený buk (8 vrstvý)	4-bodý ohyb	40 x 115 x 5 100	57,8	9
Frese a Blaß (2007)	Lepený buk (8 vrstvý)	4-bodý ohyb	40 x 115 x 5 100	43,3	10
Frese a Blaß (2007)	Lepený buk (14 vrstvý)	4-bodý ohyb	43 x 115 x 9 000	50,5	12
Papadopoulos (2008)	Buk masiv	4-bodý ohyb	20 × 20 × 360	104,32	-
Papadopoulos (2008)	Lepený buk–impregnovaný	4-bodý ohyb	20 × 20 × 360	34,52	-
Papadopoulos (2008)	Lepený buk	4-bodý ohyb	20 × 20 × 360	59,12	-
Průměrné hodnoty z této studie	Lepený suchý černý	4-bodý ohyb	100 x 100 x 1000	83	11,7
	Lepený suchý červený	4-bodý ohyb	100 x 100 x 1000	73	11,3
	Masiv suchý	4-bodý ohyb	100 x 100 x 1000	79	13,4
	Masiv mokrý	4-bodý ohyb	100 x 100 x 1000	41	71,5

V tab. 8 jsou hodnoty pevnosti v ohybu zkušebních vzorků buku dohledané z literatury. Pokud se podíváme na Masiv mokrý, který v průměru dosahuje pouze 41 MPa s průměrnou vlhkostí 71,5 %, a srovnáme hodnoty s literaturou například dle Ugoleva (1986), který uvádí hodnotu 66,685 MPa při vlhkosti 30 % nebo dle Ozyhara et al. (2012), který uvádí pro masivní buk s vlhkostí 113 % pevnost 52,8 MPa, tak obě literární hodnoty jsou vyšší. Hlavním rozdílným faktorem je to, že uvedené hodnoty byly zjištěny na relativně malých vzorcích, kde není možnost, tak vysoké variability

dřeva nebo také vady v analyzovaném vzorku, které se hojně objevovaly v masivních vzorcích.

Dále Lepené hranoly, kde Frese a Blaß (2007) uvádí hodnoty kolem 40 až 50 MPa s vlhkostí kolem 12 % pro lepený buk, tak se naměřené pevnosti pohybují vysoce nad. Průměrná pevnost pro Lepený černý je 83 MPa a u Lepeného červeného 73MPa. Lze tvrdit, že lepidlo Lear D4, je vhodnější pro lepené nosníky zatěžované na ohyb. Takto vysoké pevnosti u Lepených vzorků si vysvětlují tím, že při výrobě daných lepených hranolů, jsme se snažili dosáhnout tzv. reorganizace vrstvením s cílem dosáhnout rozptýlení vad a zvýšení pevnosti dřeva, což se pravděpodobně vesměs povedlo. Jsou zde, ale dva vzorky Lepené červené, u kterých se hodnota pohybuje kolem 54 MPa. Nicméně, jak jsem již uvedl mohl se jednat o špatné nanesení lepidla při výrobě, a to ovlivnilo tyto konečné pevnosti. Jelikož došlo k porušení v lepené spáře. o

Při srovnání pevností Lepených a masivních vzorků vidíme, že lepení bylo provedeno kvalitně u většiny vzorků, jelikož téměř všechny hodnoty pevnosti Lepených vzorků přesahují průměrnou hodnotu Masivu suchého, a to hodnotu 79MPa. Takto nízká průměrná pevnost je způsobena, tím že zde máme vzorek, u kterého pevnost vyšla pouze 65,88 MPa. Dle mého názoru se jedná o vlivy vad, které nepříznivě ovlivnily výsledky měření pro tento vzorek. Ale pokud se podíváme na jednotlivé pevnosti pro vzorky 1 a 5, které se pohybují kolem 93 MPa, tyto jsou srovnatelné s pevností publikovanou v Ozyhar et. al (2012), který uvádí hodnotu 91,8 MPa a s hodnotami z Vanin (1955), který uvádí hodnotu o něco vyšší 92,182 MPa. Zjištěné pevnosti lze považovat za pravdivé a nijak výrazně odlišné od dohledané literatury. Naopak Ugolev (1986) a Papadopoulus (2008) zase uvádí hodnoty kolem 105 MPa. Ale opět se jedná o hodnoty z malých vzorků, do kterých tolik nezasahují okolní faktory variability dřeva. A celkově se nejedná o tak velký rozdíl. Jsou zde, ale dva vzorky, u kterých je pevnost kolem 73 MPa, což je pro masivní vzorky také relativně nízká hodnota. Takové výsledné hodnoty jsou, jak jsem již uvedl způsobeny vadami, které byly hojně zastoupeny u masivních vzorků. Závěrem lze říci, že naměřené hodnoty se pohybují kolem uvedených hodnot z literatury. Z analýzy lze tvrdit, že Lepené nosníky opravdu dosahují lepší tuhosti a pevnosti než masivní nosníky, ale pouze v případě provedení kvalitního lepení ve výrobě. Což je v souladu s tvrzením Požgaje et al. (1993), který říká, že lepené nosníky mají vyšší pevnost než masivní nosníky. Naopak u skupiny Masiv mokrý, u kterého jsme dosáhli extrémně nízkých hodnot, lze tvrdit, že vysoký obsah vlhkosti v nosnicích má negativní vliv na jejich pevnostní vlastnosti, jak uvádí Bodig a Jayne (1982).

Tab. 9 – Hodnoty modulu pružnosti v ohybu uváděné v literatuře a naměřené v této studii

Převzato	Druh hranolu	Zkušební metoda	Rozměry vzorku b x h x l [mm]	MOE [MPa]	Vlhkost [%]
Ozyhar et al. (2012)	Buk masiv	4-bodý ohyb	20 x 20 x 360	12 400	13
Ozyhar et al. (2012)	Buk masiv	4-bodý ohyb	20 x 20 x 360	9 970	36
Frese a Blaß (2007)	Lepený BUK (8 vrstvý)	4-bodý ohyb	40 x 115 x 5 100	14 400	9
Frese a Blaß (2007)	Lepený BUK (8 vrstvý)	4-bodý ohyb	40 x 115 x 5 100	12 300	10
Frese a Blaß (2007)	Lepený BUK (14 vrstvý)	4-bodý ohyb	43 x 115 x 9 000	14 400	12
(***DIN, 1979 a Vorreiter, 1979)	Buk masiv modifikovaný	4-bodý ohyb	-	14 000 až 15 700	12
Dudescu et al. (2009)	Buk masiv modifikovaný	4-bodý ohyb	-	15 000	12
Papadopoulos (2008)	Buk masiv	4-bodý ohyb	20 × 20 × 360	10 850	-
Papadopoulos (2008)	Lepený buk-impregnovaný	4-bodý ohyb	20 × 20 × 360	6 045	-
Papadopoulos (2008)	Lepený buk	4-bodý ohyb	20 × 20 × 360	9 860	-
Obatay et al. (2007)	Buk masiv	4-bodý ohyb	240 x 8 x 8	12 600	-
Průměrné hodnoty z této studie	Lepený suchý černý	4-bodý ohyb	100 x 100 x 1000	8370	11,7
	Lepený suchý červený	4-bodý ohyb	100 x 100 x 1000	8437	11,3
	Masiv suchý	4-bodý ohyb	100 x 100 x 1000	8289	13,4
	Masiv mokrý	4-bodý ohyb	100 x 100 x 1000	4479	71,5

V tab. 9 jsou opět dohledané hodnoty z literatury s průměrnými hodnotami z analýzy, ale nyní pro modul pružnosti. Pokud se podíváme na modul pružnosti zjištěný pro mokré masivní mokré vzorky vidíme, že průměrná hodnota není nijak vysoká, a to 4 479 MPa. Jedná se o velice nízký průměr, který byl ovlivněn především abnormálně vysokou vlhkostí, která se u těchto nosníků pohybovala v průměru 71,5 % vlhkostí. Z dohledané literatury od Ozyhar et al. (2012) modul pružnosti v ohybu při vlhkosti 36 % činil téměř dvojnásobek naší hodnoty, a to 9 970 MPa. Domnívám se, že takto velký rozdíl je způsobený, a také tím, že modul pružnosti od Ozyhar et al.

(2012) byl analyzován na relativně malých vzorcích oproti vzorkům v tomto experimentu.

Pokud se podíváme na hodnoty Masivu suchého, vidíme první velký rozdíl oproti mokřým. Při 13,4 % vlhkosti vychází modul pružnosti téměř dvojnásobný, a to 8289,344 MPa. Toto ovšem není nijak vysoký modul pružnosti pro masivní nosník, jelikož i tato hodnota je nižší jak od Ozyhar et al. (2012), který měl vlhkost kolem meze hygroskopicity. Obatay et al. (2007), Ozyhar et al. (2012) a Papadopoulos (2008) uvádí modul pružnosti při vlhkosti kolem 12 % průměrně 12 000 MPa. Opět zde vstupuje zásadní faktor, a to ten že hodnoty z literatury byly analyzovány u malých vzorků. Tím pádem do nich nestupuje například faktor vlivů vad a celkový větší prostor pro variabilitu dřeva. Domnívám se ovšem, že se nejedná o zas tak nízké hodnoty, ale při srovnání s Lepenými nosníky vidíme, že jsou nižší.

Vidíme, že obě Lepené skupiny se pohybují výše než suchý masiv. Potvrzuje se, zde zásadní faktor vlivu reorganizace vrstvením za účelem eliminovat či alespoň rozvrstvit vady po celém nosníku, nikoli, jak tomu mohlo být u masivů, kde se vady vykytovali pouze v centrální části, která ovlivnila následný nízký modul pružnosti. Dále si lze povšimnout, že modul pružnosti u Lepených byl vyšší než u Masivu suchého, ale ne o tolik cca o 200 MPa, jak bychom mohli předpokládat. Ale i tak si myslím, že se potvrzuje tvrzení z Požgaj et al. (1993), který tvrdí, že vlivem lepení lamel a reorganizaci vrstvením se zvýší tuhost nosníku. Dále zde vstupuje faktor použitého lepidla. Vidíme, že lepidlo Lignofen (Lčervené) vykazuje o něco vyšší hodnoty. Dále by se tvrdit, že je vhodnější pro použití u lamelových nosníku. Toto ale vyvrací tvrzení o celkové pevnosti, která je uvedena v tab. 8. Kde vidíme pravý opak, a to že se lamely z lepidla Lignofen vykazují celkovou nepatrně nižší pevnost než lamely z Lear D4 lepidla (Lčerné). Hlavně z důvodu dvou nosníků, u kterých bylo provedeno zřejmě špatný proces lepení. Celkově lze tvrdit, že obě lepidla vykazují při lamelových nosnících srovnatelné hodnoty. A hlavně jejich hodnoty se pohybují výše než u masivů.

6.3.2 F a T testy pro modul pružnosti z optiky a příčnicku

Tab. 10 – Dvouvýběrový F-test pro rozptyl a T-test s rovností rozptylů, skupina Lepený suchý černý

Lepený suchý černý			
F-test		T-test	
TK	1.007	TK	2.211
PV	0.498	PV	0.058
KH	6.388	KH	2.306
PS	0.05	PS	0.05
TK<KH	PV>PS	TK<KH	PV>PS
SHODA		SHODA	

kde:

TK...Testové kritérium

PV...Vypočítaná pravděpodobnost

KH...Kritická hodnota

PS...Koeficient alfa

T-test prokázal statisticky nevýznamný rozdíl mezi středními hodnotami modulu pružnosti v ohybu stanoveného na základě průhybu měřeného optickou metodou a příčnickem.

Tab. 11 – Dvouvýběrový F-test pro rozptyl a T-test s rovností rozptylů, skupina Lepený suchý červený

Lepený suchý červený			
F-test		T-test	
TK	1.320	TK	2.979
PV	0.397	PV	0.018
KH	6.388	KH	2.306
PS	0.05	PS	0.05
TK<KH	PV>PS	TK<KH	PV>PS
SHODA		ROZDÍL	

kde:

TK...Testové kritérium

PV...Vypočítaná pravděpodobnost

KH...Kritická hodnota

PS...Koeficient alfa

T-test prokázal statisticky významný rozdíl mezi středními hodnotami modulu pružnosti v ohybu stanoveného na základě průhybu měřeného optickou metodou a příčnickem.

Tab. 12– Dvouvýběrový F-test pro rozptyl a T-test s rovností rozptylů, skupina Masiv suchý

Masiv suchý			
F-test		T-test	
TK	1.116	TK	0.586
PV	0.459	PV	0.574
KH	6.388	KH	2.306
PS	0.05	PS	0.05
TK<KH	PV>PS	TK<KH	PV>PS
SHODA		SHODA	

kde:

TK...Testové kritérium

PV...Vypočítaná pravděpodobnost

KH...Kritická hodnota

PS...Koeficient alfa

T-test prokázal statisticky nevýznamný rozdíl mezi středními hodnotami modulu pružnosti v ohybu stanoveného na základě průhybu měřeného optickou metodou a příčnickem.

Tab. 13– Dvouvýběrový F-test pro rozptyl a T-test s rovností rozptylů, skupina Masiv mokrý

Masiv mokrý			
F-test		T-test	
TK	1.082	TK	3.366
PV	0.470	PV	0.010
KH	6.388	KH	2.306
PS	0.05	PS	0.05
TK<KH	PV>PS	TK<KH	PV>PS
SHODA		ROZDÍL	

kde:

TK... Testové kritérium

PV... Vypočítaná pravděpodobnost

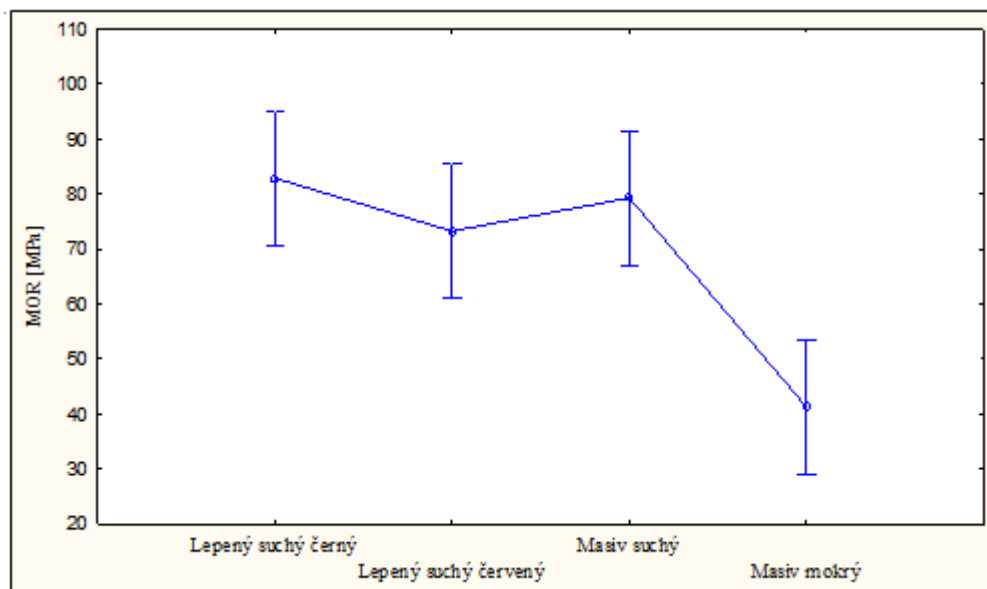
KH... Kritická hodnota

PS... Koeficient alfa

T-test prokázal statisticky významný rozdíl mezi středními hodnotami modulu pružnosti v ohybu stanoveného na základě průhybu měřeného optickou metodou a příčnickem.

6.3.3 Statistické testy pro pevnost a modul pružnosti v ohybu z Optiky

6.3.3.1 ANOVA pro pevnost



Obr. 33 – Graf testu rozptylu ANOVA – MOR

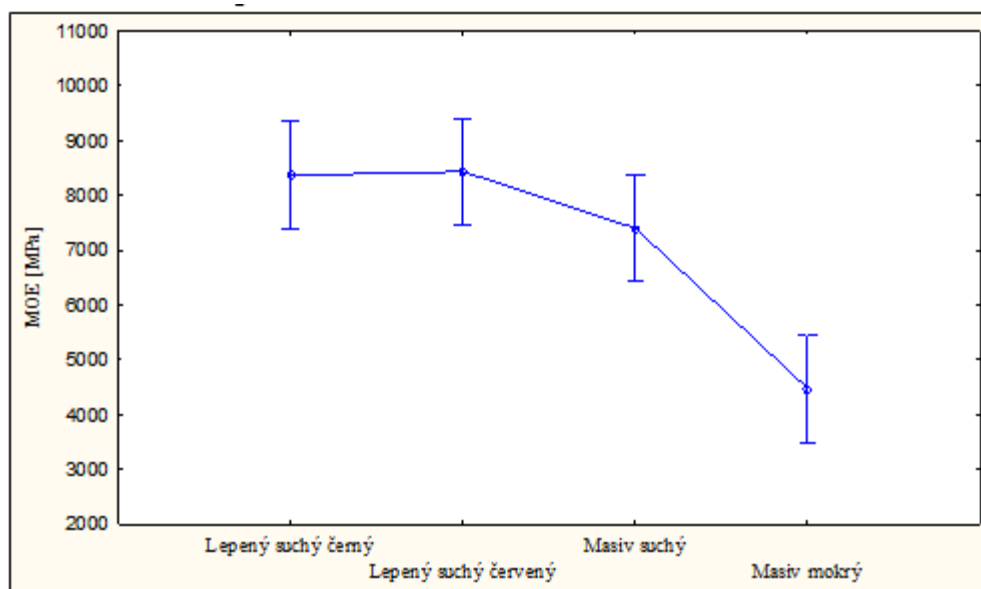
Tab. 14– Mnohonásobné porovnání středních hodnot MOR (Tuckey-test)

Prokázaná rozdílnost souborů: ANO				
Název	Lsčerný	Lsčervený	Msuchý	Mmokrý
Lsčerný		0.648819	0.970502	0.000710
Lsčervený	0.648819		0.880841	0.006137
Msuchý	0.970502	0.880841		0.001481
Mmokrý	0.000710	0.006137	0.001481	

($p < 0,05$ statisticky významný rozdíl, $p > 0,05$ bez statisticky významného rozdílu)

Výsledky testu ANOVY vykazují, že střední hodnoty skupiny Masiv mokrý se vůči ostatním skupinám vzorků liší a nabývají nižších hodnot, z toho lze tvrdit, že jsou statisticky významně odlišné. Ostatní tři skupiny se překrývají, tedy jejich střední hodnoty nejsou statisticky významně odlišné.

6.3.3.2 ANOVA pro modul pružnosti



Obr. 34–Graf testu rozptylu ANOVA – MOE

Tab. 15 – Mnohonásobné porovnání středních hodnot MOE (Tuckey-test)

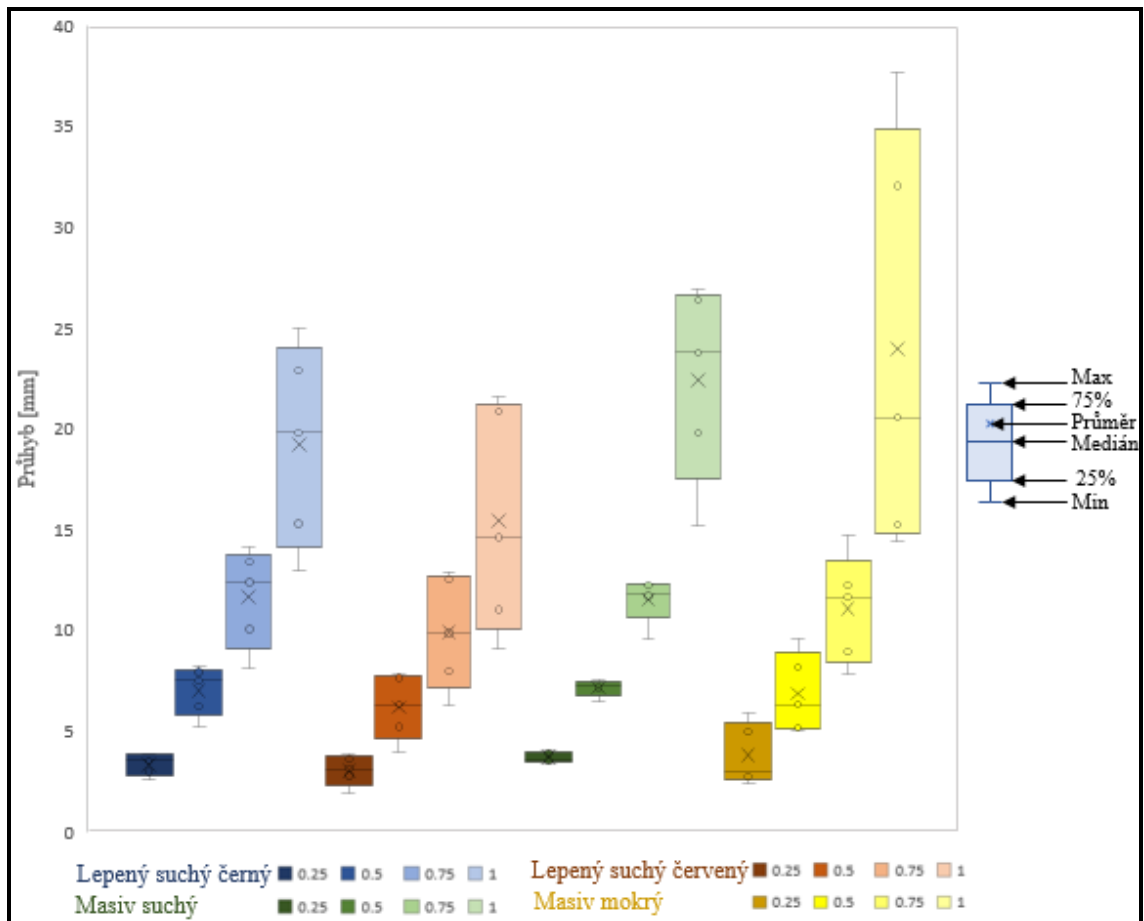
Prokázaná rozdílnost souborů: ANO				
Název	Lsčerný	Lsčervený	Msuchý	Mmokrý
Lsčerný		0,999629	0,471602	0,000277
Lsčervený	0,999629		0,415417	0,000261
Msuchý	0,471602	0,415417		0,002049
Mmokrý	0,000277	0,000261	0,002049	

($p < 0,05$ statisticky významný rozdíl, $p > 0,05$ bez statisticky významného rozdílu)

Z výsledků testu ANOVY je patrné, že střední hodnoty skupiny Masiv mokrý se vůči ostatním skupinám vzorků liší a nabývají nižších hodnot, z toho lze tvrdit, že jsou

statisticky významně odlišné. Ostatní tři skupiny se překrývají, tedy jejich střední hodnoty nejsou statisticky významně odlišné.

6.5 Průhyb

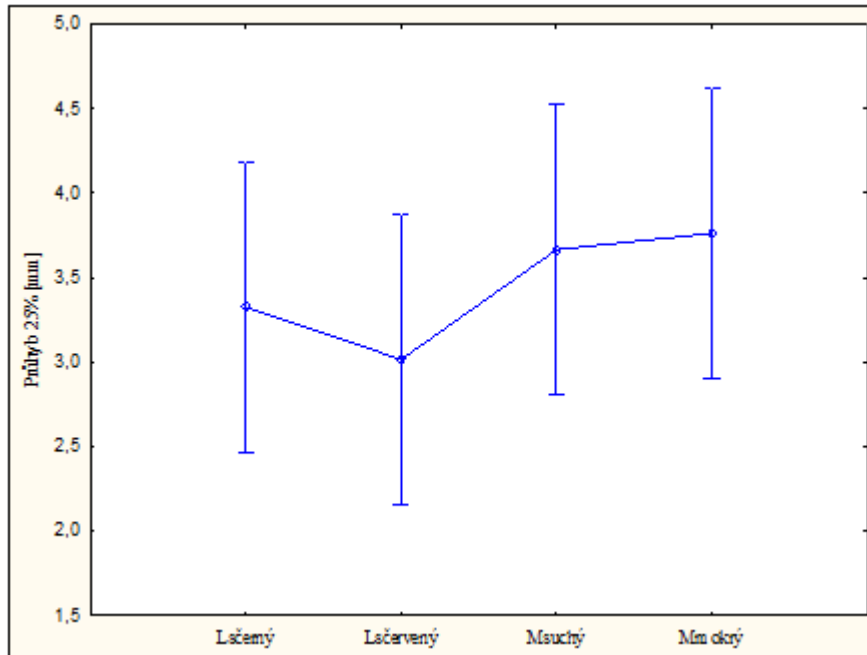


Obr. 35 – Krabicový graf průhybu pro jednotlivé skupiny vzorků

Na obr. 35 jsou krabicové grafy pro jednotlivé skupiny vzorků, na čtyřech úrovních zatížení. U všech skupin rostou hodnoty rozptylu se zvyšujícím se zatížením. Dále zde u Masivu mokrého dochází k největšímu intervalu krabice, kde minimum dosahuje zhruba 15 mm naopak maximum téměř 38 mm. Také průměrná průhyb Lepených se pohybuje níže než pro oba Masivy. Toto je způsobené lepením lamel, kde se zvýšila tuhost nosníku. Také vidíme, že vlhkost nepříznivě ovlivní průhyb nosníku. Lze pozorovat, že u mokrých nosníků dochází k maximálnímu průhybu až o 38 mm. Což je téměř dvojnásobek průhybu od Lepených nosníků suchých.

6.5.1 Statistické testy k Průhybu z optiky

6.5.1.1 ANOVA k průhybu odpovídajícímu 25 % max. zatížení



Obr. 36– Graf testu rozptylu ANOVA k průhybu odpovídajícímu 25 % max. zatížení

Tab. 16 – Mnohonásobné porovnání středních hodnot k průhybu odpovídajícímu 25 % max. zatížení

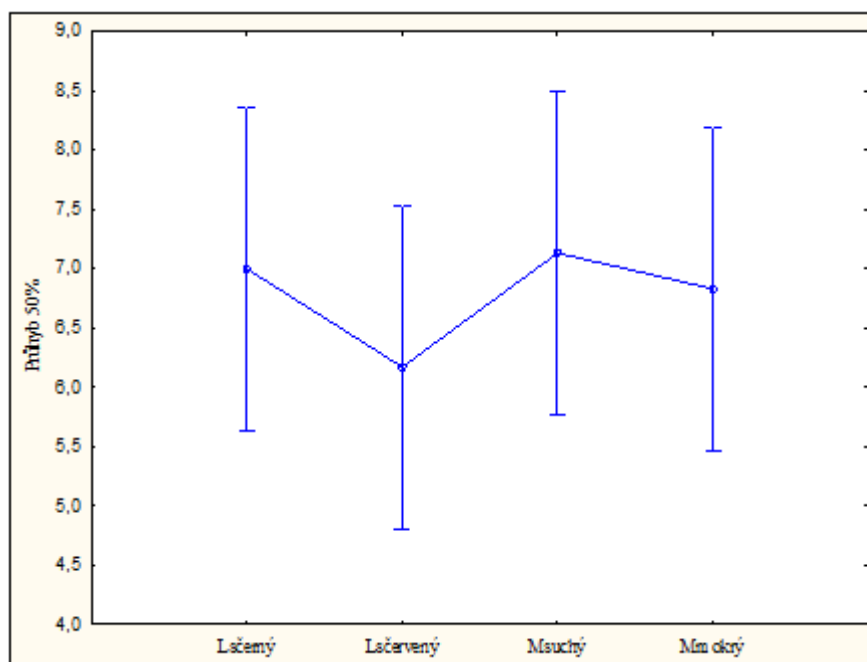
(Tuckey-test)

Prokázaná rozdílnost souborů: NE				
Název	Lsčerný	Lsčervený	Msuchý	Mmokrý
Lsčerný		0.947402	0.932227	0.869546
Lsčervený	0.947402		0.672996	0.572615
Msuchý	0.932227	0.672996		0.998284
Mmokrý	0.869546	0.572615	0.998284	

($p < 0,05$ statisticky významný rozdíl, $p > 0,05$ bez statisticky významného rozdílu)

Výsledky testu ANOVY určili, že střední hodnoty skupin se vůči sobě neliší, z toho lze tvrdit, že nejsou statisticky významně odlišné. Tento fakt lze pozorovat také z tab.16, kde vidíme, že nedochází k statisticky významnému rozdílu.

6.5.1.2 ANOVA k průhybu odpovídajícímu 50 % max. zatížení



Obr. 37–Graf testu rozptylu ANOVA – 50 % úroveň zatížení k průhybu

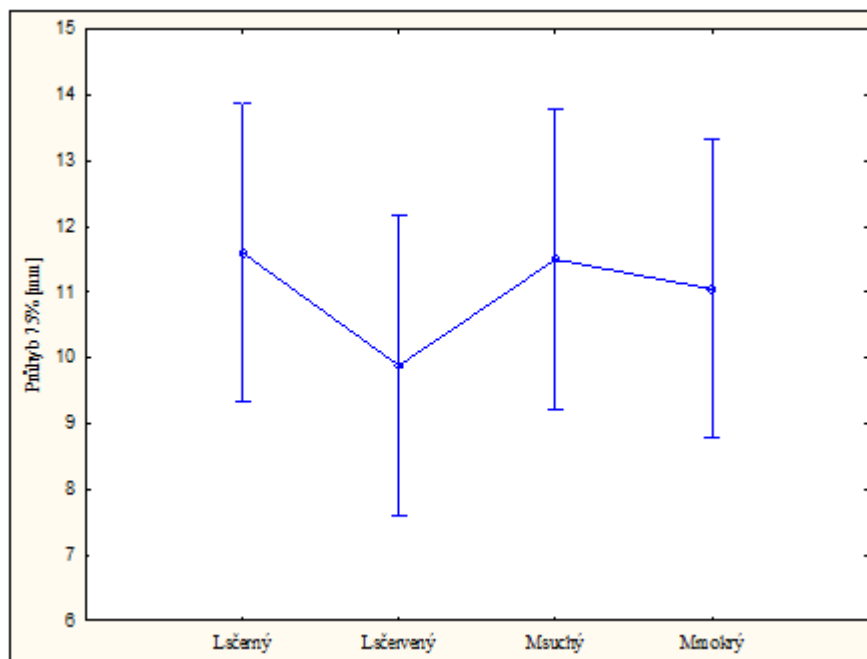
Tab. 17 – Mnohonásobné porovnání středních hodnot k průhybu odpovídajícímu 50 % max. zatížení (Tuckey-test)

Prokázaná rozdílnost souborů: NE				
Název	Lsčerný	Lsčervený	Msuchý	Mmokrý
Lsčerný		0.797878	0.998933	0.997627
Lsčervený	0.797878		0.718795	0.885219
Msuchý	0.998933	0.718795		0.986978
Mmokrý	0.997627	0.885219	0.986978	

($p < 0,05$ statisticky významný rozdíl, $p > 0,05$ bez statisticky významného rozdílu)

Z výsledků testu ANOVY je patrné, že střední hodnoty skupin se vůči sobě neliší, z toho lze tvrdit, že nejsou statisticky významně odlišné. Tento fakt lze pozorovat také z tab.17, kde vidíme, že nedochází k statisticky významnému rozdílu.

6.5.1.3 ANOVA k průhybu odpovídajícímu 75 % max. zatížení



Obr. 38– Graf testu rozptylu ANOVA – 75 % úroveň zatížení k průhybu

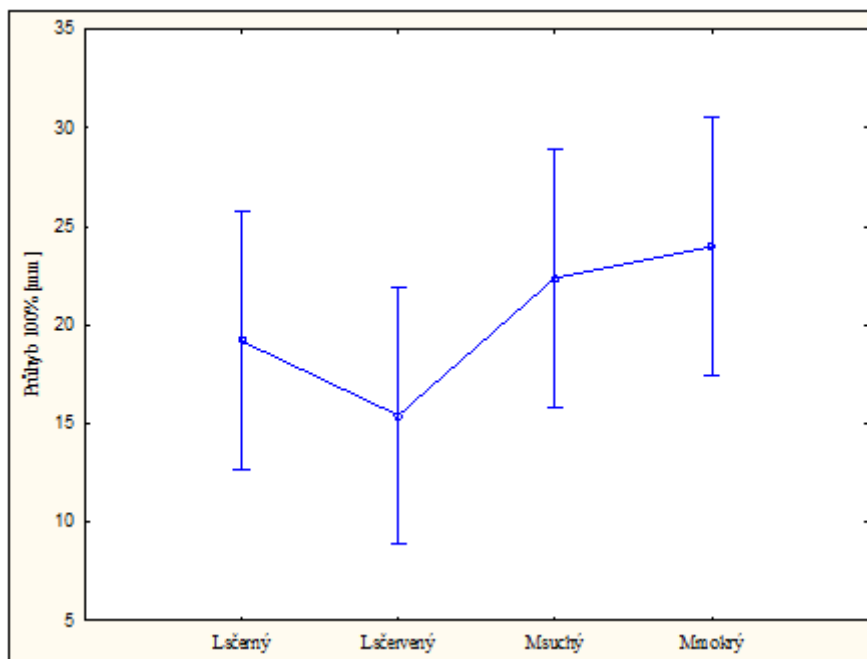
Tab. 18 – Mnohonásobné porovnání středních hodnot k průhybu odpovídajícímu 75 % max. zatížení (Tuckey-test)

Prokázaná rozdílnost souborů: NE				
Název	Lsčerný	Lsčervený	Msuchý	Mmokrý
Lsčerný		0.676285	0.999897	0.983014
Lsčervený	0.676285		0.715277	0.867831
Msuchý	0.999897	0.715277		0.990632
Mmokrý	0.983014	0.867831	0.990632	

($p < 0,05$ statisticky významný rozdíl, $p > 0,05$ bez statisticky významného rozdílu)

Z výsledků testu ANOVY je také patrné, že střední hodnoty skupin se vůči sobě neliší, z toho lze tvrdit, že nejsou statisticky významně odlišné. Tento fakt lze pozorovat také z tab.18, kde vidíme, že nedochází k statisticky významnému rozdílu.

6.5.1.4 ANOVA k průhybu odpovídajícímu 100 % max. zatížení



Obr. 39– Graf testu rozptylu ANOVA – 100 % úroveň zatížení k průhybu

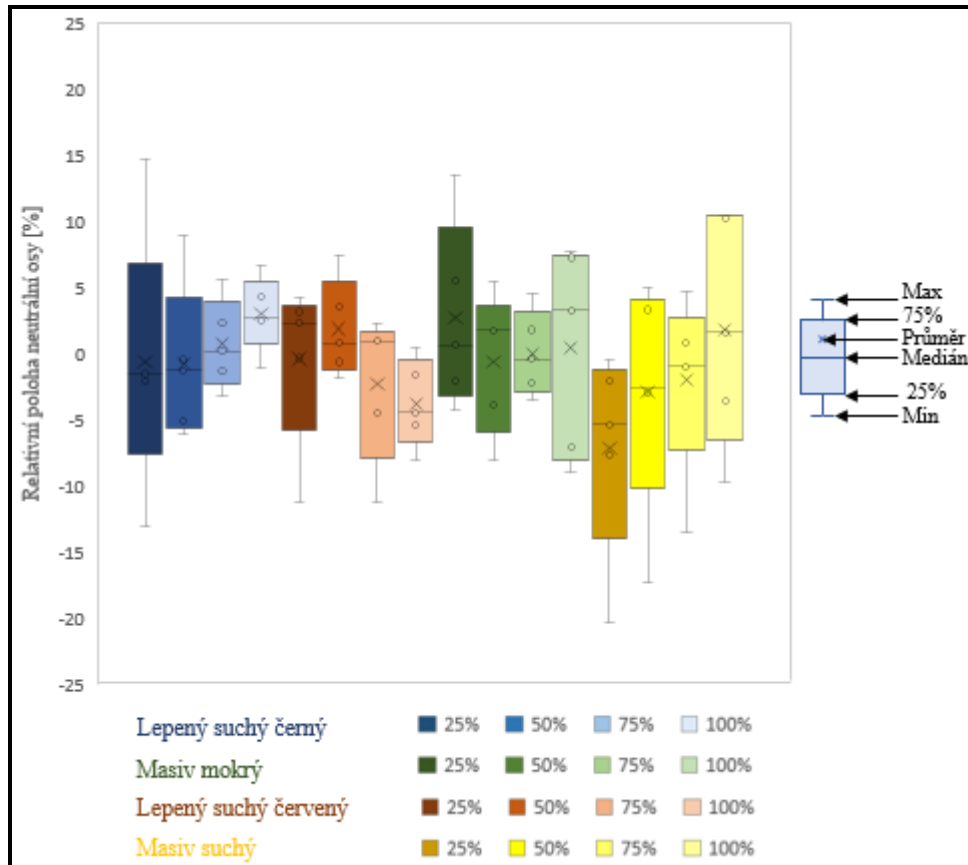
Tab. 19 – Mnohonásobné porovnání středních hodnot k průhybu odpovídajícímu 100 % max. zatížení (Tuckey-test)

Prokázaná rozdílnost souborů: NE				
Název	Lsčerný	Lsčervený	Msuchý	Mmokrý
Lsčerný		0.822734	0.881591	0.695885
Lsčervený	0.822734		0.406335	0.242601
Msuchý	0.881591	0.406335		0.983148
Mmokrý	0.695885	0.242601	0.983148	

($p < 0,05$ statisticky významný rozdíl, $p > 0,05$ bez statisticky významného rozdílu)

Z posledních výsledků testu ANOVY je vidět, že střední hodnoty skupin se vůči sobě neliší, z toho lze tvrdit, že nejsou statisticky významně odlišné. Tento fakt lze pozorovat také z tab.19, kde vidíme, že nedochází k statisticky významnému rozdílu.

6.6 Relativní polohy neutrální osy



Obr. 40– Krabicový graf relativní polohy neutrální osy pro jednotlivé skupiny vzorků

Na obr. 40 jsou relativní polohy neutrální osy (NO) po výšce vzorku, která byla zjišťována v pozici pod horním tlačným trnem, což se zdá být vhodná pozice v rámci délky nosníku vzhledem k maximálnímu ohybovému momentu a zároveň minimálnímu podílu smykových napětí a deformací, které by nepříznivým způsobem ovlivnily přesnost a jednoznačnost stanovení polohy NO. Měření probíhalo opět na čtyřech úrovních zatížení.

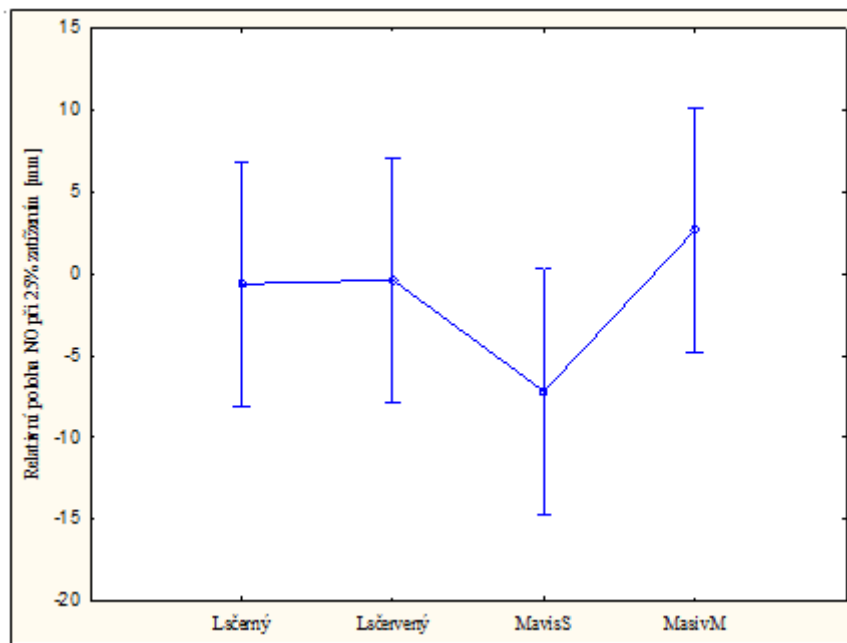
Je Patrné, že u Lepených černých se poloha NO posunuje s rostoucím zatížením směrem k horní tlakové straně. Tento jev se projevuje i u skupiny Masiv suchý. Naopak tomu však je Lepených suchých červených. U mokrých nedochází k nějak výraznému trendu. Dále dle Niemze (2009), který studoval aglomerované materiály DTD a DVD. Jež uvádí polohu NO u těchto materiálu přesně ve středu. Pokud toto srovnáme s výsledky, lze tvrdit, že zde nastává určitá podobnost mezi polohami NO. Kdy u Lepených černých se pohybuje NO kolem 5 %. Naopak u Lepených červených se pohybuje kolem -5 % od středu nosníku.

U Masivních skupin je průměrná poloha NO se také pohybuje kolem středu, ale s razantně větším rozptylem min. a max. Domnívám se, že je to způsobené variabilitou dřeva, přičemž se v analyzované části nosníku mohli vyskytovat suky, které by vychýlili polohu NO. V publikaci od Kollmann a Côté (1968) je uvedena poloha NO pro bezvadé nosníky je kolem 44 %. Toto můžeme potvrdit jen z menší části. Jelikož se NO pohybuje v intervalu 45–60 % výšky nosníku. Z toho lze potvrdit, že se zde vyskytovali suky, které vychýlili polohu NO. Dále lze analýzu porovnat s Betts et al. (2010), který pozoroval polohu NO spíše blíže k vnější straně ohybu

naopak Davis et al. (2012) ji pozoroval spíše k vnitřní straně. Domnívám se, že naše analýza se více shoduje s teorií od Betts et al. (2010), který ovšem analyzoval bezvadé nosníky malých rozměrů.

6.6.1 Statistické testy k relativní poloze neutrální osy

6.6.1.1 ANOVA k relativní poloze neutrální osy na úrovni 25 % maximálního zatížení



Obr. 41– Graf testu rozptylu ANOVA k relativní poloze neutrální osy na úrovni 25 % maximálního zatížení

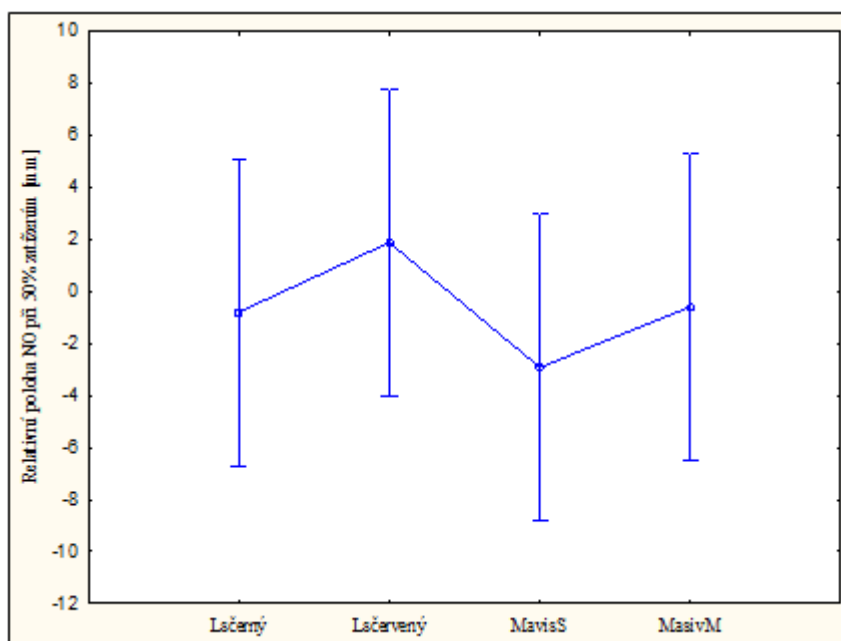
Tab. 20 – Mnohonásobné srovnání středních hodnot relativní polohy neutrální osy na úrovni 25 % zatížení (Tukey-test)

Prokázaná rozdílnost souborů: NE				
Název	Lsčerný	Lsčervený	Msuchý	Mmokrý
Lsčerný		0.999960	0.568580	0.910100
Lsčervený	0.999960		0.539633	0.926787
Msuchý	0.568580	0.539633		0.238462
Mmokrý	0.910100	0.926787	0.238462	

($p < 0,05$ statisticky významný rozdíl, $p > 0,05$ bez statisticky významného rozdílu)

Z výsledků testu ANOVY je patrné, že střední hodnoty skupin se vůči sobě neliší, z toho lze tvrdit, že nejsou statisticky významně odlišné. Tento fakt lze pozorovat také z tab. 20, kde vidíme, že nedochází k statisticky významnému rozdílu.

6.6.1.2 ANOVA k relativní poloze neutrální osy na úrovni 50 % maximálního zatížení



Obr. 42– Graf testu rozptylu ANOVA k relativní poloze neutrální osy na úrovni 50 % maximálního zatížení

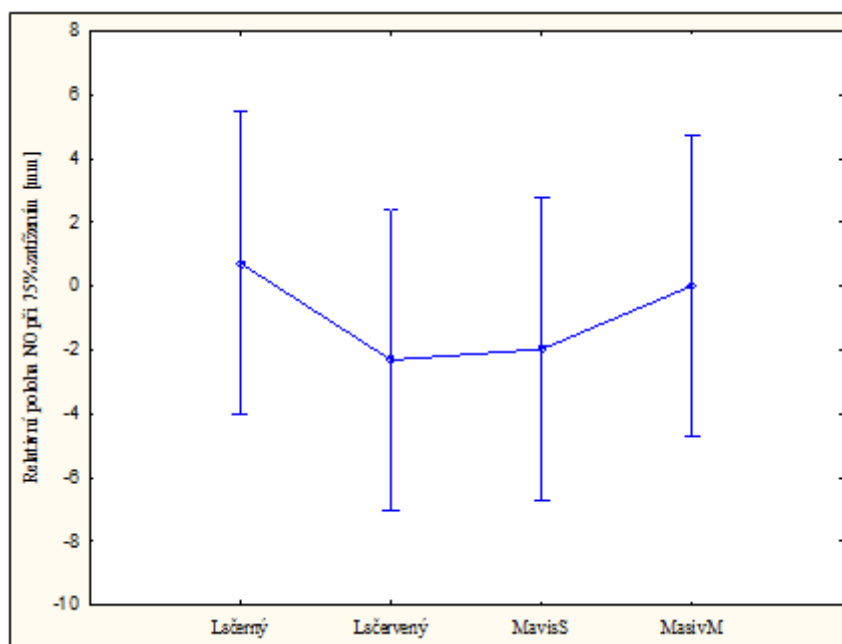
Tab. 21 – Mnohonásobné srovnání středních hodnot relativní polohy neutrální osy na úrovni 50 % zatížení (Tukey-test)

Prokázaná rozdílnost souborů: NE				
Název	Lsčerný	Lsčervený	Msuchý	Mmokrý
Lsčerný		0.903885	0.947873	0.999955
Lsčervený	0.903885		0.624597	0.921815
Msuchý	0.947873	0.624597		0.933367
Mmokrý	0.999955	0.921815	0.933367	

($p < 0,05$ statisticky významný rozdíl, $p > 0,05$ bez statisticky významného rozdílu)

Na výsledcích testu ANOVY je vidět, že střední hodnoty skupin se vůči sobě neliší, z toho lze tvrdit, že nejsou statisticky významně odlišné. Tento fakt lze pozorovat také z tab. 21, kde vidíme, že nedochází k statisticky významnému rozdílu.

6.6.1.3 ANOVA k relativní poloze neutrální osy na úrovni 75 % maximálního zatížení



Obr. 43– Graf testu rozptylu ANOVA k relativní poloze neutrální osy na úrovni 75 % maximálního zatížení

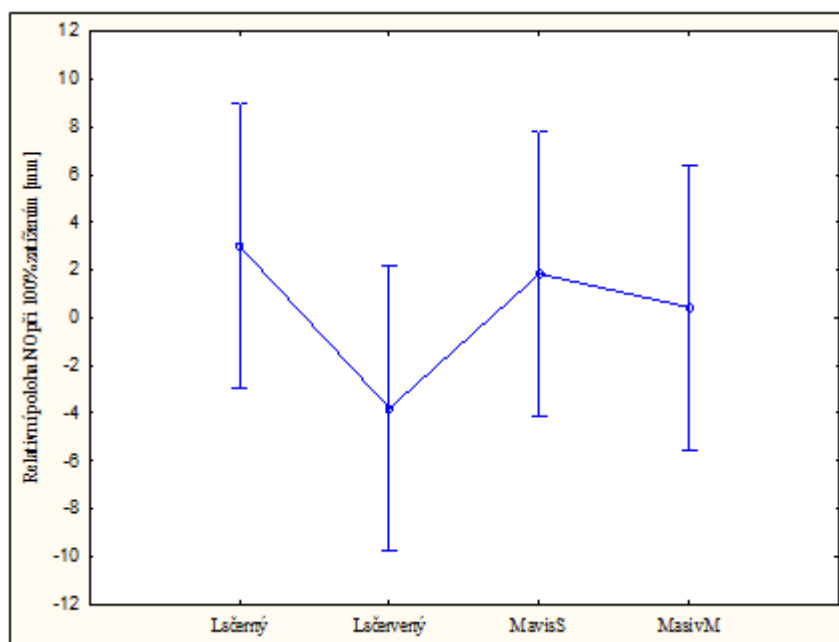
Tab. 22 – Mnohonásobné srovnání středních hodnot polohy neutrální osy na úrovni 75 % zatížení (Tukey-test)

Prokázaná rozdílnost souborů: NE				
Název	Lsčerný	Lsčervený	Msuchý	Mmokrý
Lsčerný		0.772840	0.827435	0.995927
Lsčervený	0.772840		0.999594	0.880840
Msuchý	0.827435	0.999594		0.920612
Mmokrý	0.995927	0.880840	0.920612	

($p < 0,05$ statisticky významný rozdíl, $p > 0,05$ bez statisticky významného rozdílu)

Z výsledků testu ANOVY je patrné, že střední hodnoty skupin se vůči sobě neliší, z toho lze tvrdit, že nejsou statisticky významně odlišné. Tento fakt lze pozorovat také z tab. 22, kde vidíme, že nedochází k statisticky významnému rozdílu.

6.6.1.4 ANOVA k relativní poloze neutrální osy na úrovni 100 % maximálního zatížení



Obr. 44– Graf testu rozptylu ANOVA k relativní poloze neutrální osy na úrovni 100 % maximálního zatížení

Tab. 23 – Mnohonásobné srovnání středních hodnot relativní polohy neutrální osy na úrovni 100 % zatížení (Tukey-test)

Prokázaná rozdílnost souborů: NE				
Název	Lsčerný	Lsčervený	Msuchý	Mmokrý
Lsčerný		0.353741	0.990870	0.916512
Lsčervený	0.353741		0.511463	0.717145
Msuchý	0.990870	0.511463		0.984945
Mmokrý	0.916512	0.717145	0.984945	

($p < 0,05$ statisticky významný rozdíl, $p > 0,05$ bez statisticky významného rozdílu)

U posledních výsledků testu ANOVY taktéž patrné, že střední hodnoty skupin se vůči sobě neliší, z toho lze tvrdit, že nejsou statisticky významně odlišné. Tento fakt lze pozorovat také z tab. 23, kde vidíme, že nedochází k statisticky významnému rozdílu.

6.7 Využití v praxi

Dřevo buku vykazuje relativně dobré pevnostní a pružnostní charakteristiky v ohybu pro využití v praxi, avšak se domnívám, že se bude spíše využívat s kombinací s jinými kompozity, a to hlavně z důvodu poměrně vysoké hustoty, na rozdíl od aktuálně nejvíce využívaného smrku. Dále digitální korelace obrazu dle mého názoru najde v budoucnu vysoké uplatnění a plně nahradí nynější prováděné analýzy. Jedná o přesnější a stále více se vyvíjející zkušební metodu.

7 Závěr

Cílem bakalářské práce bylo v první řadě porovnat napětově-deformační chování jednotlivých skupin nosníků prostřednictvím statistického zhodnocení podobnosti pevnostních a pružnostních charakteristik získaných na základě pracovních diagramů.

Při srovnávání pevnostních a pružnostních charakteristik lze tvrdit, že ačkoli se naše výsledky pohybovaly relativně níž než hodnoty dohledané z literatury, stále se můžeme opírat o tvrzení, že vlivem lepení lamel lze dosáhnout příznivějších výsledků. Také se potvrdilo, že vysoká vlhkost má nepříznivý vliv na pevnostní a pružnostní charakteristiky masivních nosníků zatížených v ohybu. Což nám potvrdily i výsledky ANOV, které vykazovaly statisticky významné rozdíly Masivu mokrého vůči ostatním skupinám u modulu pružnosti. V neposlední řadě byla provedena analýza průhybu nosníku při čtyřech úrovních zatížení. Potvrdilo se, že výrobou nosníků z lamel lze dosáhnout vyšší tuhosti a tím menšího průhybu na dané úrovni zatížení. Ovšem výsledky ANOV neprokázaly statisticky významné rozdíly.

Dalším cílem bylo analyzovat distribuci a velikost deformací na povrchu nosníků během zatížení pomocí plno-polní optické metody využívající princip korelace digitálního obrazu. Na základě plno-polních dat deformace byla rekonstruována distribuce poměrných axiálních a smykových deformací po výšce nosníku. Dále byla stanovena relativní poloha neutrální osy (NO) po výšce nosníku při čtyřech úrovních zatížení. Vyhodnocená data pozice NO byla ve větší míře srovnatelná s literaturou, která uváděla polohu NO u bezvadých rozměrově srovnatelných konstrukčních nosníků nad středem výšky nosníku. Všechny výsledky ANOV, které zde proběhly, neprokázaly statisticky významné rozdíly vůči sobě, při všech analyzovaných úrovních zatížení.

Optické měření deformací také odhalilo nepřesnost konvenční metody měření průhybu nosníku na základě pozice příčnicku. Při srovnávání pracovních diagramů sestavených na základě průhybů z optického měření a z pozice příčnicku bylo prokázáno, že optické měření poskytuje přesnější hodnoty průhybu. Chyba průhybu z příčnicku se pohybovala v intervalu 0,5-8 mm, přičemž za hlavní příčinu nepřesné hodnoty z příčnicku lze považovat otlacení tlačných a podpěrných trnů. Rozdíl se projevil nejvíce u mokrých nosníků.

8 Summary

The aim of bachelor's work was in a first place to compare the behavior in tension and deformation of the individual groups of beams by using statistical evaluation of similarity strength and elasticity characteristics achieved from working diagrams.

During comparing characteristics it is possible to claim that our results were relatively lower than results from literature, but we can still lean on the statement, that it is possible to achieve better results by gluing segments together. It was also proved, that high humidity has unfavourable influence on characteristics of strength and elasticity for beams made out of solid wood in bending strain. This was confirmed also by results ANOV, which has showed statistically significant differences for group Wet solid wood against other groups from modular of elasticity. In the least, there was made an analysis of the bend of beam in four levels of strain. It was proved that fabrication beams out of glued segments of wood together achieves better toughness and lower bend on the specific level of strain. But the results ANOV did not proved statistically significant differences.

The other aim was to analyse the distribution and the value of deformations on the surface of beam during stain by using full-field optical method using digital correlation. On the basics from full-field data from deformation it was reconstructed the distribution from proportionally axial and shear deformations on the height of beam. The relative position of neutral axle (NA) was also determined on the height of beams for four levels of strain. The valued data for NA were mostly able to be compared with literature, which presented the position of NE for the same sized beams without defects up on the middle of height of beams. All the results of ANOV, which had performed, did not proved statistically significant differences against each other for all levels of strain.

The optical measuring of deformations also showed the inaccuracy of conventional method for measuring the bend of beam on the base of the position of crosshead. Based on the comparing of diagrams for the progress of work which were created from the bend of beam from optical measuring and the position of beam was also proved, that optical measuring provides more accurate values for bending. The mistake of the bend from crosshead was in the interval of 0,5–8 mm, the main reason for the mistakes were the prints of pushing and supporting spikes. The difference has mainly showed for wet beams.

9 Seznam literatury

SAAH C. BETTS, THOMAS H. MILLER AND RAKESH GUPTA, 2010 Location of the neutral axis in wood beams: A preliminary study, *Wood and Material Science and Engineering*, 5: 173-180 s

BODIG, J. -- JAYNE, B A., 1993 *Mechanics of Wood and Wood Composites*. Malabar: Krieger Publish.Comp. 712 s.

ČSN EN 408 + A1, 2012. *Dřevěné konstrukce-Konstrukční dřevo a lepené lamelové dřevo-Stanovení některých fyzikálních a mechanických vlastností*, 32 s.

ČSN 49 0103,1979. *Dřevo. Zisťovanie vlhkosti při fyzikálních a mechanických skúškách* Praha: Vydavatelství Úřadu pro normalizaci a měření, 8 s.

PHILIP M. DAVIS, RAKESH GUPTA AND ARIJIT SINHA, 2012 Revisiting the neutral axis in wood beams, *Holzforschung*. Vol. 66, pp. 497–503 s

DIN; DIN 4076 Teil 1, Oktober 1985 / DIN 68364, November 1979; Beuth-Verlag

F. J. DOYLE.,1964. The historical development of analytical photogrammetry. *Photogrammetric Engineering*, The Autometric Corporation, Washington, D. C.,259-265 s.

CRISTIAN MIRCEA DUDESCU, BOTEAN ADRIAN, MIHAIL HARDAU,2009. Application of digital image correlation for measuring e-modulus of wood beams,2 s.

FRESE, M., AND H. J. BLAß., 2007. Characteristic bending strength of beech glulam. *Materials and structures* 40.1. 3-13 s.

GANDELOVÁ, L., HORÁČEK, P., ŠLEZINGEROVÁ J., 2006. *Nauka o dřevě*. 1. vyd. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 176 s.

ERWIN HACK, ANN SCHUMACHER,2007. DSPI strain measurement on an externally reinforced bending beam: A comparison of step-by-step addition and pixel shift correlation, *Optics and Lasers in Engineering* 45, 589–595 s

ANON GILBERT LOUIS HOBROUGH, 2003. *The Photogrammetric Record*.

HORÁČEK, P., 2008. *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva I*. Vyd. 1. V Brně: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 124 s.

KOLLMANN, F F P. -- CÔTÉ, W A, 1968. *Principles of wood science and technology. Solid wood . I*. Berlin: Springer, 592 s.

LaVision: Digital Image Correlation. LAVISION. *Technique: Digital Image*

Correlation [online]. Dostupné z: <http://www.lavision.de/en/techniques/digital-image-correlation.php>

- LEXA, J. a kol.,1952. Mechanické a fyzikálne vlastnosti dreva, I. Svazok technologic dreva. Bratislava: Práca,. 436 s.
- MATOVIC, A., 1993. Fyzikální a mechanické vlastnosti dreva a materiálu na bázi dreva, Brno: MZLU, 212 s.
- MCNEILL, S.R. a M. PAQUETTE,1988. Initial Studies of Stereo Vision for Use in 3-D Deformation Measurements. Univ. South Carolina, SC.
- NIEMZ, P., A.J. BRUNNER a O. WALTER, 2009 Investigation of the mechanism of failure behaviour of wood based materials using acoustic emission analysis and image processing. Wood Research, 49-62 s.
- EIICHI OBATAYA, PETER KITIN, HIDEFUMI YAMAUCHI, 2007 Bending characteristics of bamboo (*Phyllostachys pubescens*) with respect to its fiber–foam composite structure, 16 s.
- OŻYHAR TOMASZ, STEFAN JÜSTRICH, and PETER NIEMZ.,2012. Tensile, compressive and bending properties of European beech wood at high moisture levels. Warsaw University of Life Sciences, 135 s.
- PETERS, W. H. a W. F. RANSON, 1982. Digital Imaging Techniques In Experimental Stress Analysis. Optical Engineering
- POST, D. a B. HAN, 2008 Moiré Interferometry. Springer handbook of experimental solid mechanics. W.N. Sharpe Jr. Berlín: Springer, s. 627-654.
- ANTONIOS N. PAPADOPOULOS,2008 The effect of acetylation on bending strength of finger jointed beech wood (*Fagus sylvatica*L, Holz Roh Werkst 66: 309–310 s.
- POŽGAJ, A. -- CHOVANEC, D. -- KURJATKO, S. -- BABIAK, M., 1993.Štruktúra a vlastnosti dreva. 1. vyd. Bratislava: Príroda, 485 s.
- RASTOGI, P.K. (Editor), 2000. Photomechanics. Topics in Applied Physics. Berlín Heidelberg: Springer-Verlag, 472 s.
- SHARPE, W N., 2008. Springer handbook of experimental solid mechanics. Berlin: Springer, 1098 s.
- SUTTON, M A. -- ORTEU, J. -- SCHREIER, H W.,2009. Image correlation for shape, motion and deformation measurements: basic concepts, theory and applications. New York: Springer, 321 s.
- PERELYGIN L. M., UGOLEV, B. N.,1971. Wood Science (in Russian). Lesnaja Promischelenost. Moskva, 1971. 288 s.
- VANIN, S.I., 1955. Nauka o dřevě. Praha: SNTL.,428 s.

VORREITER, L.,1949. Holztechnologisches Handbuch; 1. Band Verlag Georg Fromme & Co.; Wien.

WAKEFIELD, W. E.,1957 Determination of the strength properties and physical characteristics of Canadian woods, For. Prod. Labs.Canada, Bull. No. 119, Ottawa, Canada, 64 s.

WANGAARD, F. F. A, 1957 new approach to the determination of fiber saturation point from mechanical testing. For. Prod. J. 7(11):410-416 s.

10 Seznam příloh

10.1 Zkušební vzorky po provedené zkoušce



Obr. 45- Vzorek č.1 ze skupiny Lepený suchý černý, po zkoušce



Obr. 46- Vzorek č.2 ze skupiny Lepený suchý černý, po zkoušce



Obr. 47- Vzorek č.3 ze skupiny Lepený suchý černý, po zkoušce



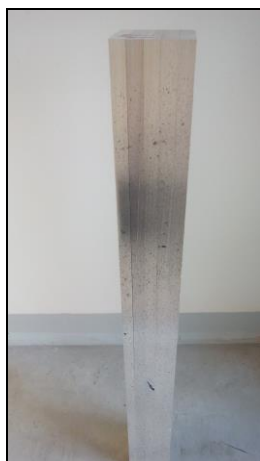
Obr. 48- Vzorek č.4 ze skupiny Lepený suchý černý, po zkoušce



Obr. 49 - Vzorek č.5 ze skupiny Lepený suchý černý, po zkoušce



Obr. 50 - Vzorek č.1 ze skupiny Lepený suchý červený, po zkoušce



Obr. 51 - Vzorek č.2 ze skupiny Lepený suchý červený, po zkoušce



Obr. 52 - Vzorek č.3 ze skupiny Lepený suchý červený, po zkoušce



Obr. 53 - Vzorek č.4 ze skupiny Lepený suchý červený, po zkoušce



Obr. 54 - Vzorek č.5 ze skupiny Lepený suchý červený, po zkoušce



Obr. 55 - Vzorek č.1 ze skupiny Masiv suchý, po zkoušce



Obr. 56 - Vzorek č.2 ze skupiny Masiv suchý, po zkoušce



Obr. 57 - Vzorek č.3 ze skupiny Masiv suchý, po zkoušce



Obr. 58 - Vzorek č.4 ze skupiny Masiv suchý, po zkoušce



Obr. 59 - Vzorek č.5 ze skupiny Masiv suchý, po zkoušce



Obr. 60 - Vzorek č.1 ze skupiny Masiv mokrý, po zkoušce



Obr. 61 - Vzorek č.2 ze skupiny Masiv mokrý, po zkoušce



Obr. 62 - Vzorek č.3 ze skupiny Masiv mokrý, po zkoušce



Obr. 63 - Vzorek č.4 ze skupiny Masiv mokrý, po zkoušce



Obr. 64 - Vzorek č.5 ze skupiny Masiv mokrý, po zkoušce