

Mendelova univerzita v Brně
Lesnická a dřevařská fakulta
Ústav nauky o dřevě

**Analýza mechanických vlastností
balzového dřeva na mesoúrovni pomocí
zkušebního stroje iErudio**
Diplomová práce

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem práci: Analýza mechanických vlastností balzového dřeva na mesoúrovni pomocí zkušebního stroje iErudio zpracovala 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 vědoma, že se na moji práci vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, a že Mendelova univerzita v Brně má právo na uzavření licenční smlouvy a užití této práce jako školního díla podle §60 odst. 1 autorského zákona.

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

V Brně, dne:

podpis studenta

Poděkování:

Na tomto místě bych chtěla poděkovat vedoucímu mé diplomové práce panu Ing. Vaclavu Seberovi, Ph.D. za ochotu a trpělivost při konzultacích a při řešení otázek týkajících se tématu této práce. V neposlední řadě děkuji své rodině a přátelům za podporu během studia.

Jméno: Olga Grossová

Název: Analýza mechanických vlastností balzového dřeva na mesoúrovni pomocí zkušebního stroje iErudio.

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá analýzou mechanických vlastností balzového dřeva na mesoúrovni pomocí zkušebního stroje iErudio. Cílem práce je experimentálně zjistit mechanické vlastnosti i balzového dřeva (*Ochroma lagopus*). Na prototypu minitrhačky iErudio je provedena sada měření. Konkrétně tahová a ohybová zkouška. Dalším cílem je stanovit Poissonova čísla na měřených rovinách. Tyto vlastnosti budou získány z obrazových dat pořízených zařízením iErudio a počítány metodou korelace digitálního obrazu. Dalším cílem je provést zhodnocení práce s prototypem zařízení, poukázat na výhody a nevýhody. Pro vyhodnocení dat je použit komerční výpočetní program VIC 3D a Mercury RT, které zpracovávají výsledky metodou korelace digitálního obrazu. Práce nám poskytla potvrzení mechanických charakteristik balzy a také vhodnost použití „minitrhačky“ iErudio při prováděných zkouškách.

Klíčová slova: Balza, tlak podél vláken a kolmo na vlákna, tah podél vláken a kolmo na vlákna, statický ohyb, mez pevnosti, modul pružnosti, Poissonovo číslo.

Name: Olga Grossová

Title: Analysis of the mechanical properties of balsa wood mesolevel using the test machine iErudio.

Abstract

This thesis analysis the mechanical properties of balsa wood mesolevel using the test machine iErudio. The thesis aim is to experimentally determine the mechanical properties of balsa wood (*Ochroma lagopus*). On the prototype minimachine iErudio is a set of measurements. Specifically, tensile and bending tests. Another objective is to determine the Poisson ratio on measured levels. These properties will be obtained from image data recorded device iErudio and calculated using the digital image correlation. Another objective is to evaluate the work done with the prototype device, point out the advantages and disadvantages. To analyse data using a commercial computer program VIC 3D and Mercury RT, which process the results using digital image correlation. The work has provided us with confirmation of mechanical characteristics of balsa and the suitability of using "minimachine" iErudio the performed tests.

Keywords: Balsa, pressure along the fiber and perpendicular to the fibers, tension along the fibers and perpendicular to the fibers, static bending, boundary of strenght, modulus of elasticity, Poisson's ratio.

Obsah

1	Úvod	9
2	Cíl práce.....	10
3	Literární přehled	11
3.1	Mechanické vlastnosti dřeva	11
3.1.1	Mechanické namáhání dřeva	12
3.2	Pevnost dřeva	12
3.2.1	Pevnost dřeva v ohybu	12
3.2.2	Pevnost dřeva v tlaku podél vláken	13
3.2.3	Pevnost dřeva v tlaku kolmo na vlákna	14
3.2.4	Pevnost dřeva v tahu podél vláken	15
3.2.5	Pevnost dřeva v tahu napříč vlákna	15
3.2.6	Pevnost dřeva ve smyku	16
3.3	Pružnost dřeva.....	16
3.3.1	Modul pružnosti dřeva	16
3.3.2	Poissonova čísla.....	17
3.4	Digitální korelace obrazu	18
3.4.1	Podstata metody.....	18
3.5	Balzové dřevo.....	19
3.5.1	Výskyt Balzy.....	20
3.5.2	Růst Balzy.....	20
3.5.3	Historické využívání Balzy.....	20
3.5.4	Použití balzy	22
3.5.5	Mikroskopická struktura balzy	22
3.5.6	Chování balzy výzkum	23
3.5.7	Balza v současnosti	24
4	Materiál a metodika	26
4.1	Zkouška v tlaku	26
4.1.1	Zkušební tělíska	26
4.1.2	Mechanické namáhání	26

4.1.3	Optické snímání	27
4.1.4	Vyhodnocení pořízených snímků	28
4.1.5	Pevnost dřeva a modul pružnosti v tlaku	29
4.2	Zkouška v tahu	30
4.2.1	Zkušební tělíska	30
4.2.2	Zkušební stroj iErudio	31
4.2.3	Software Mercury RT	32
4.2.4	Příprava tahové zkoušky	33
4.2.5	Vyhodnocení tahové zkoušky	34
4.3	Výpočtový modul pružnosti ve smyku	35
4.4	Ohybová zkouška	35
4.4.1	Zkušební tělesa	35
4.4.2	Příprava ohybové zkoušky	36
4.4.3	Vyhodnocení ohybové zkoušky	37
4.4.4	Pevnost dřeva a modul pružnosti dřeva ve statickém ohybu	38
4.5	Statistické metody a vyhodnocení	38
5	Výsledky a diskuze	41
5.1	Tlaková zkouška	41
5.1.1	Mez pevnosti v tlaku	41
5.1.2	Modul pružnosti v tlaku	44
5.1.3	Poissonovo číslo	46
5.2	Zkouška v tahu podél vláken	50
5.2.1	Mez pevnosti v tahu podél vláken	50
5.2.2	Modul pružnosti v tahu podél vláken	51
5.3	Zkouška v tahu napříč vláken	53
5.3.1	Mez pevnosti v tahu napříč vláken	53
5.3.2	Modul pružnosti v tahu napříč vláken	54
5.4	Poissonovo číslo	56
5.5	Porovnání hodnot kolmo na vlákna a rovnoběžně s vlákny	58
5.5.1	Porovnání meze pevnosti v tahu	58

5.5.2	Porovnání modulu pružnosti v tahu	59
5.6	Výpočtový modul pružnosti ve smyku	61
5.7	Zkouška v ohybu	63
5.7.1	Mez pevnosti v ohybu	63
5.7.2	Modul pružnosti v ohybu	64
5.8	Minitřhačka iErudio	66
6	Závěr	68
7	Summary	69
8	Přehled literatury	70
9	Seznam obrázků	75
10	Seznam tabulek	77

1 Úvod

Dřevo je organický materiál, který má své specifické vlastnosti a nepřeberné množství použití. Dřevo se čím dál více stává rovnocenným „partnerem“ nových moderních materiálů. Ty mnohdy bývají několikanásobně dražší, což plyne z nákladné výroby těchto materiálů. Masivní dřevo je neodmyslitelnou součástí dřevařského průmyslu, ale stále častěji je používáno i na výrobu kompozitních materiálů, jako jsou překližky, dřevovláknité desky, OSB desky a další modifikace v kombinaci s jinými materiály. Na oblibě získalo rostlé dřevo i ve stavebnictví, na stavby na bázi dřeva, kde tvoří základní kostru.

Dřevo je ovšem materiál, který vykazuje v různých směrech s ohledem na směr vláken odlišné vlastnosti, na rozdíl od izotropních materiálů jako je například ocel, která má ve všech směrech parametry stejné. Proto se snažíme při výběru vhodného materiálu zohledňovat jeho strukturu, na co bude dřevo použito a podle toho zvážit i prostorové umístění v závislosti na jeho rozměrech tak, aby dřevo plnilo funkci, ke které bylo určeno. Když dřevo správně umístíme do zvoleného prostoru a při jeho pravidelné údržbě, nám dřevěné prvky budou plnit svou funkci i několik desítek až stovek let.

Tato práce se bude zabývat mechanickými vlastnostmi balzového dřeva na mesoúrovni. K tomu bude použit prototyp „minitrhačky“ iErudio. K vyhodnocení bude použita metoda na bázi korelace digitálního obrazu DIC, která je založena na vyhodnocení změny polohy kontrastního skvrnitého vzoru v tělese. Cílem této metody je určení posuvů na povrchu tělesa při deformaci způsobené vnějšími či vnitřními silami. Tato metoda, v podobě v jaké je dnes používána je známá od roku 1982, kdy bylo použito první měření posuvů na tahové zkoušce. Metoda je v dnešní době již velice uznávaná. Jedná se o nedestruktivní, nekontaktní metodu pomocí níž můžeme zjistit: pole poměrných deformací, pole posunutí a pole zakřivení.

Jak již bylo zmíněno, mechanické zkoušky budou prováděny na balzovém dřevě. Balza (*Ochroma lagopus*) je rychle rostoucí tropický strom, který je znám pro své extrémně lehké a světlé dřevo. Balza roste ve vlhkých deštných pralesích Střední a jižní Ameriky. Jedná se o plantážní rostlinu a v 6 až 10 letech je strom připravený ke kácení. V té době dosahuje výšky až 30 m a průměru 30 – 120 cm.

2 Cíl práce

Cílem této diplomové práce bylo experimentálně zjistit mechanické vlastnosti balzového dřeva pomocí minizkušebního prototypového stroje iErudio. Dalším z cílů je zjistit, zda je možné s instalovanou kamerou na mesoúrovni tyto vlastnosti počítat a provést kvalitativní zhodnocení práce s prototypem zařízení.

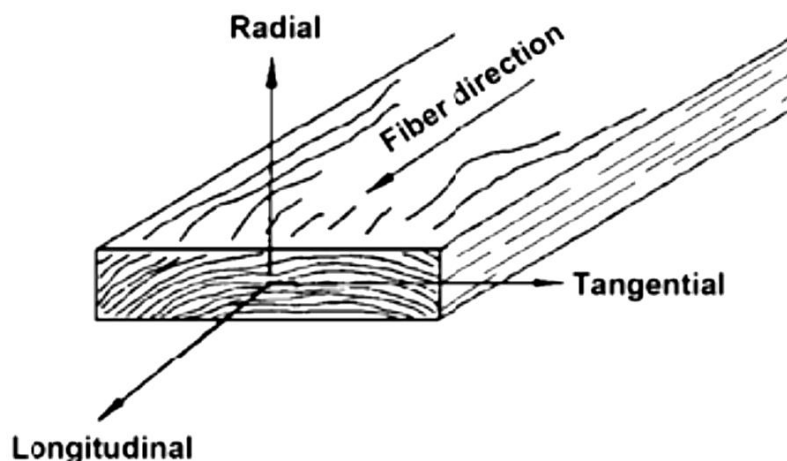
Z dat získaných z trhačky a vypočítaných metodou korelace digitálního obrazu, budou dopočítány meze pevnosti, moduly pružnosti a Poisonova čísla. Hodnoty budou statisticky vyhodnoceny a porovnájí se s hodnotami v dostupné literatuře.

3 Literární přehled

3.1 Mechanické vlastnosti dřeva

Dřevo je u nás i ve světě jedním z nejpoužívanějších materiálů díky svým vlastnostem a obnovitelnosti. Mezi významné vlastnosti patří mechanické vlastnosti, které sehrávají významnou úlohu při jeho technologickém zpracování a dělíme je na základní a odvozené. Základními mechanickými vlastnostmi jsou pevnost, pružnost, plastičnost a houževnatost. Odvozené vlastnosti jsou tvrdost, odolnost proti tečení, odolnost proti trvalému zatížení a odolnost proti únavovému lomu. Při využívání dřeva v praxi jsou nezanedbatelnou součástí také technologické vlastnosti. Pro odvození technologických vlastností, jako je štípatelnost, sušitelnost, opracovatelnost, opotřebitelnost, je důležité poznat stavbu dřeva a mechanické vlastnosti (Požgaj et al. 1997).

Dřevo je běžně popisováno jako ortotropní materiál, který má jedinečné a nezávislé mechanické vlastnosti ve třech na sebe vzájemně kolmých osách. Podélná osa je rovnoběžná s dřevními vlákny, radiální osa je kolmá k letokruhům procházející středem kmene a osa tangenciální je tangentou k danému letokruhu (Bergman 2010).



Obr. 1 Hlavní osy s ohledem na vlákna a letokruhy (Bergman 2010)

Všeobecně jsou mechanické vlastnosti ovlivňovány různou variabilitou hustoty dřeva, která se mění po poloměru kmene. Se stářím stromu klesá šířka letokruhu, a díky tomu dochází k úbytku jarního dřeva a zvyšuje se podíl letního dřeva. Letní dřevo má vyšší hustotu a tím i vyšší mechanické vlastnosti. (Panshin, de Zeew 1980)

3.1.1 Mechanické namáhání dřeva

Při mechanickém namáhání dochází k ovlivnění struktury dřeva vnějšími i vnitřními mechanickými silami, které strukturu dřeva deformují v závislosti na jeho vnitřním odporu. Následkem namáhání dochází k dočasné nebo trvalé deformaci. Díky tomu, že dřevo má ortotropní stavbu, je rozdíl, v jakém směru je zkoušené těleso namáháno. Již chemická stavba dřeva a orientace chemických vazeb, na mikroskopické úrovni ovlivňuje mechanické vlastnosti dřeva, uspořádání a tvar elementů dřeva jako jsou tracheidy, cévy, libriformní vlákna nebo dřevné paprsky. Uspořádání stavebních elementů a chemických vazeb má za následek, že mechanické vlastnosti jsou rozdílné v podélném směru, ve směru rovnoběžně s vlákny, ve směru kolmo k vláknům, ale i ve směru napříč vláken se mechanické vlastnosti liší v tangenciálním a radiálním směru. (Horáček 1998)

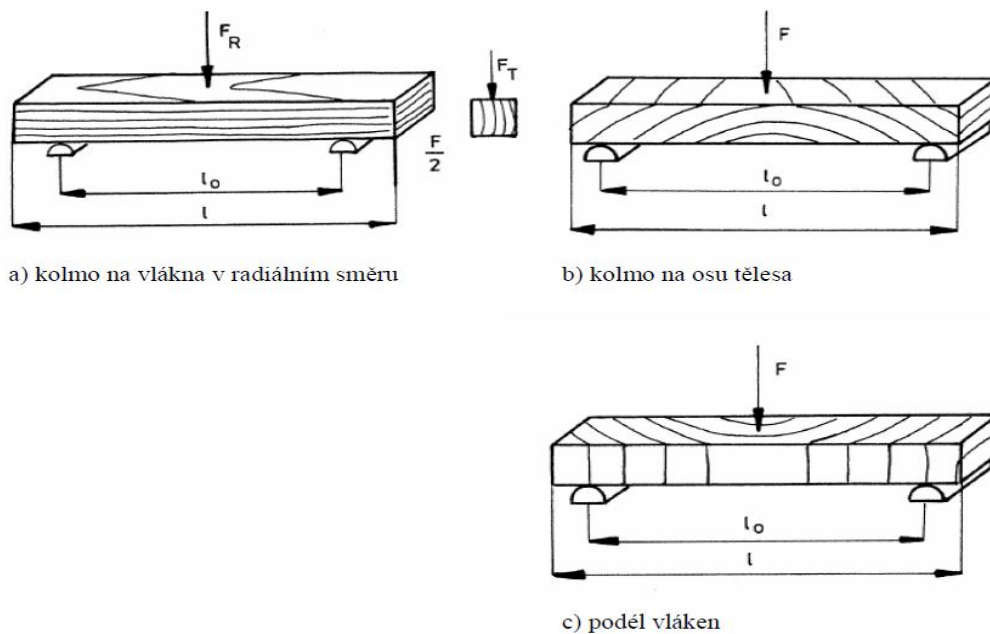
3.2 Pevnost dřeva

Pevnost dřeva charakterizuje odpor či odolnost dřeva proti jeho trvalému poškození. Pevnost se vyjadřuje jako maximální síla působící na plochu a označuje se jako mez pevnosti σ_p , tedy bod, u kterého se obvykle poruší soudržnost materiálu. Teoretickou pevnost dřeva nelze vypočítat. Pevnost dřeva zjišťujeme pomocí zkoušek, sledováním síly a deformace tělesa. Tato měření nám udají skutečnou pevnost dřeva, výjimkou je pevnost dřeva v tlaku napříč vláken v radiálním směru, která je definovaná jako konvenční pevnost, tzv. smluvní pevnost, u které konečné porušení nelze dosáhnout (Požgaj at al 1997; Gandelová, Horáček, Šlezingerová 1996; Matovič 1981).

3.2.1 Pevnost dřeva v ohybu

Pevnost dřeva v ohybu se z konstrukčního hlediska považuje za jednu z nejdůležitějších mechanických vlastností. Dřevo má poměrně vysokou ohybovou pevnost a proto se často používá na konstrukční prvky namáhané ohybem jako jsou, nosníky, vazníky, trámce a převážná část střešní konstrukce. U dřeva rozlišujeme dva způsoby pevnosti v ohybu s ohledem na průběh vláken a to:

- Pevnost v ohybu, kdy vlákna probíhají rovnoběžně s podélnou osou tělesa a síla působí napříč vláken v radiálním nebo tangenciálním směru (Obr. 2a).
- Pevnost v ohybu, kdy vlákna probíhají kolmo na podélnou osu tělesa, kdy příčný řez je orientován ve směru působící síly nebo kolmo k působící síle (Obr. 2b a c).



Obr. 2 Zatížení dřeva při ohybu (Požgaj et al. 1997)

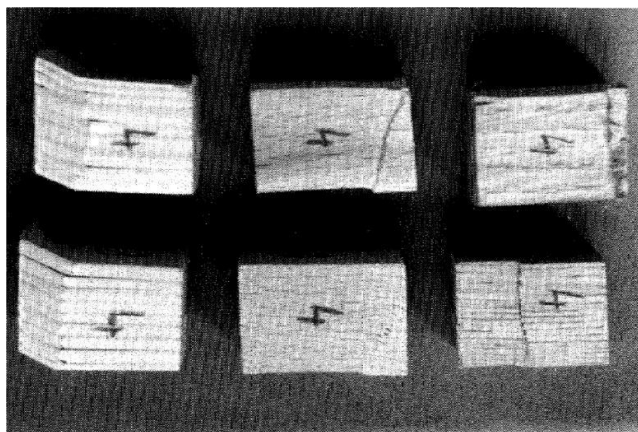
Při zatížení tělesa ohybem vzniká v jeho horní části napětí v tlaku a ve spodní části v tahu. Část v tělese bez normálového napětí se označuje jako neutrální osa. V místě neutrální osy je maximální smykové napětí. Vzhledem k tomu, že tlaková pevnost dřeva podél vláken je mnohem menší než tahová pevnost, začíná porušení tělesa při ohybu v tlakové zóně vybočováním vláken, což je málokdy pozorovatelné pouhým okem. Konečné porušení tělesa probíhá v tahové zóně, kdy po překročení meze pevnosti dojde nejdříve k odštěpení krajních vláken a potom k úplnému zlomení tělesa. Dřevo křehké, málo pevné má zlom téměř hladký. Houževnaté a pevné dřevo má zlom vláknitý nebo třískovitý. Mez pevnosti v statickém ohybu (napříč vlákny) je průměrně 100 MPa. Variační koeficient je 16 %. Hodnoty ohybové pevnosti dřeva leží mezi hodnotami tahové a tlakové pevnosti dřeva ve směru vláken. Mez úměrnosti při statickém ohybu je průměrně 70 % meze pevnosti. Pevnost v ohybu závisí mimo jiné i na rozměrech zatěžovaného tělesa. Podíl vzdálenosti podpěr k výšce tělesa (štíhlostní poměr) musí odpovídat (Horáček, 1998).

3.2.2 Pevnost dřeva v tlaku podél vláken

Tlaková pevnost dřeva podél vláken je z praktického hlediska velmi důležitou mechanickou vlastností dřeva. Působením tlaku na těleso podél vláken dojde k deformaci, která se projevuje zkrácením délky tělesa. Charakter deformace závisí na jakosti a stavbě dřeva. Důležitými faktory jsou, hustota a vlhkost dřeva (Matovič 1981).

Deformace tlakem podél vláken začíná vybočením jednotlivých vláken. U zkušebních tělísek z vlhkého měkkého dřeva anebo z houževnatého dřeva se vyskytuje otláčení čel a vybočení boků. U zkušebních tělísek suchých nebo u tělísek s vysokou hustotou vzniká porušení ve formě smyku jedné části tělesa vzhledem k druhé po linii, která na tangenciální ploše probíhá pod úhlem 60° a na radiální ploše pod úhlem 90° vzhledem k podélné ose tělesa (Perelygin 1965).

Pevnost dřeva v tlaku podél vláken je ovlivněna řadou činitelů. Mezi tyto činitele lze zařadit vlhkost, teplotu, vliv hustoty a směru vláken. Se stoupající vlhkostí až do meze hygroskopicity se pevnost v tlaku podél vláken snižuje. Při krátkodobém působení tepla na dřevo klesá jeho pevnost. Při poklesu teploty na původní hodnotu, dřevo nabývá původní hodnoty pevnosti v tlaku. Obvykle se stoupající hustotou dřeva se zvyšuje i pevnost v tlaku podél vláken (Matovič, 1993).



Obr. 3 Pevnost dřeva podél vláken (Požgaj 1997)

3.2.3 Pevnost dřeva v tlaku kolmo na vlákna

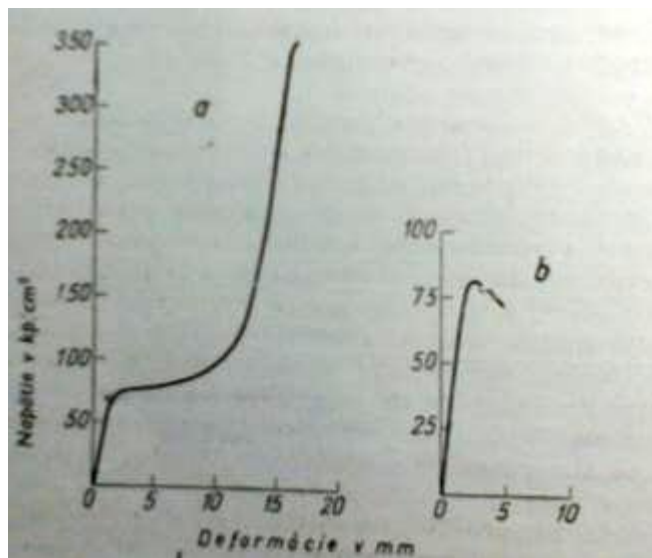
Na rozdíl od tlaku ve směru vláken nebývá v tomto případě dřevo porušeno oddělováním jednotlivých částí, ale dochází k postupné deformaci a zhušťování dřevní struktury v celém objemu. Pevnost v tlaku napříč vláken se zjišťuje graficky z pracovního diagramu. Rozlišujeme dva způsoby závislosti napětí – deformace a to dvoufázová a třífázová (Požgaj 1997).

Při dvoufázové deformaci dojde nad mezí úměrnosti k postupnému porušení soudržnosti tělesa a to se projevuje na hranicích letokruhů. Letokruhy se ohýbají, navzájem se od sebe oddělují a dochází k rozvoji plastické deformace tělesa (Šlezingerová, Horáček, Gandelová 2004).

Třífázová deformace je typická pro zatížení dřeva při tlaku napříč vláken v radiálním směru. Při působení napříč vláken většinou nedochází k celkovému

porušení tělesa. Proto se pevnost v tlaku určuje z meze úměrnosti. Mez úměrnosti je označována jako konvenční mez pevnosti ($\sigma_k \approx \sigma_{\bar{u}}$).

Konvenční mez pevnosti při zatížení napříč vláken je pro všechny druhy dřeva průměrně 10 krát menší než mez pevnosti při tlaku ve směru vláken (Matovič 1993)



Obr. 4 Pracovní diagramy pevnosti v tlaku napříč vláken (Matovič 1993)

3.2.4 Pevnost dřeva v tahu podél vláken

Pevnost dřeva v tahu ve směru vláken je v porovnání s ostatními pevnostmi dřeva nejvyšší. Porušení tělesa při namáhání v tahu se projevuje roztrhnutím buněk dřeva v pracovní části tělesa. Vlákňitý nebo rozštěpený zlom vypovídá o vysoké pevnosti dřeva v tahu. Naopak hladký nebo schodovitý zlom signalizuje nízkou pevnost vzorku (Požgaj 1997).

Při zatížení v tahu ve směru vláken se dřevo chová jako křehký materiál, který má malou deformaci a zlom bez viditelných předchozích příznaků tedy plastických deformací (Požgaj 1997).

3.2.5 Pevnost dřeva v tahu napříč vláken

Dřevo zatěžované v tahu napříč vláken vykazuje jednu z nejmenších pevností vůbec což je dáno orientací vazebných sil. Ve směru podél vláken se na tahové pevnosti podílejí hlavně vazby kovalentní, zatímco ve směru napříč vláken působí vazby vodíkové a vazby Van der Waalsovy, které jsou slabší. Průměrná tahová pevnost napříč

vláken se pohybuje od 1,5 do 5 MPa. Proto se při využití dřeva v konstrukcích vyhýbáme zatížení dřeva v tahu kolmo na vlákna (Gandelová et al. 1996, Požgaj 1997).

Tahová pevnost kolmo na vlákna je v průměru pro všechny zkoumané dřeviny přibližně 1/20 tahové pevnosti podél vláken (Perelygin 1965)

3.2.6 Pevnost dřeva ve smyku

Díky anizotropní stavbě má dřevo různou smykovou pevnost ve všech třech základních směrech. Stanovit podmínky čistého smyku ve dřevě není zcela, protože čistý jednosměrný smyk bez spolupůsobení jiných napětí se nevyskytuje. Smyk má významnou úlohu při různých zatíženích. Při smykových zatíženích spolupůsobí ještě jiná napětí (např. tlaková, tahová). Z toho důvodu je nutné respektovat jednotlivé případy, kdy smyk má rozhodující vliv. Smyk zjišťujeme tak, že necháme působit dvě stejně velké síly, které vyvolají vzájemné posunutí dvou sousedních průřezů.

3.3 Pružnost dřeva

Dřevo je materiál se širokou škálou použití, a proto se různými formami zpracovává na výrobky.

Pružnost dřeva se všeobecně definuje jako schopnost dosáhnout původního tvaru (rozměrů) po uvolnění vnějších sil. Z fyzikálního hlediska je to takový stav, že změny mezi vzdálenostmi atomů jsou návratné, po odstranění vnějších sil se atomy vrátí do svých rovnovážných vzdáleností tak, aby dosáhli nejnižší potenciální energii (Požgaj 1997)

3.3.1 Modul pružnosti dřeva

Modul pružnosti dřeva vyjadřuje pružnostní charakteristiky materiálu, které jsou důležitými materiálovými konstantami, a jsou velmi potřebné, při statických výpočtech při dimenzování dřevěných konstrukcí. Modul pružnosti dřeva vyjadřuje vnitřní odpor materiálu proti pružné deformaci. Čím je modul pružnosti vyšší, tím větší napětí je potřebné na vyvolání deformace. Rozlišují se moduly pružnosti E při normálových namáhání (tah, tlak, ohyb) a moduly G při tangenciálním namáhání (krut a smyk). Modul pružnosti v tahu a tlaku charakterizujeme jako podíl mezi napětím a poměrnou deformací (Požgaj et al., 1997, Panshin, de Zeeuw, 1980)

3.3.2 Poissonova čísla

Jméno této veličiny je spojeno s francouzským vědcem Siméon Denis Poissonem, který cca před 200 lety publikoval dnes již klasickou knihu o mechanice zvanou "*Traité de Mécanique*" 1811. V této knize, jak se často mylně domníváme, se ještě o Poissonově čísle (μ) explicitně nehovoří, i když implicitně je s ním již počítáno, ale jeho důležitý význam v materiálově vědě není ještě odhalen a to až do roku 1827.

Poissonova čísla jsou důležitými charakteristikami pružnosti dřeva a využívají se především při objemových změnách dřeva způsobených vlivem mechanického zatížení (Požgaj 1997).

Když zkušební těleso namáháme tlakem nebo tahem, vznikají v něm kromě deformací ve směru působení síly (zkrácení nebo prodloužení), i deformace kolmo na směr síly. Ty nazýváme příčné deformace, které bychom neměli zaměňovat s deformacemi kolmo na vlákna.

Při tlakovém zatížení jsou příčné deformace kladné a v tahu záporné – příčně se dřevo zužuje.

Poissonovo číslo vyjadřuje poměr příčné deformace k podélné. Například při tlaku podél vláken vystupují dvě Poissonova čísla.

$$\mu_{TL} = -\frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_L} \quad a \quad \mu_{RL} = -\frac{\varepsilon_R}{\varepsilon_L}$$

kde ε_T je příčná poměrná deformace v tangenciálním směru

ε_R je příčná poměrná deformace v radiálním směru

ε_L poměrná deformace ve směru vláken a v tomto případě i ve směru síly.

Tahovým deformacím přisoudíme kladné znaménko a tlakovým záporné, tedy v obou případech jsou Poissonova čísla záporná. Jakmile uvažujeme dřevo jakožto ortotropní materiál, tak pro popis jeho deformace potřebujeme šest Poissonových čísel. Někdy se v odborné literatuře střetáváme i s názvem příčné koeficienty dřeva.

Kromě modulů pružnosti (normálových – E a smykových - G) a Poissonových čísel (μ) technická praxe pracuje ještě i s objemovým modulem pružnosti E_K , který vyjadřuje vztah mezi tlakovým napětím a pružnou objemovou změnou. Je to měrná veličina objemové pružnosti materiálu při namáhání všestranným tlakem (Požgaj 1997).

3.4 Digitální korelace obrazu

Korelace digitálního obrazu (Digital image correlation – DIC) je optická bezkontaktní metoda založena na vyhodnocení změny polohy konstantního skvrnitého vzoru (v angl. „speckle pattern“) na povrchu zkoušeného tělesa. Vyhodnocení změny polohy se uskuteční pomocí matematické operace korelace. Hledání posuvu v bodě je převedeno na hledání maxima korelační funkce. Tato funkce se počítá z pořízených snímků před deformací a po deformaci tvořeného pixely ve stupních šedi. Náhodný skvrnitý vzor na zkušebních tělesech získáme pomocí dvoubarevného nástřiku ve dvou vrstvách. Nejprve se potře dřevo bílou podkladovou barvou a po zaschnutí se přestříká tmavou, pro docílení skvrnitého vzhledu jak je vidět na Obr.5.



Obr. 5 Kontrastní skvrnitý vzor

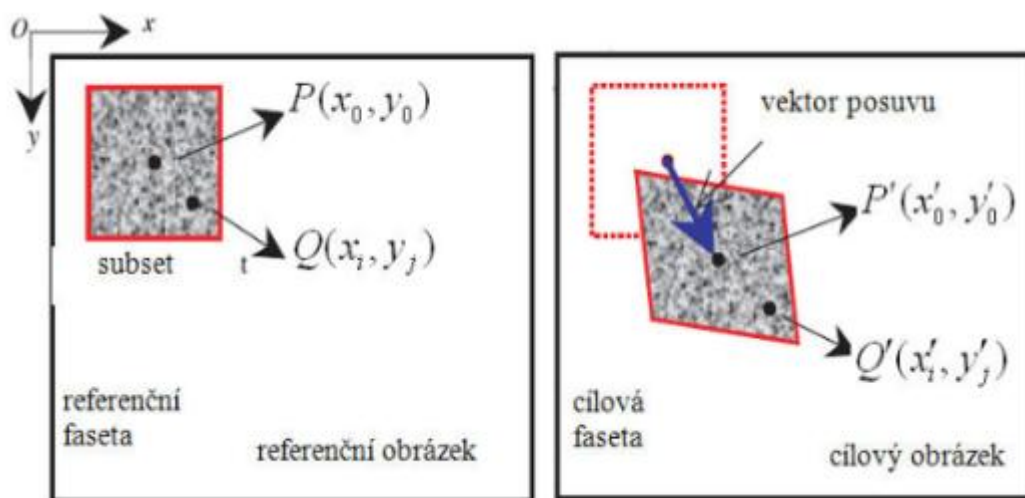
Korelace digitálního obrazu vychází z analyzované oblasti povrchu tělesa pokrytého kontrastním vzorem, která je virtuálně pokryta pixely. Velkost pixelů souvisí s rozlišovací schopností měřící techniky – digitálních kamer a s rozměrem oblasti určené k analýze. Optické vlastnosti jednotlivých pixelů jsou popsány diskrétní funkcí, která reprezentuje úroveň šedi každého pixelu. (Sutton, Orteu, Schreier, 2009).

3.4.1 Podstata metody

Cíl metody korelace digitálních obrazů je určení deformačních posuvů na povrchu tělesa v procesu nebo na konci deformačního stavu způsobeného vnějšími či vnitřními silami nebo např. teplotní deformací.

Pro jednoduché znázornění máme dva snímky skvrnitého vzoru před a po deformaci na obrázku 6. Jednotlivé snímky jsou rozděleny na tzv. subsety, pro které hledáme posuvy v osách na sebe kolmých, v ose x a y . Z těchto posuvů získáme pomocí softwaru

vektory posunutí, z kterých jsme schopni dopočítat poměrné deformace – poměrné změny (Petruška, 2003).



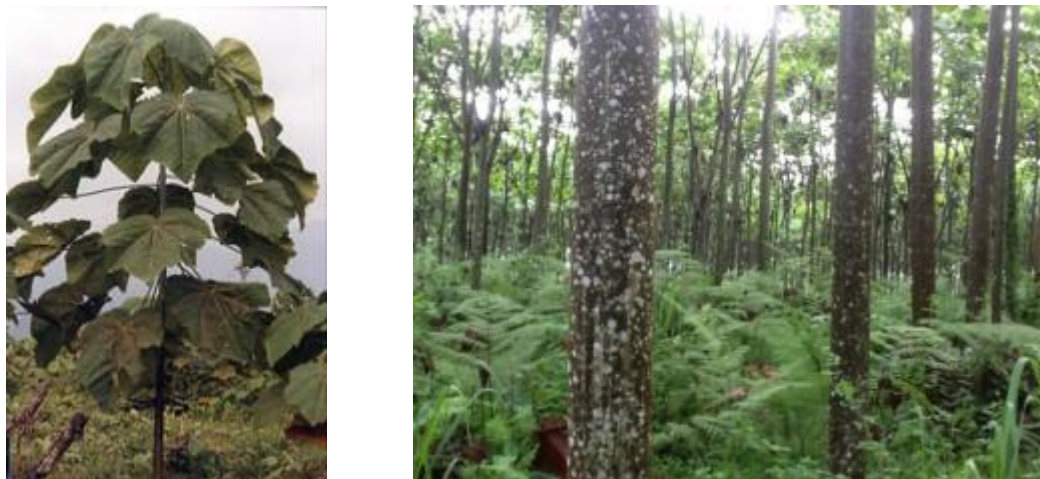
Obr. 6 Popis bodů ve fasetě (Janíček, 2013)

3.5 Balzové dřevo

Dřevo bylo a i v současné době je jedním z nejvíce používaných konstrukčních materiálů. Je to přirozeně se vyskytující obnovitelný zdroj, který je biologicky odbouratelný s relativně nízkými náklady na pořízení (Gibson and Ashby 1997; Bodig and Jayne 1982).

Balza (*Ochroma lagopus*, nebo *O. pyramidale*) známá jako rychle rostoucí tropický strom, který je znám pro své extrémně lehké a světlé dřevo. Balza má světlou kůru a stejně jako mnoho tropických stromů nejsou vlivem stálého podnebí letokruhy v řezech patrné. Balza může vyrůst o více než 5 metrů za rok na přímém slunci. Maximální výšky dosahuje zhruba 30 metrů.

Balza má velké listy (Obr.7 vlevo), obvykle koncentrované na koncích větví, jsou zaměřeny na špičkách a ve tvaru srdce. Balza vykvete kolem třetího až čtvrtého roku růstu. Má bílé osamocené květy, které jsou opylovány a plodem je tobolka, která připomíná nohu králíka. Tobolka obsahuje mnoho semen s dlouhými vlasy a ty umožňují semenům rozptýlit do velkých vzdáleností. Semena zůstávají životaschopné po mnoho let v půdě, a začne klíčit např. po vypálení nebo poté co se otevře prostor v korunách stromů. Balza se vyskytuje ve smíšených nebo jednodruhových lesních porostech. Pokud má stanoviště na stinném místě roste pomaleji a výsledkem je jeho hustší dřevo.



Obr. 7 Balza vlevo-mladá rostlina, vel. listů, vpravo- plantážní růst balzy

3.5.1 Výskyt Balzy

Balza roste přirozeně ve vlhkých deštných pralesích Střední a Jižní Ameriky. Jeho přirozené stanoviště se rozkládá na jih od Guatemaly, přes Střední Ameriku, na Severní a západní pobřeží Jižní Ameriky až k Bolívii. Nicméně, malá země Ekvádor, která leží na západním pobřeží Jižní Ameriky, je primárním zdrojem na vývoz do celého světa.

Balza potřebuje teplé klima s dostatkem srážek a dobrým odvodněním. Z toho důvodu najdeme obvykle plantáže na vyvýšeném místě mezi tropickými řekami. Ekvádor má ideální geografické a klimatické podmínky pro pěstování balzy.

3.5.2 Růst Balzy

Balzové stromy rostou velmi rychle. Šest měsíců po vyklíčení je strom asi 3 – 4 metry vysoký a v průměru má 4 cm. V šesti až deseti letech je strom připraven ke kácení a dosáhne výšky 20 - 30 metrů a průměr je 30- 120 cm. Pokud se nechá strom růst dál, nové přírůstky na vnějších vrstvách jsou velmi těžké a dřevo ve středu začne odehňvat. Tím, že balza roste rychle má svoji ekosystémovou funkci i vtom, že v prostoru často poskytuje stín nižším etážím (<http://cs.wikipedia.org/wiki/Balsa>)

3.5.3 Historické využívání Balzy

Balzové dřevo je zajímavý přírodní materiál. Slovo balza je ve španělštině používáno pro raft a má své historické kořeny v Polynesii. Okolo roku 500 Peruánci používali balzové stromy k výstavbě Kon-Tiki raftů (obr. 8).



Obr. 8 Kon-Tiky raft 1948(www.wikipedia.com)

Balza je nejlehčí a nejměkčí obchodní dřevo a jeho hustota se pohybuje v širokém rozsahu ($0,04 - 0,32 \text{ g/cm}^3$). Ta závisí na věku a stanovišti růstu stromu. Skutečný začátek, kdy se s balzou začalo pracovat, bylo během první světové války, kdy se balza stala náhradou korku. Ve Spojených státech amerických byla balza použita v konstrukci letadla v roce 1920. Byla také použita pro stavbu kluzáků a ve 2. Světové válce se objevila, v konstrukci bojového letadla Mosquito viz obr. 9. (Easterling et al. 1982)



Obr. 9 Bojový letoun de Havilland Mosquito(www.wikipedia/De_Havilland_Mosquito)

3.5.4 Použití balzy

Balza je známá jako jádrový materiál pro sendvičové kompozity používané v lodích, lopatek větrných turbín, mostovek atd. Balzové sendvičové kompozity mají stejné výhody jako jiné sendvičové kompozity (např. voštinová jádra) a to nízkou hmotnost a značnou tuhost a tím je konkurence schopná jiným jádrovým materiálům. Mezi jeho výhody patří malá hmotnost a vysoká elasticita, která je využívána v modelářství a při výrobě nábytku nebo hudebních nástrojů. Mezi další vlastnosti patří požární odolnost a tepelná izolace, také dobře tlumí hluk a tyto vlastnosti jsou výhodou v automobilovém a stavebním průmyslu. Další použití je ve sportovním odvětví. Používá se jako jádro v surfařských prknech, lyžích nebo na ping-pongové pálky.

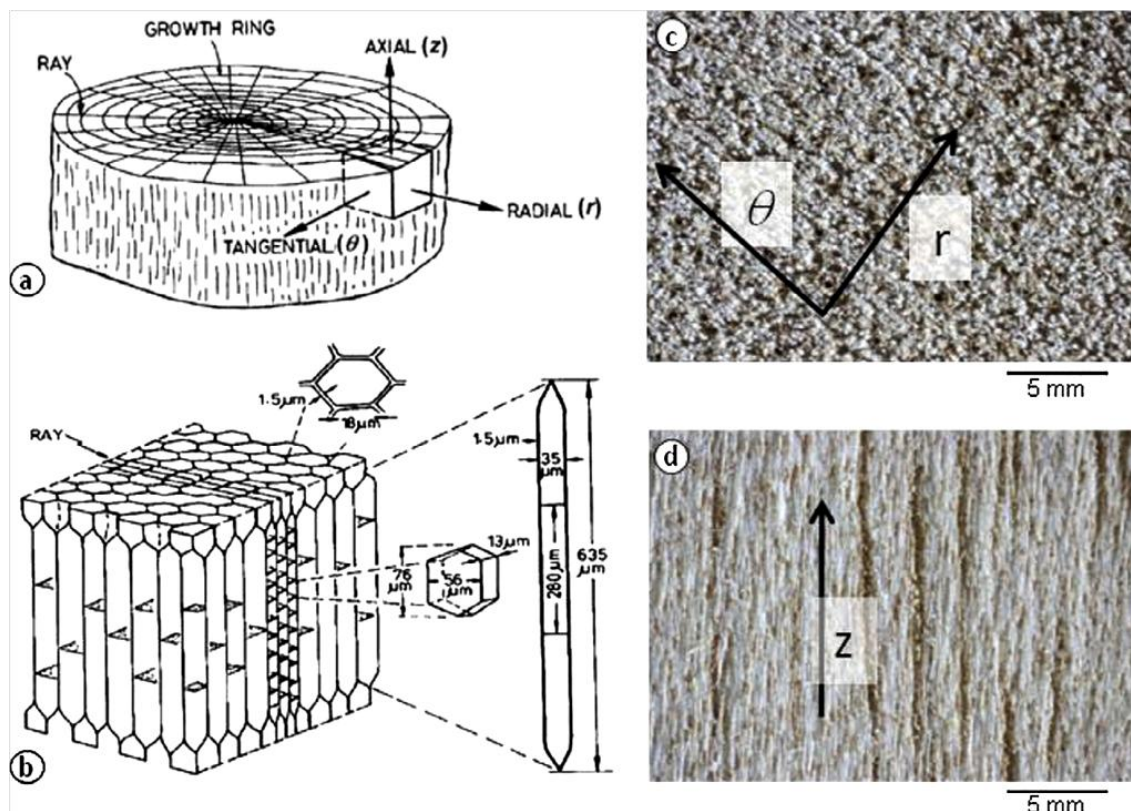
3.5.5 Mikroskopická struktura balzy

Stejně jako jiné stromy má i balza svoji specifickou mikroskopickou stavbu. Hlavními buňkami jsou tracheidy, které mají tvar dlouhých uzavřených buněk zarovnané podél osy kmene stromu. Jejich hlavní funkcí je nosná konstrukce. Průřez buňky je polygonální, připomínající nepravidelný šestiúhelník. Tracheidy jsou zakončeny špičatými kužely. Jsou uspořádány v obvodových vrstvách, které představují roční letokruhy.

Parenchym je druhý typ buňky, ten má kratší délku a připomíná více obdélníkový průřez. Parenchym je radiálně uspořádán ve skupinách, které pravidelně pronikání do tracheid a jsou odpovědné za ukládání sacharidů pro vedení tekutiny.

Třetí, delšími a většími buňkami jsou mizní kanálky, které jsou odpovědné za přenos tekutiny do kmene stromu.

V případě balzy, tracheidy tvoří 80-90% objemu, parenchym 8-15% a zbytek patří mizním kanálkům (Dinwoodie 2000).



Obr. 10 Struktura dřeva (a) kmen, (b) uspořádání a rozměry buněčné struktury balzy, (c) a (d) směr dřevních vláken (Viot 2013)

3.5.6 Chování balzy výzkum

Toson, Viot a Pesqué (2014) postrádali dostatek ucelených informací o chování balzového dřeva, proto svůj výzkum založili jednak na praktických zkouškách a poté různé situace modelovali za využití metody konečných prvků.

Aby bylo možné využívat balzu v různých situacích, je třeba sestavit model, který bere v úvahu všechny specifické vlastnosti dřeva jako je např. stlačitelnost a deformace.

Tlaková zkouška, kterou provedli na několika vzorcích, jim prokázala, že jedním z důležitých parametrů rozhodujících o vlastnostech je hustota. Výsledky nevykazovaly žádný relevantní rozdíl v tangenciálním a radiálním směru. Ovšem chování balzového dřeva podél vláken se lišilo. Napětí bylo při statickém tlaku 10-krát větší, než napětí v tlaku v rovině radiální.

Z tahové zkoušky jim vyplynulo, že balzové dřevo je elasticky křehké a to jak v rovině kolmo na vlákna i ve směru podél vláken. V oblasti s nízkou hustotou dochází

k rychlé progresi selhání a náhlému přetržení vzorku. Chování v radiálním směru je podobné jako podél vláken, ale tuhost a pevnost jsou podstatně nižší.

Výsledky jejich zkoušky shrnuté v číslech: Modul pružnosti v tlaku napříč vláken 50MPa, modul pružnosti v tlaku podél vláken 800MPa, modul pružnosti ve smyku 21MPa. Mez pevnosti v tlaku 5-18 MPa a mez pevnosti v tahu 2-18 MPa. Pro balzové dřevo o hustotě 220 kg/m³.

Když na závěr porovnali výsledky z experimentu a poté z numerických simulací byly průměrné odchylky méně než 10 % s maximální hodnotou 17 %. Uspokojivé výsledky dávají možnost simulovat poměrně složité experimenty.

3.5.7 Balza v současnosti

Ve světě roste poptávka po lehkých konstrukčních materiálech schopných poskytnout ochranu při nárazu a výbuchu a to podnítilo výzkum na dynamické reakce kompozitních sendvičových konstrukcí, kde jako jádro je použito právě balzové dřevo a bylo porovnáváno s kompozity, kde jádro tvoří pěny PVC. Výsledkem výzkumu Tagarielliho et al (2007) z Cambridge university je, že mez kluzu v tlaku se zdvojnásobí, pokud se rychlost deformace zvýší, a to v kompozitu kde jako jádro je použita pěna H250 PVC, a balzové dřevo. Naopak u pěny H100 PVC se projevilo pouze malé zvýšení zhruba o 30%, při stejném zvýšení rychlosti deformace.

Podobnou studii se zabývali pánové Ramakrishann et al. (2012). Porovnávali sendvičové desky, které byly vystaveny nízkému rychlostnímu rázu, které se lišily jádrem. Jako jádro byl použit pěnový polystyrén, polypropylen, dvě různé hustoty balzy a korek. Cílem bylo určit sendvičovou desku, která absorbuje největší množství energie a zároveň dojde k co nejmenšímu poškození. Nejlépe z této studie vyšel korek.

Rázové pevnosti sendvičů se také věnovali Mortas, Reis a Ferreira (2014), u nichž jádro kompozitu tvořila balza a obal tvořila nanovlákna s pryskyřicí a skelná vlákna.

Další výzkum prováděný Meisam Shir Mohammadi and John A Nairn (2014) z Oregon State University, se zabýval šířením trhlin a lomovou houževnatostí balzy používané v jádře sendvičového kompozitu. Jednalo se o ohybovou zkoušku ve dvou režimech a to I. Kolmo na vlákna a II. Rovnoběžně s vlákny. V prvním případě byla houževnatost nižší než u jiných druhů dřeva, ale s ohledem na velmi nízkou hustotu balzy, byla houževnatost vyšší než se jaký byl předpoklad. V druhém případě tedy

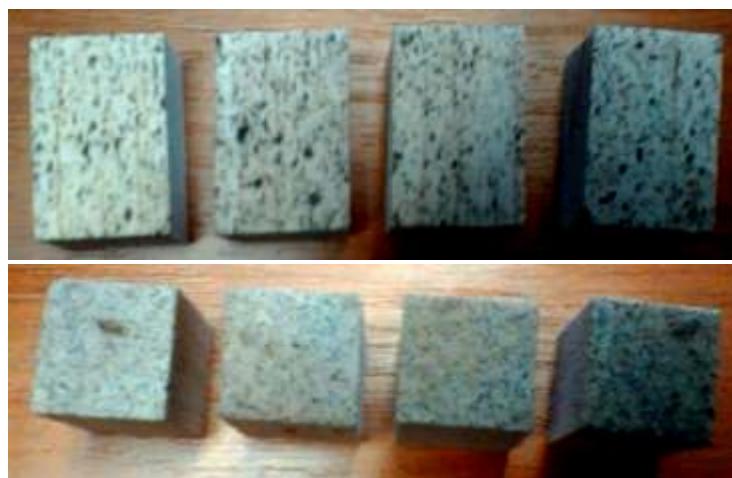
rovnoběžně s vlákny byla lomová houževnatost vyšší než kolmo na vlákna. Závěrem jejich práce bylo, že s ohledem na houževnatost balzového dřeva je vhodné, jako jádro pro sendvičové kompozitní materiály a pravděpodobně lepší, než některé alternativní materiály použité pro jádra.

4 Materiál a metodika

4.1 Zkouška v tlaku

4.1.1 Zkušební tělíska

Na výrobu zkušebních těles bylo použito balzové dřevo určené pro komerční účely konkrétně balza pro modeláře. Z hranolů 20 x 20 x 250 mm se vyřezaly přesné rozměry pro tlakovou zkoušku a to 20 x 20 x 30 mm. Zkušební tělíska byla opatřena kontrastním vzorem pomocí práškového spreje (Obr. 11).



Obr. 11 Zkušební tělíska s naneseným kontrastním vzorem

4.1.2 Mechanické namáhání

Zkoušky pevnosti dřeva v tlaku ve směru vláken, i napříč vláken byly provedeny pomocí univerzálního zkušebního stroje Zwick Z050 (obr. 12). Toto zařízení bylo propojeno s počítačem, který byl vybaven laboratorním softwarem testXpert, který řídil chod zkoušky a provedl záznam hodnot.

Před vlastním zahájením zkoušky bylo nutné zadat do programu potřebné údaje, jako jsou rozměry a hmotnost zkušebního tělíska. Zkušební vzorek byl vložen mezi tlačné čelisti stroje a byl spuštěn vlastní test. Těleso bylo namáháno na tlak normálovou silou působící ve směru vláken potažmo napříč vláken. Průběh zkoušky bylo možné sledovat na pracovním diagramu, který byl v reálném čase vykreslován na obrazovku monitoru.

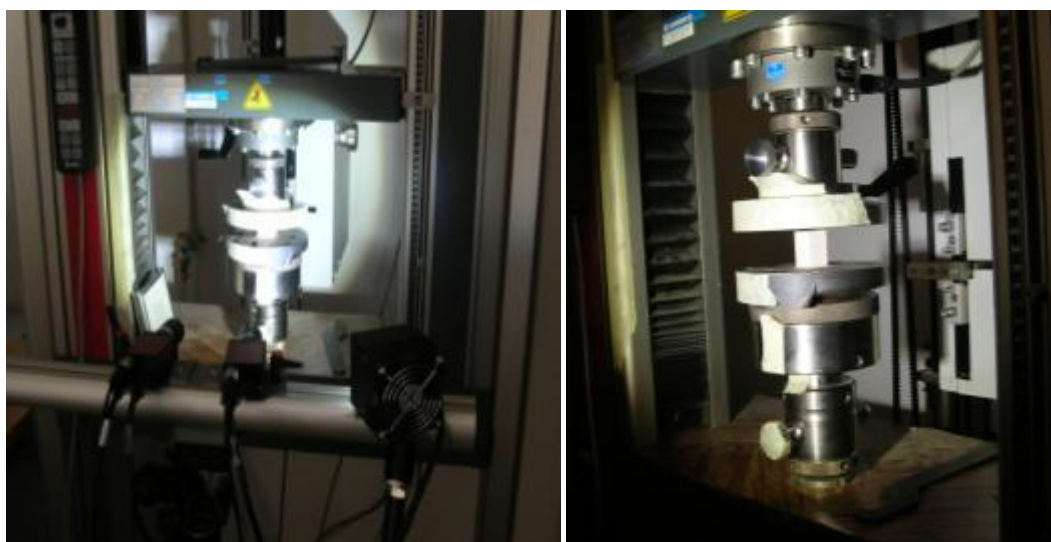
Výstupem ze software testXpert byly následující měřené veličiny: maximální dosažená síla (F_{max}), modul pružnosti (E) a hustota dřeva.

4.1.3 Optické snímání

Zároveň se spuštěním mechanického namáhání se sepnulo zařízení pro snímání obrazu. Snímací zařízení se skládalo ze dvou digitálních kamer, umístěných ve stejné výšce jako zkušební těleso (obr. 12). Při snímání musí být zaručeno, aby snímaná plocha byla kolmá k senzoru kamery, aby nedocházelo ke zkreslení obrazu. Pro zajištění dobrých světelných podmínek, bylo těleso osvětlováno světelným zdrojem umístěným na stativu, taktéž ve stejné výšce jako je zkušební těleso, aby nedošlo k zastínění tělesa.

Před začátkem měření bylo nutné provést kalibraci kamer pomocí kalibračního terčíku. V našem případě byl použit kalibrační terč s roztečí 4mm.

Na povrch měřených těles jsou kladeny určité požadavky. Povrch snímané části musí být opatřen unikátní kontrastní maticí. Ta byla provedena práškovým sprejem.



Obr. 12 Vlevo - stereovizní snímací zařízení včetně světel, vpravo – tělísko ve zkušebním stroji

Postup zkoušky:

1. Vážení zkušebních tělísek na digitální analytické váze s přesností 0,001 g
2. Měření zkušebních tělísek digitálním posuvným měřítkem s přesností 0,01mm
3. Uložení zkušebního tělíska do zkušebního stroje – Zwick Z050
4. Spuštění zkušebního stroje prostřednictvím softwaru testXpert + snímání pomocí optických kamer
5. Ukončení testu a zápis dat do PC

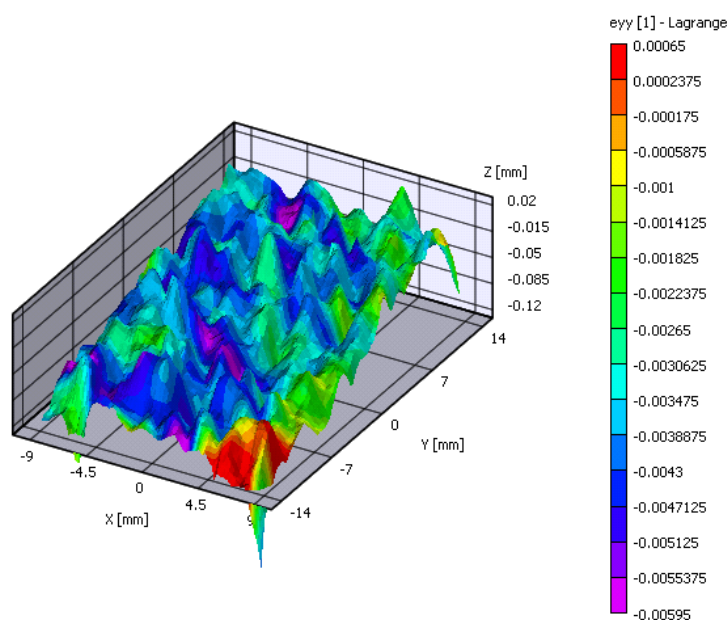
4.1.4 Vyhodnocení pořízených snímků

Pro vyhodnocení získaných snímků byl použit komerční software VIC-3D společnosti *Correlated Solutions, Ins.* Optimalizovaný pro korelaci digitálního obrazu. Algoritmy umožňují analýzu kompletního snímaného pole („*full-field analysis*“).

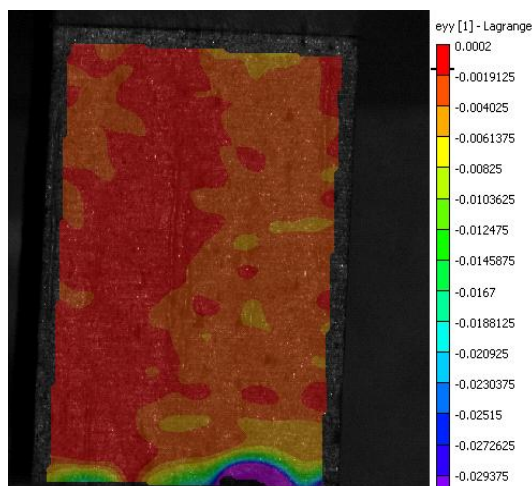
Výpočetní systém VIC-3D spočítá posunutí a poměrné deformace pro každý bod na povrchu zkušební tělesa. v tzv. oblasti zájmu (tzv. *Area of Interest*), kterou si před spuštěním výpočtu graficky v software nadefinujeme. Tu si můžeme nadefinovat v libovolném tvaru, nejčastěji však ve tvaru obdélníku, poté ji definujeme přes ikonu (*create rectangle*). Pokud potřebujeme lze obdélník dodatečně opravit tahem jeho rohů, aby vyšetřovaná oblast byla co nejpřesnější.

Dále musíme nastavit velikost podmnožin (*subsetu*) a rozestupy (*step*) mezi počítanými podmnožinami. Nahrajeme do programu kalibrační soubor. Ten jsme pořídili při kalibraci kamer. Dále byl spuštěn výpočet posunutí a poměrných deformací (*start analysis*) všech označených snímků. Po proběhnutém výpočtu se podíváme na grafické výsledky pomocí nabídky *Show 3D*. Ukázku výsledků můžeme vidět na obr. 13 a 14.

Získané hodnoty vyexportuje do textového souboru a ten následně převedeme do tabulkového programu např. Excel pro další zpracování dat.



Obr. 13 Deformace eyy 3D výstup



Obr. 14 Deformace e_{yy} ve 2D výstup

4.1.5 Pevnost dřeva a modul pružnosti v tlaku

Mez pevnosti dřeva byla zjišťována v souladu s ČSN 49 0110. Na základě vztahu byl prováděn výpočet meze pevnosti:

$$\sigma = \frac{F_{max}}{a \cdot b}$$

σ – mez pevnosti

F_{max} - maximální zatížení

$a \cdot b$ - příčné rozměry tělesa

Modul pružnosti v tlaku byl zjišťován v souladu s ČSN 49 0111. Je charakterizován podílem napětí a poměrné deformace podle vztahu:

$$E = \frac{d\sigma}{d\epsilon}$$

Po dosazení získáme vztah:

$$E = \frac{F \cdot l}{S \cdot \Delta u_1}$$

F – zatížení

l – původní délka tělesa před silovým působením

S – plocha, na kterou působí síla

Δu_1 – absolutní celková pružná deformace

4.2 Zkouška v tahu

4.2.1 Zkušební tělíska

Pro tahovou zkoušku byla vyrobena zkušební tělíska ve tvaru jaký je možno vidět na obr. 15. Tvar je určen a limitován samotným provedením zařízení iErudia. Na výrobu bylo opět použito balzové dřevo určené pro komerční účely. Tentokrát z plátů o velikosti 1250 x 100 x 1 mm o hustotě 100 kg/m³ (dáno výrobcem). Tloušťka 1mm je dána systémem pro uchycení vzorku viz obr. 18. Tvar zkušebních těles pro tahovou zkoušku podél vláken i kolmo na vlákna byl téměř totožný. Vnější rozměry 55 x 26 mm, šířka v pracovní části byla 6 mm. Tělesa pro tah podél vláken musela být v pracovní části zúžena jak je vidět na obr. 14 o 2 až 3 mm.



Obr. 15 Tělíska vlevo je plastový vzor pro výrobu zkušebních těles; ostatní jsou zkušební tělíska z balzy

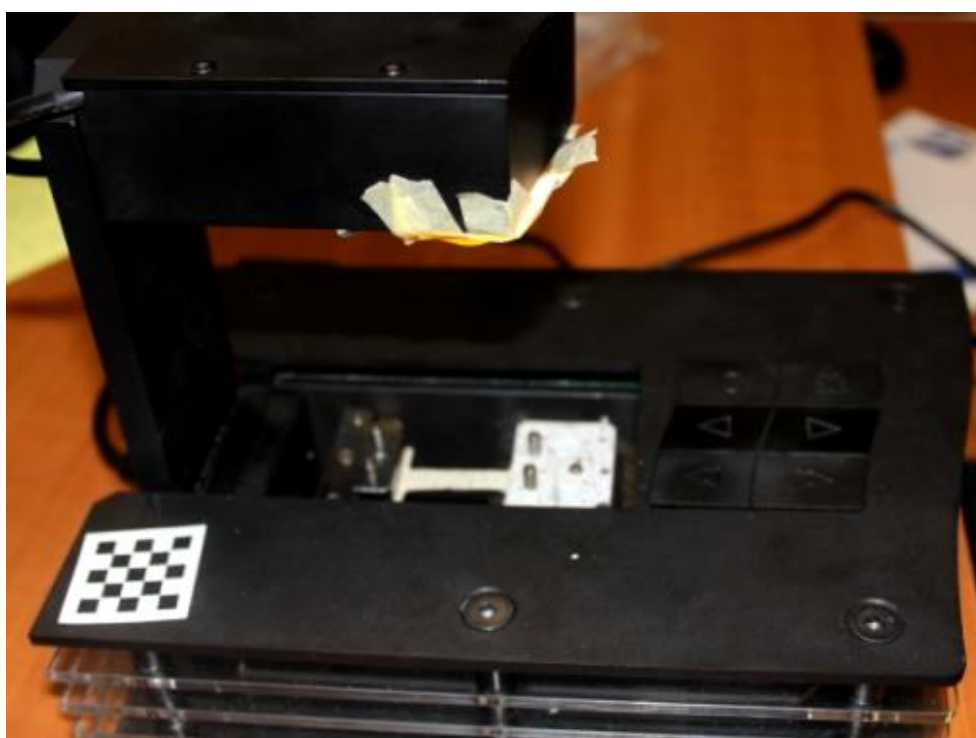


Obr. 16 Tvar zkušebního tělesa pro tahovou zkoušku podél vláken

4.2.2 Zkušební stroj iErudio

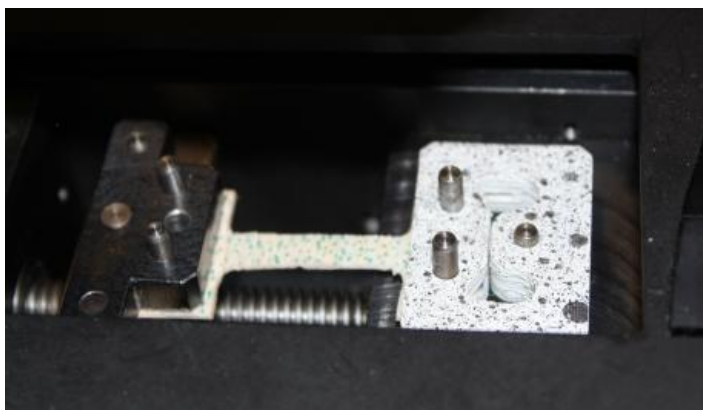
Jedná se o prototyp „minitrhačky“, s možností provádět tahovou, smykovou, ohybovou a tlakovou zkoušku. Rozměry zkušební minitrhačky jsou 245 x 160 x 200 mm a hmotnost je 3,1 kg.

Na obr. 17 můžeme vidět zkušební „minitrhačku“, která se skládá z kamery pro záznam zkoušky v horní části a světelného zdroje poskytujícího dostatek světla k získání kontrastu v naneseném paternu na zkušebních vzorcích. Tělo trhačky tvoří prostor pro upevnění zkušebního tělesa, pod kamerou a ovládací panel na obr. 17 v pravé části.



Obr. 17 Zkušební minitrhačka iErudio

Zkušební těleso je pevně spojeno s trhačkou pomocí kolíků viz obr. 18. Pravá část je pevně spojena, levá část je na šroubovici tedy posuvná. Pomocí ovládacího zařízení můžeme čelisti stlačovat pro tlakovou zkoušku nebo oddalovat právě pro prováděnou tahovou zkoušku.



Obr. 18 Detail uchycení zkušebního tělíska v zařízení iErudio

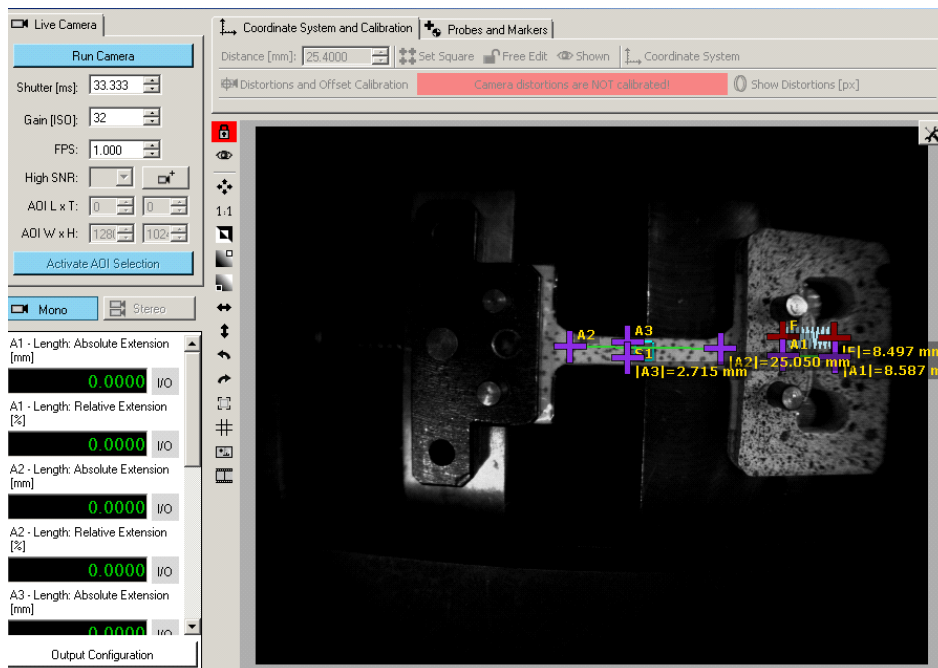
4.2.3 Software Mercury RT

Software Mercury RT měří deformace vzorků v reálném čase při testování za použití kamery. Systém umožňuje uživateli analyzovat měření buď v režimu offline, nebo v režimu online. Výpočet se provádí v reálném čase a vypočítané hodnoty můžeme opět exportovat do textového souboru a dále s ním pracovat.

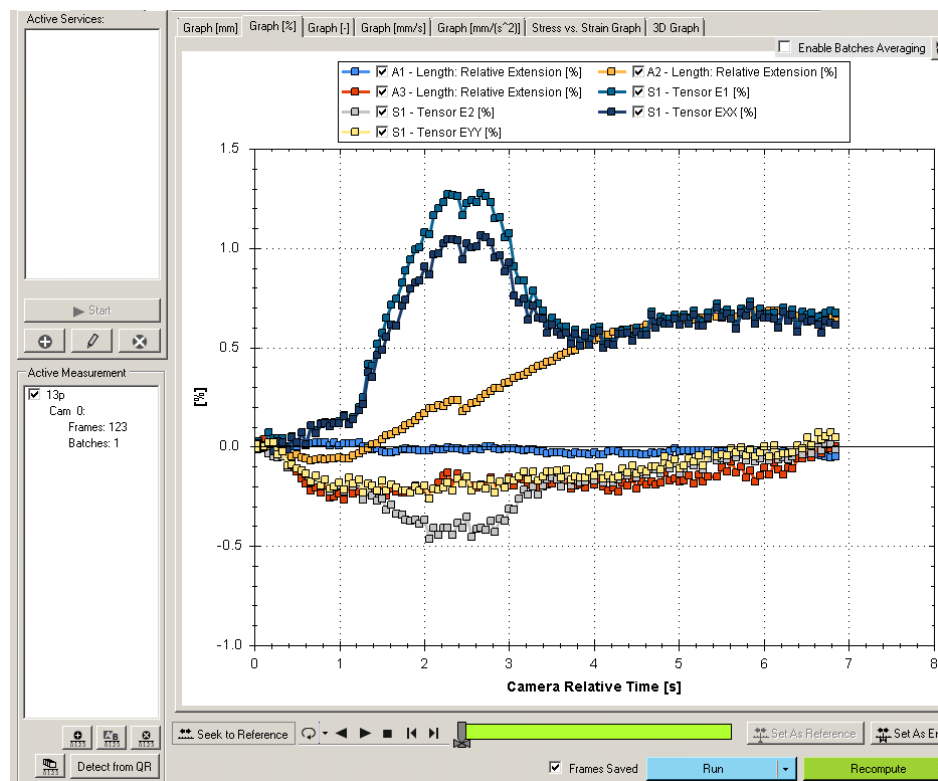
Typické použití tohoto programu je pro stanovení různým materiálových vlastností (tahové zkoušky, tlakových), měření deformací, vysokorychlostní testování, měření vibrací, šíření trhlin, dynamické testování a kontroly kvality.

Bezkontaktní optické technologie měření se posouvají ve vývoji stále kupředu a to hlavně pokud jde o přesnost a rychlost (mercuryprogram.eu).

Na obr. 19 je vidět pracovní prostředí programu Mercury RT a na obr. 20 záznam zkoušky v programu Mercury RT.



Obr. 19 Pracovní prostředí software Mercury RT



Obr. 20 Zobrazení záznamu zkoušky v programu Mercury RT

4.2.4 Příprava tahové zkoušky

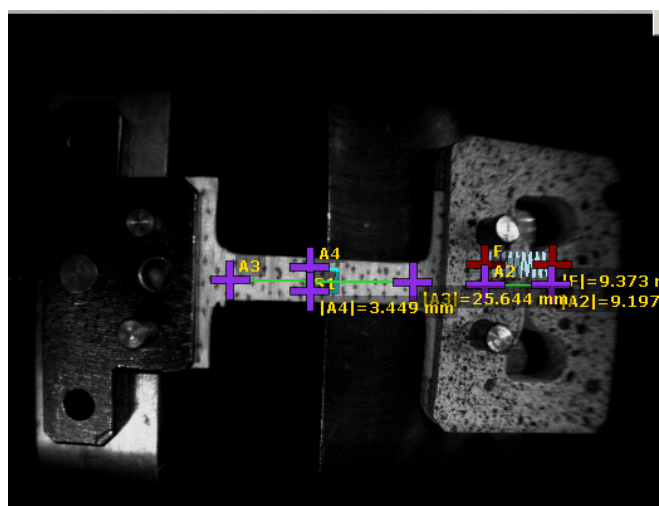
Poté co je na zkušební těleso nanesen kontrastní vzor a je mechanicky upevněno do minitřhačky jak je vidět na obr. 21 přichází na řadu nastavení programu, samotné mechanické namáhání a záznam pomocí programu Mercury RT.

Po otevření programu zadáme nový projekt pomocí ikony „New project“, následuje kalibrace pomocí kalibrační destičky. Tu můžeme vidět na obr. 17 a pomocí ikony „calibration“ kalibrujeme. Přepneme záložku karet na „ Probes and Markers“. Zde si postupně nastavíme snímače, které zaznamenají průběh zkoušky.

Nejprve je nutné nastavit senzor „F“ pomocí „Force guards“, který nám zaznamenává sílu. Následují senzory „A2, A3, A4“ pomocí ikony „Line probe“ ty zaznamenávají deformace zkušebního tělíska. Senzory můžeme vidět na obr. 21.

Nutné je zdůraznit, že plastová destička, na které je umístěn senzor „F a A2“ slouží k následnému vyhodnocení, získání reálné síly působící na namáhané tělísko.

Po nastavení nezbyvá než zapnout start a spustí se záznam zkoušky a pomocí ovládacího zařízení začít roztahovat čelisti až do porušení zkušebního vzorku. Poté je zkouška u konce.



Obr. 21 Zkušební tělísko připravené na záznam zkoušky

4.2.5 Vyhodnocení tahové zkoušky

Záznam zkoušky můžeme vidět na obr. 20. Získané hodnoty, pokud se nám zdají neúplné například z důvodu, že senzory nezachytili kontrastní patern, můžeme zkoušku přepočítat. Přepočet provedeme tak, že zvolený senzor posuneme a zpustíme ikonu „recompute“.

Když jsme s naměřenými hodnotami spokojeni, vyexportujeme si je do textového souboru a následně provádíme vyhodnocení pomocí tabulkového procesoru. Jak už bylo zmíněno dříve, musíme si vypočítat reálnou sílu v (N) působící na těleso a to přes tuhost plastového dílce. Tuhost plastového dílce je $k= 1541,150 \text{ N/mm}$. Když touto hodnotou vynásobíme jednotlivá posunutí v (mm), která získáme ze senzoru, umístěného na plastovém dílci, získáme reálné síly v (N) působící na zkušební těleso.

Z lineární oblasti pružné deformace následuje výpočet normálového napětí ze vztahu $\sigma = \frac{F}{S}$ (MPa), deformace dle vztahu $\varepsilon = \frac{\Delta u}{l}$ (-) a z těchto vztahů následně modul pružnosti dle vztahu $E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$ (MPa).

Dále je z lineární oblasti deformace každého měřeného tělesa, odečtena průměrná hodnota poměrné příčné deformace ε_{xx} a podélné deformace ε_{yy} . Z těchto hodnot jsou dle vztahu $\mu = -\frac{\varepsilon_{xx}}{\varepsilon_{yy}}$ (-) vypočtena Poissonova čísla.

4.3 Výpočtový modul pružnosti ve smyku

K výpočtu modulu pružnosti ve smyku jsme použili data z tlakové zkoušky. Konkrétně pro výpočet modulu pružnosti ve smyku jsou zapotřebí modul pružnosti v tlaku a Poissonovo číslo.

Pro výpočet byl použit vztah $G = \frac{E_1}{\mu_{12}}$ (MPa) pro smykový modul pružnosti v rovině LR a $G = \frac{E_1}{\mu_{13}}$ (MPa) pro smykový modul pružnosti v rovině LT.

4.4 Ohybová zkouška

4.4.1 Zkušební tělesa

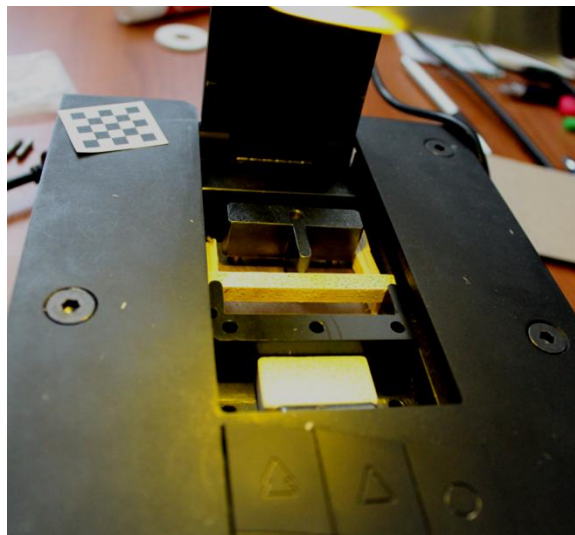
Pro ohybovou zkoušku byla vyrobena zkušební tělíska ve tvaru jak je vidět na obr. 22, který je dán šířkou podpěr minitřačky pro ohybovou zkoušku. Na výrobu bylo opět použito balzové dřevo určené pro komerční účely. Tentokrát z plátů o velikosti 1250 x 100 x 6 mm o hustotě 100 kg/m³ (dáno výrobcem). Výsledný tvar zkušebních hranolů byl 60 x 7 x 6 mm.



Obr. 22 Zkušební tělíska pro ohybovou zkoušku

4.4.2 Příprava ohybové zkoušky

Na zkoušku v ohybu je použita stejně jako pro tahovou zkoušku minitrhačka iErudio za použití upínacích čelistí pro ohybovou zkoušku jak je vidět na obr. 23.



Obr. 23 Upnutí pro ohybovou zkoušku

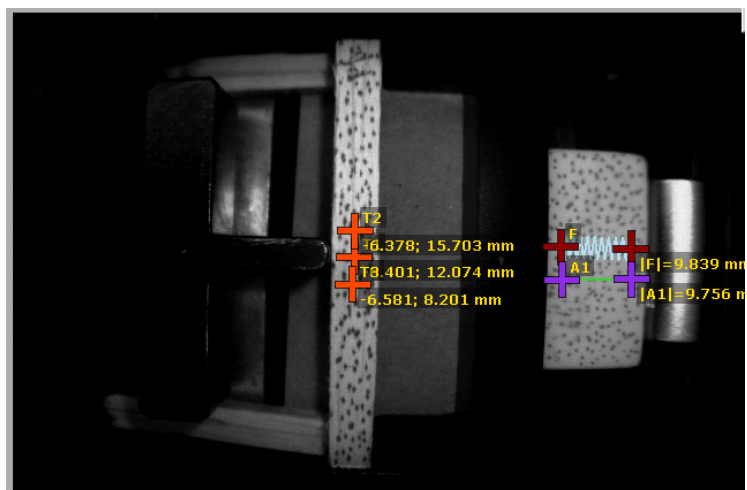
Poté co je na zkušební těleso nanesen kontrastní vzor a je mechanicky upevněno do minitrhačky jak je vidět na obr. 23 přichází na řadu nastavení programu, samotné mechanické namáhání a záznam pomocí programu Mercury RT. Nastavení probíhá obdobně jako u tahové zkoušky.

Po otevření programu zadáme nový projekt pomocí ikony „*New project*“, následuje kalibrace pomocí kalibrační destičky a pomocí ikony „*calibration*“ kalibrujeme. Přepneme záložku karet na „*Probes and Markers*“. Zde si postupně nastavíme snímače, které zaznamenají průběh zkoušky.

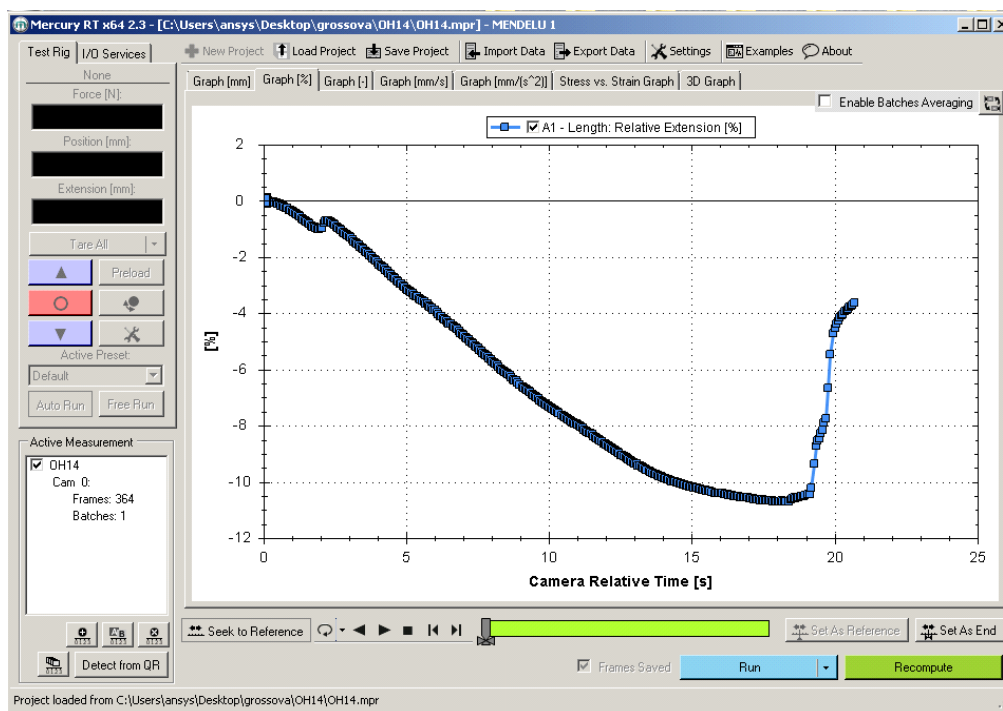
Nejprve je nutné nastavit senzor „F“ pomocí „*Force guards*“, který nám zaznamenává sílu. Následují senzory „T1, T2, T3“ pomocí ikony „*Point probe*“ ty zaznamenávají posunutí v ose namáhání zkušebního tělíska. Senzory můžeme vidět na obr. 24.

Nutné je zdůraznit, že pryž, na které je umístěn senzor „F a A1“ slouží k získání reálné síly působící na namáhané tělísko.

Po nastavení nezbyvá než zapnout start a spustí se záznam zkoušky a pomocí ovládacího zařízení začít stlačovat čelisti až do porušení zkušební vzorku. Poté je zkouška u konce.



Obr. 24 Zkušební tělísko připravené na záznam ohybové zkoušky



Obr. 25 Zobrazení záznamu zkoušky v programu Mercury RT

4.4.3 Vyhodnocení ohybové zkoušky

Záznam zkoušky můžeme vidět na obr. 25. Pokud jsme s naměřenými hodnotami spokojeni, nechceme je pomocí ikony „recompute“ přepočítat, vyexportujeme si je do textového souboru a následně provádíme vyhodnocení pomocí tabulkového procesoru. Jak už bylo zmíněno dříve, musíme si vypočítat reálnou sílu v (N) působící na těleso a to přes tuhost pryže. Tuhost pryže je $k = 37,61 \text{ N/mm}$. Když touto hodnotou vynásobíme jednotlivá posunutí v (mm), která získáme ze senzoru, umístěného na pryži, získáme reálné síly v (N) působící na zkušební těleso.

4.4.4 Pevnost dřeva a modul pružnosti dřeva ve statickém ohybu

K výpočtu meze pevnosti dřeva ve statickém ohybu bylo použito vztahu:

$$\sigma = \frac{3F_{max}l}{2bh^2}$$

σ – mez pevnosti dřeva

F_{max} – maximální zatížení

l – vzdálenost mezi podpěrami

b – šířka zkušební tělesa

h – výška zkušební tělesa

Modul pružnosti ve statickém ohybu byl zjišťován ze vztahu:

$$E = \frac{F_{max}l^3}{4bh^3y}$$

E_w – modul pružnosti dřeva v ohybu

F_{max} – maximální zatěžovací síla

l – vzdálenost mezi podpěrami

b – šířka zkušební tělesa

h – výška zkušební tělesa

y – průhyb zkušební tělíska

Modul pružnosti je nutné přenásobit korekčním součinitelem, koeficientem $f=10$. Tato hodnota vzešla z experimentálních měření.

4.5 Statistické metody a vyhodnocení

Pro zpracování statistické části byl použit EXCEL – tabulkový procesor a program STATISTICA. Použité statistické charakteristiky: aritmetický průměr, minimum, maximum, směrodatná odchylka, variační koeficient a rozptyl.

Aritmetický průměr: Charakterizuje hodnotu, okolo níž kolísají jednotlivé prvky souboru.

Definice Aritmetického průměru: součet všech hodnot vydělený jejich počtem

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_j$$

x_j ... naměřené hodnoty

n ... počet naměřených hodnot

Minimum: je matematická funkce, jejíž funkční hodnota představuje nejnižší hodnotu ze všech vstupních parametrů.

Maximum: je matematická funkce, jejíž funkční hodnota představuje nejvyšší hodnotu ze všech vstupních parametrů (Meloun, Militický, 2004)

Směrodatná odchylka: V teorii pravděpodobnosti a statistice se často používanou mírou statistické disperse. Jedná se o kvadratický průměr odchylek hodnot znaku od aritmetického průměru.

$$\sigma = \sqrt{D(X)} = \sqrt{\text{var}X}$$

$D(X)$... rozptyl náhodné veličiny X

Rozptyl: (střední kvadratická odchylka, střední kvadratická fluktuace, variace nebo disperze) používá se v teorii pravděpodobnosti a statistice. Jedná se o charakteristiku variability rozdělení pravděpodobnosti náhodné veličiny, která vyjadřuje variabilitu rozdělení souboru náhodných hodnot kolem její střední hodnoty.

Definice: rozptyl je definován jako střední hodnota kvadrantů odchylek od střední hodnoty. Odchylku od střední hodnoty, která má rozměr stejný jako náhodná veličina, zachycuje směrodatná odchylka.

Variační koeficient: je užitečnou mírou relativního rozptýlení dat. Počítá se jako podíl směrodatné odchylky k průměru v procentech.

$$v = \frac{s}{\bar{x}} \times 100\%$$

S ... aritmetický průměr

\bar{x} ... směrodatná odchylka

ANOVA : Neboli analýza rozptylu je metodou matematické statistiky, která umožňuje ověřit, zda hodnota náhodné veličiny pro určitého jedince má statisticky významný vliv hodnota některého znaku, který se dá u jedince pozorovat.

Podmínky použití: všechny porovnávané výběry jsou nezávislé, výběry pocházejí ze základních souborů s normálním rozdělením, všechny výběry pocházejí ze základních souborů se shodnými rozptyly.

5 Výsledky a diskuze

5.1 Tlaková zkouška

5.1.1 Mez pevnosti v tlaku

Pro experimentální určení meze pevnosti v tlaku podél vláken bylo použito 8 zkušebních tělísek na dvou rovinách LT a LR. Hodnota aritmetického průměru meze pevnosti v tlaku podél vláken na rovině LT 5,87 MPa s variačním koeficientem 41,340 % a na rovině LR 7,782 MPa a 37,379 % (tab. 2). Z tabulky 4 je zřejmé že hodnoty aritmetických průměrů pro mez pevnosti v tlaku podél vláken na jednotlivých rovinách se liší. Rozdíl mezi aritmetickými průměry je 1,912 MPa.

Tsoumis (1991) uvádí mez pevnosti v tlaku podél vláken 6,9 – 9 MPa při hustotě 160 kg/m³. Další literatura tentokrát Wood handbook (2010) uvádí mez pevnosti v tlaku podél vláken 7 MPa při hustotě balzy 130 kg/m³, Viot et al. (2014) uvádějí mezi pevnosti v tlaku podél vláken 5 – 18 MPa při hustotě balzy 220 kg/m³.

Jak je vidět variabilita meze pevnosti balzy podél vláken je poměrně vysoká a závisí na její hustotě. V některých případech je rozmezí hodnot velice vysoké, i když mají udanou shodnou hustotu dřeva.

Tab.1 Mez pevnosti v tlaku

Mez pevnosti v tlaku (MPa)									
	ρ kg/m ³	LT	ρ kg/m ³	LR		ρ kg/m ³	TR	ρ kg/m ³	TL
1	101	9,51	138	11,37	1	101	0,57	120	0,57
2	75	4,72	101	8,77	2	86	0,53	87	0,44
3	75	4,76	83	4,77	3	85	0,50	120	0,57
4	76	4,49	87	6,21	4	99	0,54	116	0,57
					5	106	0,53	115	0,60
					6	86	0,49	116	0,55
					7	87	0,52	113	0,56
					8	107	0,54	113	0,57

Tab. 2: Mez pevnosti dřeva v tlaku (MPa) na měřených rovinách. Popisná charakteristika

	počet	Průměr	Medián	Min	Max	Dolní Kvartyl	Horní kvartyl	rozptyl	Sm. Odchylka	Var. Koef.
LT	4	5,870	4,741	4,492	9,506	4,607	7,134	5,889	2,427	41,340
LR	4	7,782	7,493	4,772	11,372	5,493	10,072	8,462	2,909	37,379
TR	8	0,527	0,533	0,485	0,567	0,509	0,541	0,001	0,025	4,826
TL	8	0,553	0,567	0,442	0,599	0,555	0,572	0,002	0,047	8,573

Mez pevnosti v tlaku napříč vláken bylo použito 16 zkušebních tělísek na dvou rovinách TL a TR. Hodnota aritmetického průměru tzv. konvenční meze pevnosti v tlaku napříč vláken je na rovině TR 0,527 MPa s variačním koeficientem 4,826 % a na rovině TL je konvenční mez pevnosti 0,553 MPa s variačním koeficientem 8,573% (tab. 4). Z tabulky 4 je zřejmé že hodnoty aritmetických průměrů pro konvenční mez pevnosti v tlaku napříč vláken na jednotlivých rovinách se liší opravdu minimálně. Rozdíl mezi aritmetickými průměry je pouze 0,026 MPa.

Tsoumis (1991) uvádí konvenční mez pevnosti v tlaku napříč vláken 1 MPa při hustotě 160 kg/m³, námi zjištěné hodnoty při průměrné hustotě 104 kg/m³ jsou 0,55 MPa.

Tab.3 jednofaktorová ANOVA pro mez pevnosti v tlaku podél vláken

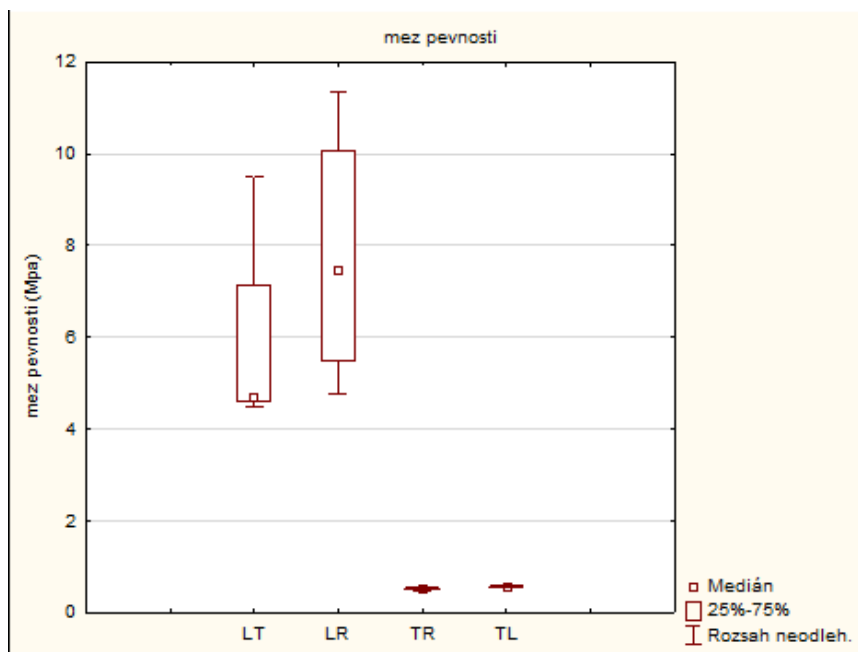
ANOVA						
<i>Zdroj variability</i>	<i>SS</i>	<i>Rozdíl</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Hodnota P</i>	<i>F krit</i>
Mezi výběry	5,571	1	5,571	2,702	0,175	7,708
Všechny výběry	8,246	4	2,061			
Celkem	13,818	5				

Šetřením jednofaktorové ANOVY bylo zjištěno, že rozdíl mezi středními hodnotami na mezi pevnosti ve směru podél vláken není statisticky významný (tab. 2). Tedy hodnota $P > 0,05$.

Tab. 4 jednofaktorová ANOVA pro konvenční mez pevnosti v tlaku napříč vláken

ANOVA						
<i>Zdroj variability</i>	<i>SS</i>	<i>Rozdíl</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Hodnota P</i>	<i>F krit</i>
Mezi výběry	0,0030	1	0,0030	2,033	0,179	4,747
Všechny výběry	0,0182	12	0,0015			
Celkem	0,0213	13				

Šetřením jednofaktorové ANOVY bylo zjištěno, že rozdíl mezi středními hodnotami na mezi pevnosti ve směru kolmém na vlákna není statisticky významný (tab. 3). Tedy hodnota $P > 0,05$.



Obr. 26 Meze pevnosti v tlaku srovnání jednotlivé roviny

Na obrázku 24 je krabicový graf, který znázorňuje mez pevnosti v tlaku na jednotlivých rovinách. Z grafu vyplývá, že rozdíl mezi pevností podél vláken a kolmo na vlákna je statisticky významný.

Tab. 5 jednofaktorová ANOVA pro mez pevnost v tlaku

Zdroj variability	SS	Rozdíl	MS	F	Hodnota P	F krit
Mezi výběry	151,729	1	151,729	113,345	1,09E-09	4,351
Všechny výběry	26,773	20	1,339			
Celkem	178,501	21				

Rozdíly hodnot nám potvrdilo i šetření pomocí jednofaktorové ANOVY v tabulce 5. Zjistili jsme, že rozdíl mezi středními hodnotami meze pevnosti podél vláken a konvenční meze pevnosti napříč vláken je statisticky významný, tedy hodnota $P < 0,05$.

Tyto rozdíly se daly očekávat. Literatura uvádí, že mez pevnosti podél vláken je průměrně 10 krát větší než konvenční mez pevnosti napříč vláken pro všechny dřeviny. Výsledky nám potvrzují, že ani u balzového dřeva tomu není jinak.

Celkově by se dalo říci, že hodnoty našeho experimentu na mez pevnosti v tlaku se neliší od hodnot získaných z literatury.

5.1.2 Modul pružnosti v tlaku

Pro experimentální určení modulu pružnosti v tlaku podél vláken byla použita stejná zkušební tělísko na dvou rovinách LT a LR jako u meze pevnosti v tlaku podél vláken. Hodnota aritmetického průměru modulu pružnosti v tlaku podél vláken na rovině LT 194,76 MPa s variačním koeficientem 57,13 % a na rovině LR 230,47 MPa s variačním koeficientem 58,49 % (tab. 7). Z tabulky 7 je zřejmé že hodnoty aritmetických průměrů pro modul pružnosti v tlaku podél vláken na jednotlivých rovinách se liší. Rozdíl mezi aritmetickými průměry je 35,71 MPa.

Viot et al. (2014) uvádějí modul pružnosti v tlaku podél vláken 800 MPa při hustotě balzy 220 kg/m³, námi zjištěné hodnoty při průměrné hustotě 92 kg/m³ jsou 212 MPa.

Tab. 6 Modul pružnosti v tlaku

Modul pružnosti v tlaku (MPa)									
	ρ kg/m ³	LT	ρ kg/m ³	LR		ρ kg/m ³	TR	ρ kg/m ³	TL
1	101	352,14	138	406,39	1	101	32,31	120	27,83
2	75	103,15	101	249,21	2	86	34,58	87	43,37
3	75	192,14	83	86,93	3	85	31,90	120	28,26
4	76	131,63	87	179,34	4	99	40,13	116	28,89
					5	106	33,26	115	31,25
					6	86	33,33	116	26,85
					7	87	33,07	113	29,97
					8	107	31,54	113	24,10

Tab. 7 Modul pružnosti dřeva v tlaku (MPa) na měřených rovinách. Popisná charakteristika

	počet	Průměr	Medián	Min	Max	Dolní Kvartyl	Horní kvartyl	rozptyl	Sm. Odchylka	Var. Koef.
LT	4	194,765	161,885	103,150	352,140	117,390	272,140	12384,373	111,285	57,138
LR	4	230,468	214,275	86,930	406,390	133,135	327,800	18172,347	134,805	58,492
TR	8	33,765	33,165	31,540	40,130	32,105	33,955	7,522	2,743	8,122
TL	8	30,065	28,575	24,100	43,370	27,340	30,610	33,427	5,782	19,230

Na modul pružnosti v tlaku napříč vláken byla použita stejná zkušební tělíska jako pro konvenční mez pevnosti v tlaku napříč vláken. Hodnota aritmetického průměru modulu pružnosti v tlaku napříč vláken je na rovině TR 33,77 MPa s variačním koeficientem 8,122 % a na rovině TL je modul pružnosti 30,06 MPa s variačním koeficientem 19,23 % (tab. 10). Z tabulky 7 je zřejmé že hodnoty aritmetických

průměrů pro modul pružnosti v tlaku napříč vláken na jednotlivých rovinách se liší. Rozdíl mezi aritmetickými průměry je pouze 3,71 MPa.

Viot et al. (2014) uvádějí modul pružnosti v tlaku napříč vláken 50 MPa při hustotě balzy 220 kg/m^3 , námi zjištěné hodnoty při průměrné hustotě 104 kg/m^3 jsou 32 MPa.

Tab. 8 Jednofaktorová ANOVA pro modul pružnosti v tlaku podél vláken

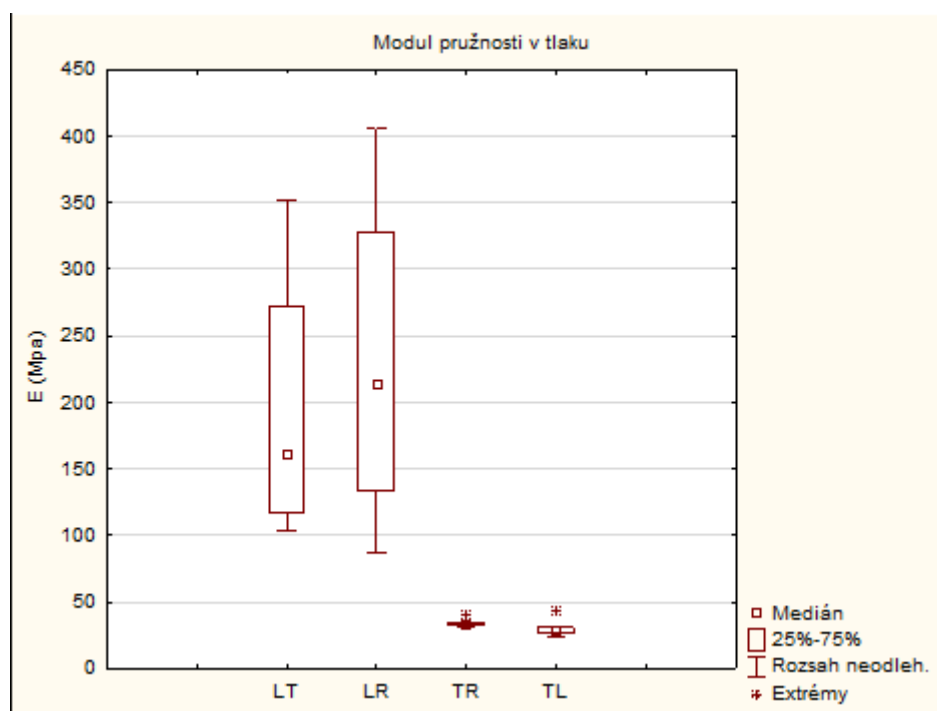
ANOVA						
<i>Zdroj variability</i>	<i>SS</i>	<i>Rozdíl</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Hodnota P</i>	<i>F krit</i>
Mezi výběry	2549,33	1	2549,33	0,16	0,69	5,98
Všechny výběry	91670,16	6	15278,36			
Celkem	94219,49	7				

Šetřením jednofaktorové ANOVY bylo zjištěno, že rozdíl mezi středními hodnotami modulu pružnosti v tlaku ve směru podél vláken není statisticky významný (tab. 8). Tedy hodnota $P > 0,05$.

Tab. 9 Jednofaktorová ANOVA pro modul pružnosti v tahu napříč vláken

ANOVA						
<i>Zdroj variability</i>	<i>SS</i>	<i>Rozdíl</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Hodnota P</i>	<i>F krit</i>
Mezi výběry	54,76	1	54,76	2,67	0,12	4,60
Všechny výběry	286,63	14	20,47			
Celkem	341,39	15				

Šetřením jednofaktorové ANOVY bylo zjištěno, že rozdíl mezi středními hodnotami modulu pružnosti v tlaku ve směru napříč vláken není statisticky významný (tab. 9). Tedy hodnota $P > 0,05$.



Obr. 27 Moduly pružnosti na měřených rovinách

Moduly pružnosti znázorněné pomocí krabicového grafu nám ukazují, že se hodnoty modulů pružnosti výrazně liší podle toho, v jakém směru působila síla na zkušební těleso.

Tab. 10 Jednofaktorová ANOVA pro modul pružnosti v tlaku

ANOVA						
Zdroj variability	SS	Rozdíl	MS	F	Hodnota P	F krit
Mezi výběry	176753	3	58918	12,81	6,76E-05	3,09
Všechny výběry	91957	20	4597,8			
Celkem	268710	23				

Rozdíly nám potvrdilo i statistické šetření pomocí jednofaktorové ANOVY. V tabulce 10 vidíme, že rozdíl mezi středními hodnotami modulu pružnosti podél vláken a modulem pružnosti napříč vláken jsou statisticky významné.

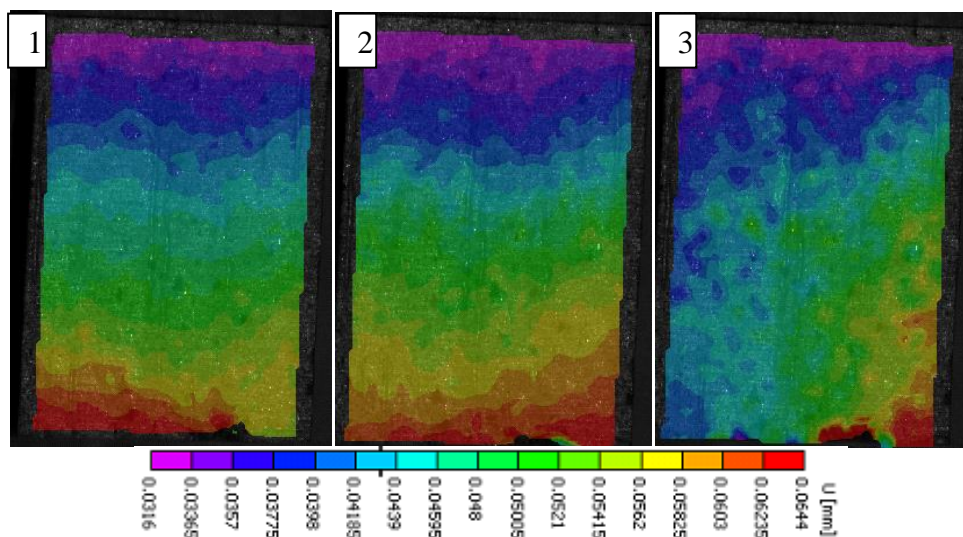
Námi vypočítané hodnoty jednotlivých modulů pružnosti v tlaku jsou opět srovnatelné s hodnotami získaných z literárních zdrojů, a můžeme náš experiment považovat za validní.

5.1.3 Poissonovo číslo

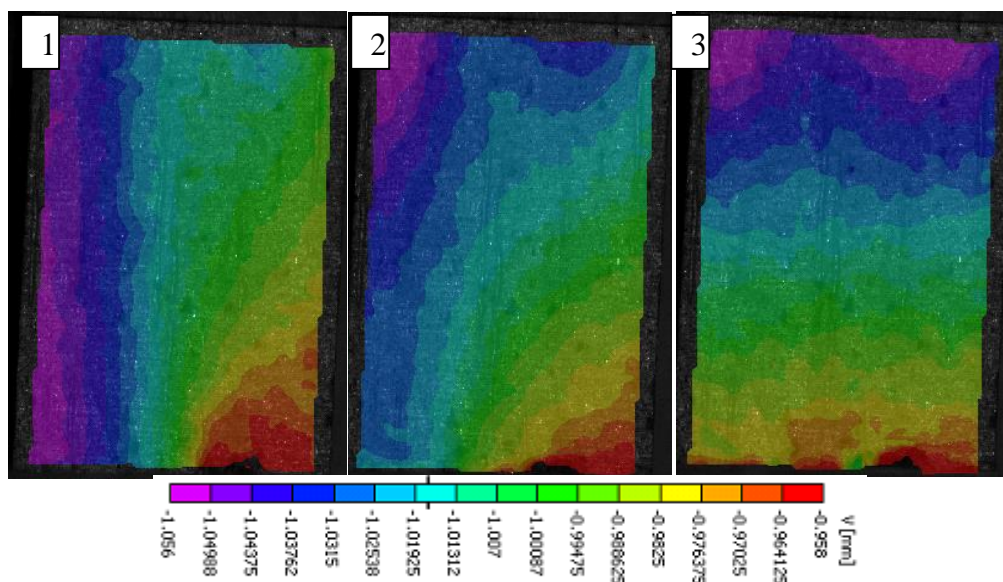
Z tlakové zkoušky byla vypočítána také Poissonova čísla pro jednotlivé zkoušené roviny. Na obrázcích níže vidíme grafické výstupy z programu VIC – 3D, kde

můžeme sledovat pole posunutí v podélném směru V tedy ve směru síly, a v příčném směru U tedy kolmo na směr síly. Tato posunutí ukazují reakci působící síly na materiál.

Barevné spektrum definuje velikost posunutí pixelů. Na obr. 28 a 29 vidíme, jak se mění hodnoty posuvů v jednotlivých směrech, následkem působení zatížení na balzové dřevo v průběhu zatížení

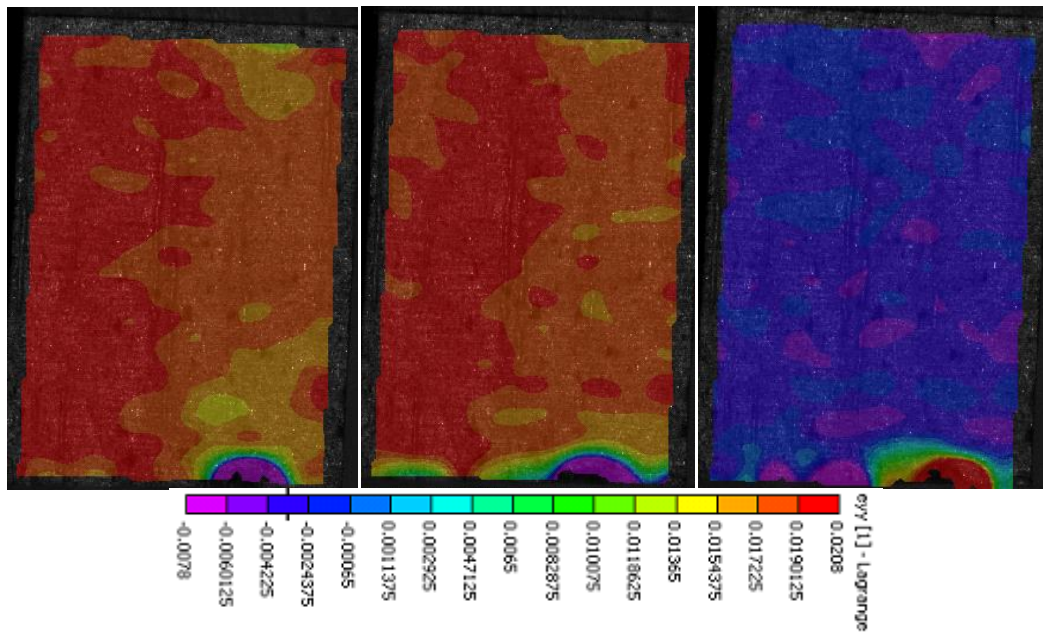


Obr. 28 Posunutí pixelů v příčném směru U ,

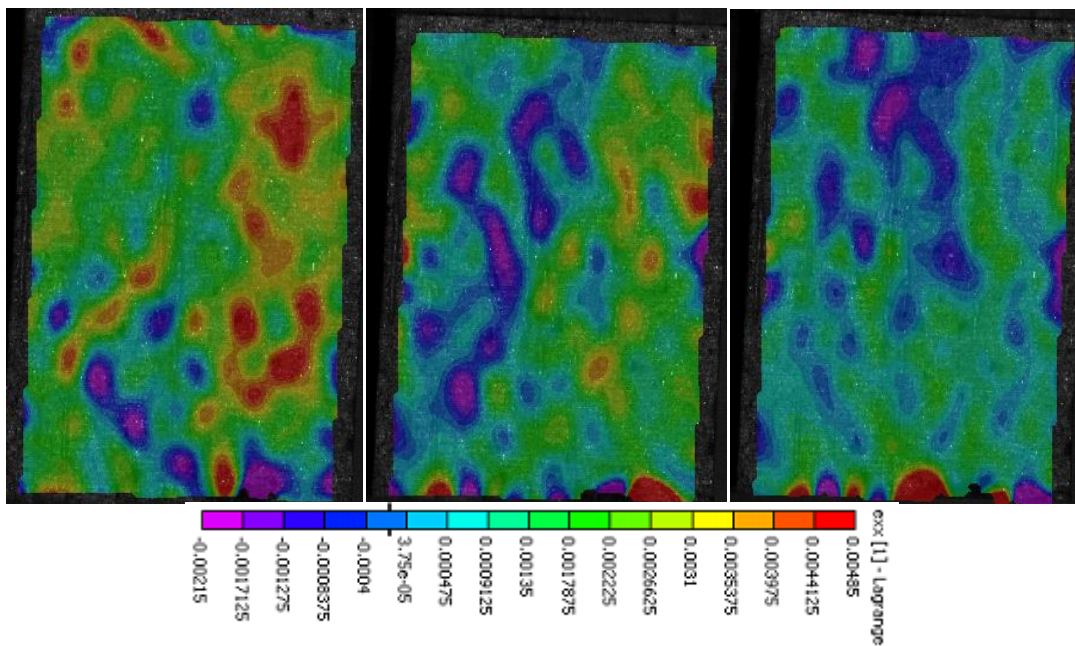


Obr. 29 Posunutí pixelů v podélném směru V

Z těchto posunutí program vypočítá poměrné deformace exx a eyy viz obr. 30 a 31.



Obr. 30 Podélná deformace e_{yy}

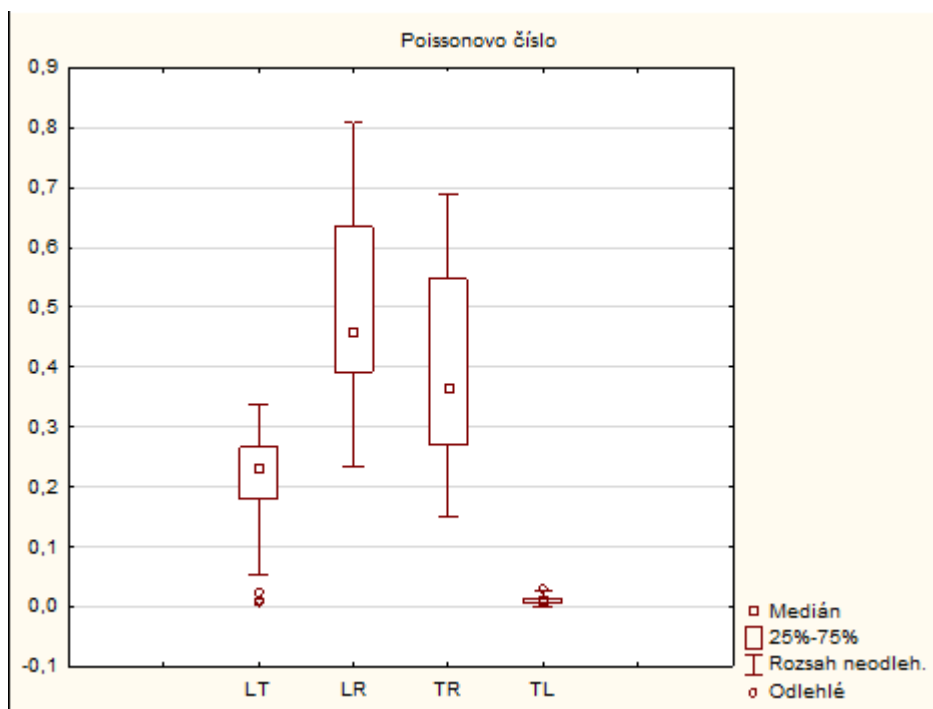


Obr. 31 Příčná deformace e_{xx}

Průměrné hodnoty na jednotlivých rovinách můžeme vidět v tabulce 11. Poissonovo číslo v rovině LT je $\mu=0,221$ v rovině LR je $\mu=0,501$ v rovině TR je $\mu=0,398$ a v rovině TL je $\mu=0,010$.

Tab. 11 Poissonova čísla na měřených rovinách. Popisná charakteristika

	počet	průměr	meidán	min	max	dolní kvartyl	horní kvartyl	rozptyl	SM odchyľka	Var. koef. %
LT	239	0,221	0,232	0,008	0,339	0,179	0,266	4,27E-03	0,065	29,525
LR	211	0,501	0,459	0,234	0,808	0,392	0,634	2,18E-02	0,148	29,464
TR	231	0,398	0,365	0,149	0,688	0,271	0,547	2,10E-02	0,145	36,422
TL	212	0,010	0,009	0,000	0,029	0,006	0,013	2,89E-05	0,005	54,525



Obr. 32 Poissonova čísla na měřených rovinách

Rozdílné hodnoty můžeme sledovat i na krabicovém grafu na obr. 32.

Tab. 12 Jednofaktorová ANOVA pro Poissonovo číslo

ANOVA						
Zdroj variability	SS	Rozdíl	MS	F	Hodnota P	F krit
Mezi výběry	29,845	3	9,948258	847,4106	3,9E-260	2,6149
Všechny výběry	10,437	889	0,01174			
Celkem	40,281	892				

Šetřením jednofaktorové ANOVY bylo zjištěno, že rozdíl mezi středními hodnotami Poissonova čísla je statisticky významný.

V literatuře konkrétně v knize wood handbook (2010), jsou zaznamenány tyto hodnoty Poissonova čísla pro balzové dřevo $\mu_{LT}= 0,229$; $\mu_{LR}= 0,488$; $\mu_{TR}= 0,231$; $\mu_{TL}= 0,009$.

Při zatížení normálovým tlakem dochází, dle standardního Poissonova jevu, k prodloužení materiálu v příčném směru, tedy kladným hodnotám Poissonova čísla. Což nám náš experiment potvrdil.

Námi zjištěné hodnoty při srovnání s literaturou se nikterak neliší až na Poissonovo číslo v rovině TR, které nám vyšlo téměř dvojnásobné.

5.2 Zkouška v tahu podél vláken

5.2.1 Mez pevnosti v tahu podél vláken

Pro výpočet meze pevnosti v tahu podél vláken bylo ze sady měření vybráno 5 zástupců vhodných pro vyhodnocení z celkových dvanácti měření. Hodnoty meze pevnosti, jsou vidět v tab. 13. Vzorky, které byly vyřazeny ze statistiky, se porušily smykem mimo pracovní část u kolíkových uchycení. Problémy s měřením pomocí iErudio jsou diskutovány dále.

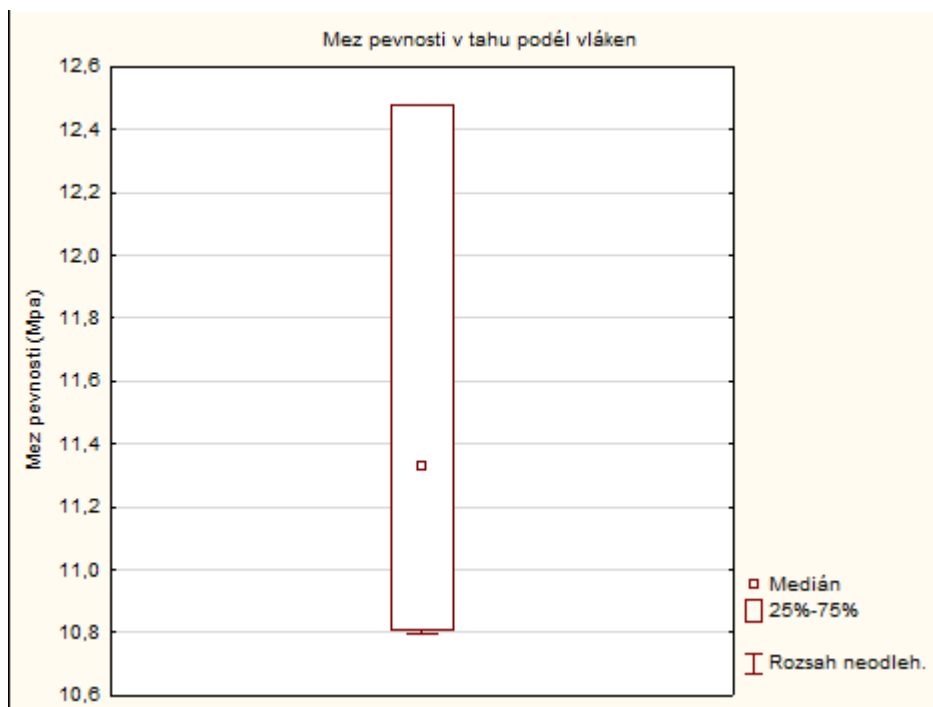
Tab. 13 Mez pevnosti v tahu podél vláken

Fmax (N)	a (mm)	b (mm)	Mez pevnosti (MPa)
52,844	4,152	1,020	12,47
43,135	3,955	1,010	10,79
43,640	3,850	1,000	11,33
36,655	3,200	1,060	10,80
56,322	3,250	1,010	17,15

Tab. 14 Mez pevnosti v tahu podél vláken. Popisná charakteristika

počet hodnot	arit. průměr	medián	min	max	Dolní kvartyl	horní kvartyl	Sm. Odchylka	var. Koeff %
5,000	12,51	11,35	10,79	17,15	10,80	12,47	2,68	21,44

Hodnota aritmetického průměru meze pevnosti v tahu podél vláken je 12,51 MPa s variačním koeficientem 21,44% (tab. 14). Rozptyl naměřených hodnot můžeme sledovat i na krabicovém grafu na obr. 33.



Obr. 33 Mez pevnosti v tahu podél vláken

Daniel et al. (2009) uvádějí mez pevnosti v tahu podél vláken 13,5 MPa, Tsoumis (1991) udává hodnotu 73 MPa ten, ale prováděl zkoušky na balze o hustotě 160 kg/m³. Publikace Wood Handbook (2010) udává 14 MPa pro mez pevnosti v tahu podél vláken. Viot et al. (2014) nerozlišují ve výsledcích mez pevnosti v tahu podél vláken a napříč a udávají hodnotu v rozmezí 2 – 18 MPa. Dalo by se to chápat, že vyšší hodnoty meze pevnosti v tahu můžeme považovat za mez pevnosti v tahu podél vláken.

I přes počáteční problémy s minitrhačkou iErudio můžeme konstatovat, že ze získaných hodnot byla vypočítána srovnatelná mez pevnosti v tahu podél vláken s literárními zdroji.

5.2.2 Modul pružnosti v tahu podél vláken

Pro experimentální určení modulu pružnosti v tahu podél vláken bylo použito stejných zkušebních tělísek jako pro meze pevnosti v tahu podél vláken. Hodnoty jednotlivých modulů pružnosti v tahu podél vláken vidíme v tab. 15.

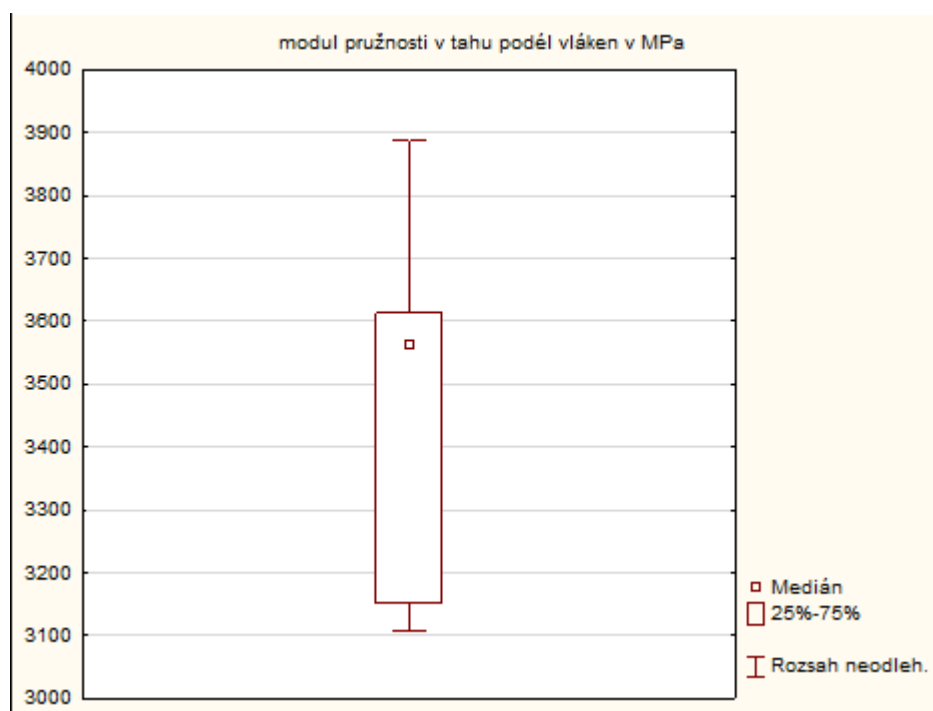
Tab. 15 Modul pružnosti v tahu podél vláken

σ_1 (MPa)	σ_2 (MPa)	$\Delta\sigma$ (MPa)	ε_1 (-)	ε_2 (-)	$\Delta\varepsilon$ (-)	E (MPa)
1,767	5,395	3,628	0,00000	0,00115	0,00115	3151
3,279	6,522	3,243	0,00043	0,00126	0,00083	3888
1,789	4,705	2,916	0,00033	0,00113	0,00081	3613
1,845	5,744	3,899	0,00021	0,00130	0,00109	3563
1,710	4,765	3,055	0,00004	0,00103	0,00098	3107

Tab. 16 Modul pružnosti v tahu podél vláken. Popisná charakteristika

počet hodnot	arit. průměr	medián	min	max	Dolní kvartil	horní kvartil	Sm. Odchylka	var. Koef %
5	3465	3563	3107	3888	3151	3613	330	9,53

Hodnota aritmetického průměru modulu pružnosti v tahu podél vláken je 3465 MPa s variačním koeficientem 9,53 % (tab. 16). Rozptyl modulů pružnosti v tahu podél vláken je vidět i na obr. 34.



Obr. 34 Modul pružnosti v tahu podél vláken

Harris et al. (1999) uvádějí modul pružnosti v tahu podél vláken 5170 MPa při hustotě balzsy 170 kg/m^3 a Wood Handbook (2010) uvádí 3000 MPa při hustotě balzy 100 kg/m^3 .

Námi vypočítaný modul pružnosti v tahu podél vláken je v průměru o 465 MPa vyšší než udává Wood Handbook(2010) kde byla testovaná balza o stejné hustotě

5.3 Zkouška v tahu napříč vláken

5.3.1 Mez pevnosti v tahu napříč vláken

Pro výpočet meze pevnosti v tahu napříč vláken bylo ze sady měření vybráno 7 zástupců vhodných pro vyhodnocení z celkových patnácti měření. Vzorky nezapočítané do statistiky byly porušeny na okraji pracovní části vzorku a hodnoty byly zkresleny. Vypočítanou mez pevnosti v tahu napříč vláken můžeme vidět v tab. 17.

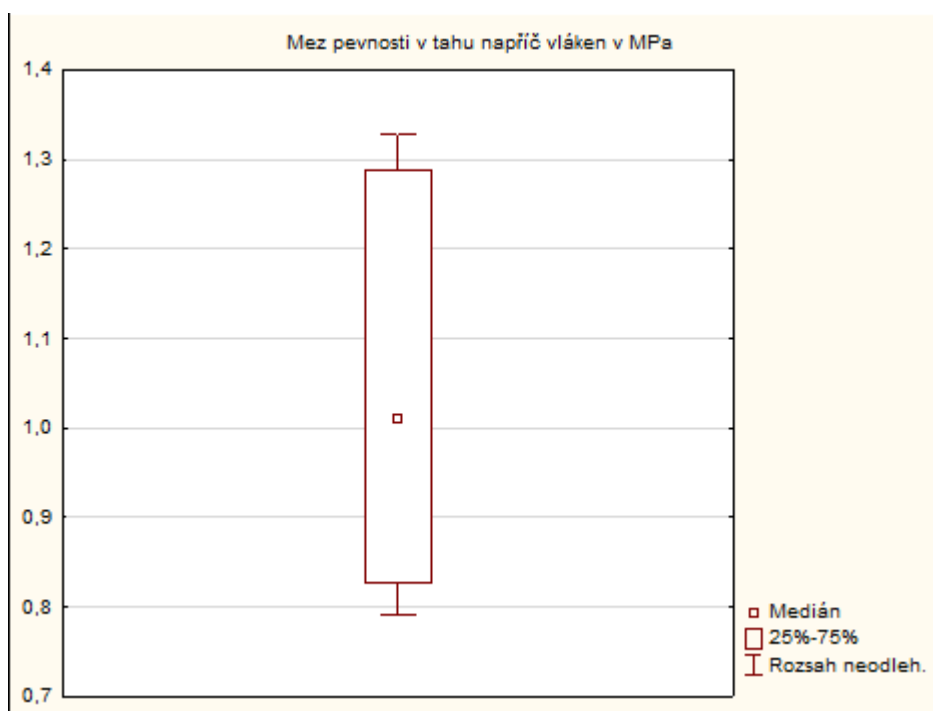
Tab. 17 mez pevnosti v tahu napříč vláken

	Fmax (N)	a (mm)	b (mm)	Mez pevnosti (MPa)
4R	8,242	6,40	1,000	1,28
8R	5,573	6,41	1,010	0,81
10R	8,464	6,31	1,010	1,32
12R	5,134	6,21	1,000	0,82
17R	6,320	6,25	1,000	1,01
18R	6,510	6,23	1,010	1,03
14R	4,994	6,25	1,010	0,79

Tab. 18 Mez pevnosti v tahu podél vláken. Popisná charakteristika

počet hodnot	průměr	medián	min	max	Dolní kvartyl	horní kvartyl	Sm. Odchylka	var. Koef %
7	1,02	1,01	0,79	1,32	0,82	1,28	0,21	21,25

Hodnota aritmetického průměru meze pevnosti v tahu napříč vláken je 1,02 MPa s variačním koeficientem 21,25 % (tab. 18). Rozptyl naměřených hodnot můžeme sledovat i na krabicovém grafu na obr. 35.



Obr. 35 Mez pevnosti v tahu napříč vláken

Daniel et al. (2009) uvádějí mez pevnosti v tahu kolmo na vlákna 0,4 MPa, Tsoumis (1991) udává hodnotu 1 MPa. Viot et al. (2014) jak bylo zmíněno výše, nerozlišují ve výsledcích mez pevnosti v tahu podél vláken a napříč a udávají hodnotu v rozmezí 2 – 18 MPa.

Literatura udává, že pevnost dřeva v tahu napříč vláken je průměrně u všech zkoumaných druhů asi 1/20 pevnosti v tahu ve směru vláken. V našem případě je tento poměr sice menší, ale dalo by se konstatovat, že vyšší hodnota meze pevnosti v tahu napříč vláken mohla být způsobena měřením na menším měřítku, které obsahuje menší počet imperfekt a dále taky nepřesnostmi v měření dané prototypovým zařízením, viz dále.

5.3.2 Modul pružnosti v tahu napříč vláken

Pro experimentální určení modulu pružnosti v tahu kolmo na vlákna bylo použito stejných zkušebních tělísek jako pro mez pevnosti v tahu kolmo vláken. Vypočítané moduly pružnosti můžeme vidět v tab. 19.

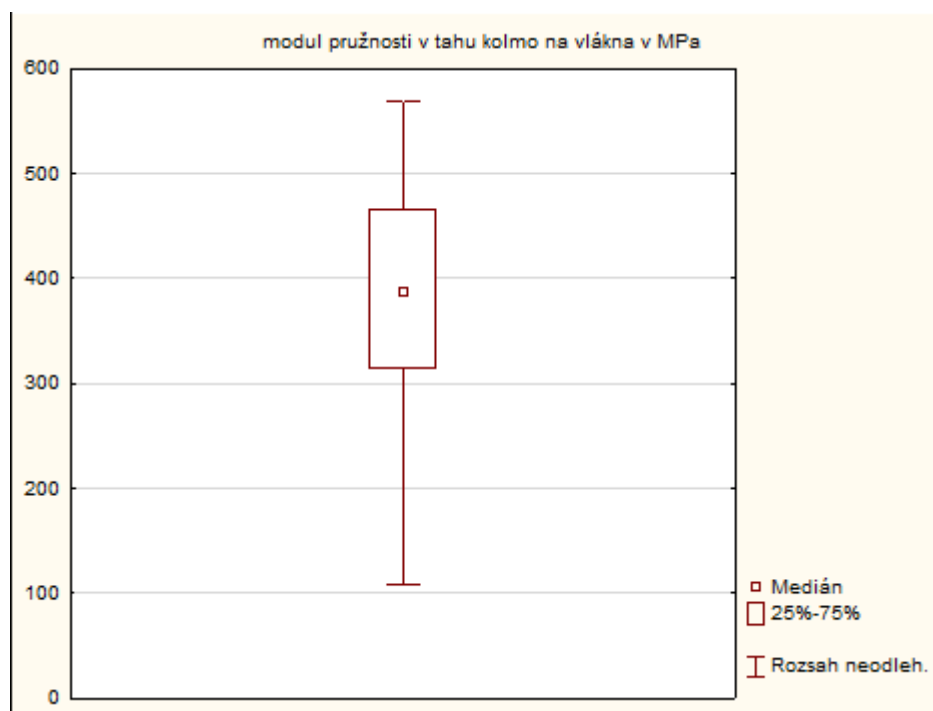
Tab. 19 Modul pružnosti v tahu napříč vláken

	σ_1 (MPa)	σ_2 (MPa)	$\Delta\sigma$ (MPa)	ϵ_1 (-)	ϵ_2 (-)	$\Delta\epsilon$ (-)	E (MPa)
4R	1,56	2,08	0,51	0,0000	0,0016	0,0016	328,54
8R	0,91	1,78	0,87	0,0037	0,0064	0,0028	315,07
10R	1,93	3,58	1,64	0,0049	0,0092	0,0042	388,60
12R	2,52	3,75	1,22	0,0006	0,0035	0,0028	432,04
17R	1,47	6,76	5,29	0,0005	0,0098	0,0093	569,42
18R	5,68	6,05	0,36	0,0036	0,0070	0,0034	108,99
14R	1,41	2,65	1,23	0,0002	0,0029	0,0027	465,51

Tab. 20 Modul pružnosti v tahu napříč vláken. Popisná charakteristika

počet hodnot	průměr	medián	min	max	Dolní kvartil	horní kvartil	Sm. Odchylka	var. Koef %
7	372,60	388,60	108,99	569,42	315,07	465,51	144,85	38,87

Hodnota aritmetického průměru modulu pružnosti v tahu kolmo na vlákna je 372,60 MPa s variačním koeficientem 38,87 % (tab. 20). Rozptyl jednotlivých hodnot modulů pružnosti kolmo na vlákna můžeme vidět na obr. 36.

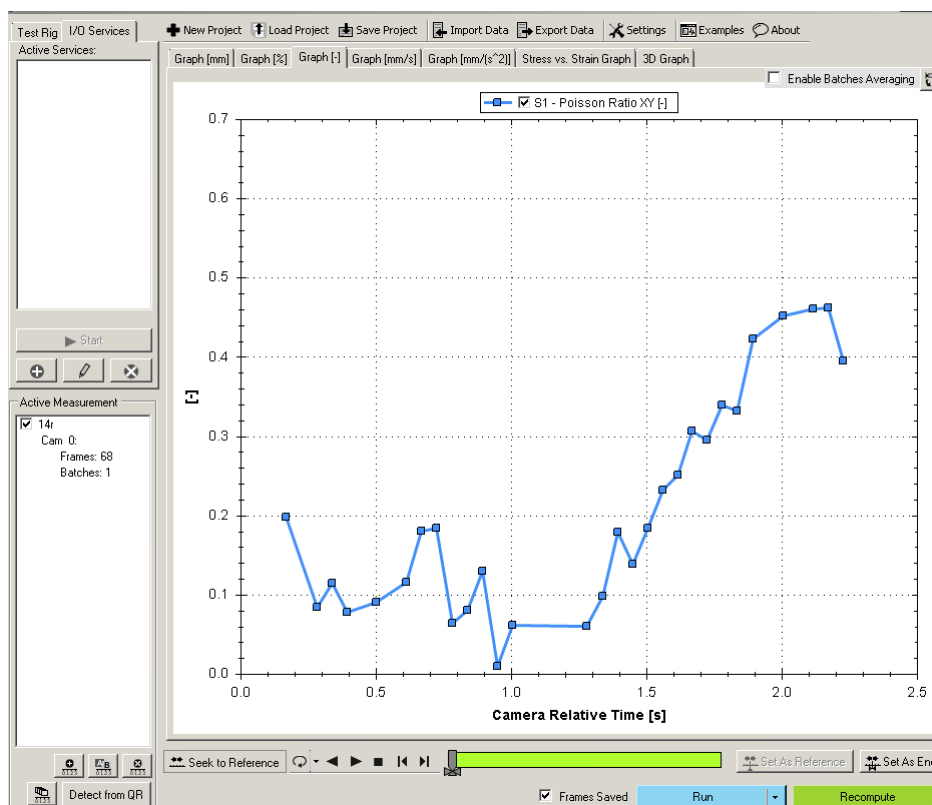


Obr. 36 Modul pružnosti v tahu napříč vláken

V tomto případě jsme hodnoty s literaturou nemohli porovnat. Pokud některé zdroje modul pružnosti v tahu uváděly, pak pouze modul pružnosti v tahu podél vláken.

5.4 Poissonovo číslo

Z tahové zkoušky byla zjištěna také Poissonova čísla. Na obr. 37 vidíme záznam z programu Mercury RT, který nám ukazuje vypočítané Poissonovo číslo. Z každého tohoto záznamu z měření se vzala průměrná hodnota Poissonova čísla (tab. 21) a hodnoty byly mezi sebou statisticky porovnány.



Obr. 37 Záznam výpočtu Poissonova čísla z programu Mercury RT

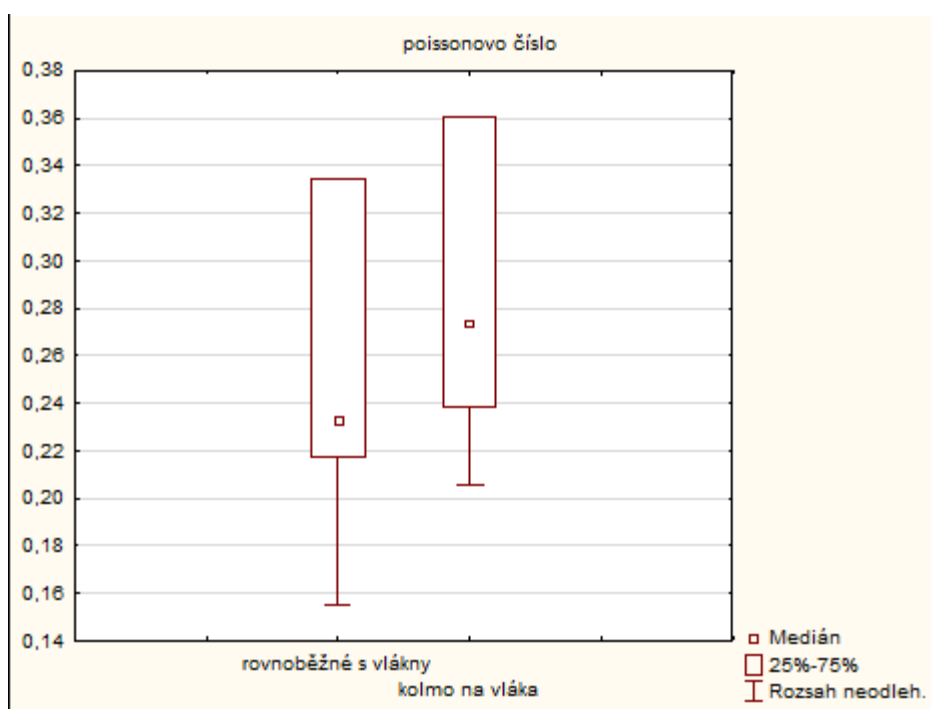
Tab. 21 Poissonovo číslo

z tahové zkoušky podél vláken	0,576	0,335	0,155	0,232	0,217		
z tahové zkoušky kolmo na vlákna	0,648	0,24	0,238	0,361	0,206	0,274	0,288

Tab. 22 Poissonovo číslo. Popisná charakteristika

	počet hodnot	průměr	medián	min	max	horní kvartil	dolní kvartil	Rozptyl	Sm. Odchylka	var. Koef %
z tahové zkoušky podél vláken	5	0,303	0,232	0,155	0,576	0,217	0,335	0,027	0,166	54,67
z tahové zkoušky kolmo na vlákna	7	0,322	0,274	0,206	0,648	0,238	0,361	0,023	0,152	47,14

Průměrná hodnota Poissonova čísla ze zkoušky tahem podél vláken je 0,303 s variačním koeficientem 54,67 %, a Poissonovo číslo z tahové zkoušky kolmo na vlákna je 0,322 s variačním koeficientem 47,14 %.



Obr. 38 Poissonovo číslo

Tab. 23 Jednofaktorová ANOVA pro Poissonovo číslo

ANOVA						
Zdroj variability	SS	Rozdíl	MS	F	Hodnota P	F krit
Mezi výběry	0,001	1	0,001	0,043	0,840	4,965
Všechny výběry	0,248	10	0,025			
Celkem	0,249	11				

Šetřením jednofaktorové ANOVY bylo zjištěno, že rozdíl mezi středními hodnotami Poissonova čísla je statisticky nevýznamný (tab. 23). To je vidět i v krabicovém grafu na obr. 38 a vyplývá to i z popisné charakteristiky.

Hodnoty tzv. malého a velkého Poissonova čísla se v našem případě od sebe statisticky významně neliší. Wood Handbook (2010) uvádí rozdílné hodnoty malého a velkého Poissonova čísla. Tyto rozdílné údaje mohly vzniknout tím, že jedna hodnota byla získána experimentálně, z ní byla dopočítána druhá, kdežto v rámci této práce byly obě hodnoty získány experimentálním měřením.

5.5 Porovnání hodnot kolmo na vlákna a rovnoběžně s vlákny

5.5.1 Porovnání meze pevnosti v tahu

V tabulce 24 můžeme vidět hodnoty pevnosti v tahu jak získané z tahové zkoušky podél vláken tak kolmo na vlákna.

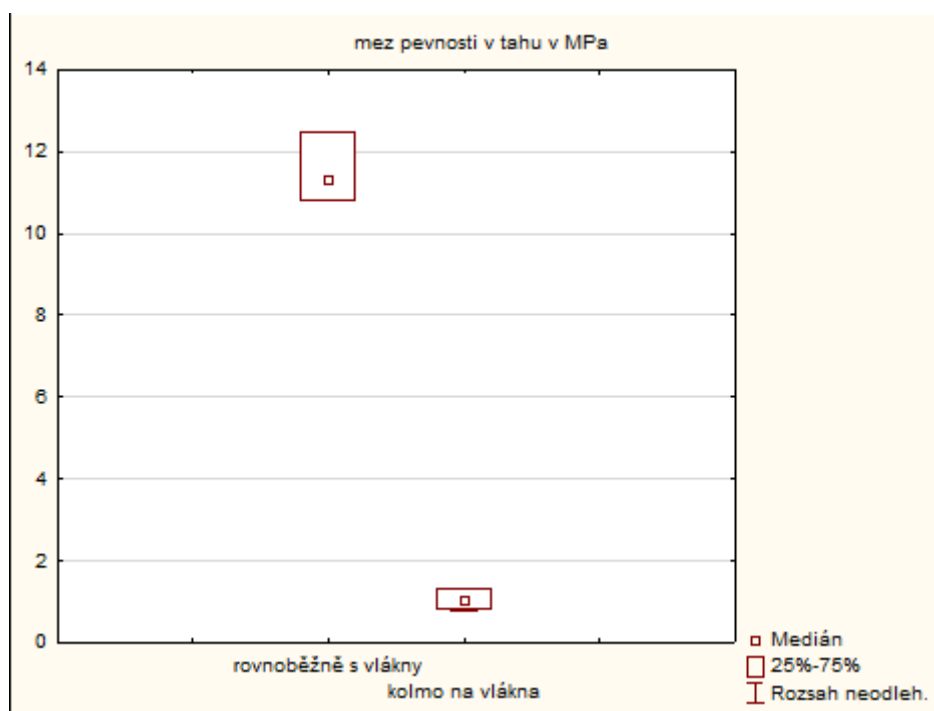
Tab. 24 Mez pevnosti v tahu v MPa

rovnoběžně s vlákny	12,478	10,798	11,335	10,806	17,158		
kolmo na vlákna	1,288	0,861	1,328	0,827	1,011	1,035	0,791

Tab. 25 Mez pevnosti v tahu v MPa. Popisná charakteristika

	počet hodnot	průměr	medián	min	max	Rozptyl	Sm. Odchylka	var. Koef %
rovnoběžně s vlákny	5	12,55	11,33	10,78	17,18	7,20	2,68	21,44
kolmo na vlákna	7	1,02	1,01	0,79	1,32	0,04	0,21	21,25

Tyto hodnoty jsme porovnali pomocí popisné charakteristiky. Rozdíly pevností podél vláken a kolmo na vlákna jsou viditelné na první pohled. Rozdíl mezi pevností v tahu podél vláken, kdy je pevnost 12,55 MPa, a mezi pevností kolmo na vlákna, kdy je pevnost 1,02 je přes 11 MPa.



Obr. 39 Krabicový graf pro mez pevnosti v tahu

Tab. 26 Jednofaktorová ANOVA pro mez pevnosti v tahu

ANOVA						
Zdroj variability	SS	Rozdíl	MS	F	Hodnota P	F krit
Mezi výběry	385,4024	1	385,402	132,433	4,3267E-07	4,965
Všechny výběry	29,10165	10	2,910			
Celkem	414,5041	11				

Tyto rozdíly nám potvrdilo i šetření pomocí jednofaktorové ANOVY . Mez pevnosti v tahu podél vláken a kolmo na vlákna je statisticky významná (tab. 26) a to vyplývá i z krabicového grafu na obr. 39.

Jak už bylo zmíněno pevnost dřeva v tahu podél vláken je asi 20krát větší než pevnost dřeva kolmo na vlákna. Nízká pevnost vychází z orientace vazebných sil ve dřevě.

5.5.2 Porovnání modulu pružnosti v tahu

V tabulce 27 můžeme vidět hodnoty modulu pružnosti v tahu jak získané z tahové zkoušky podél vláken tak kolmo na vlákna.

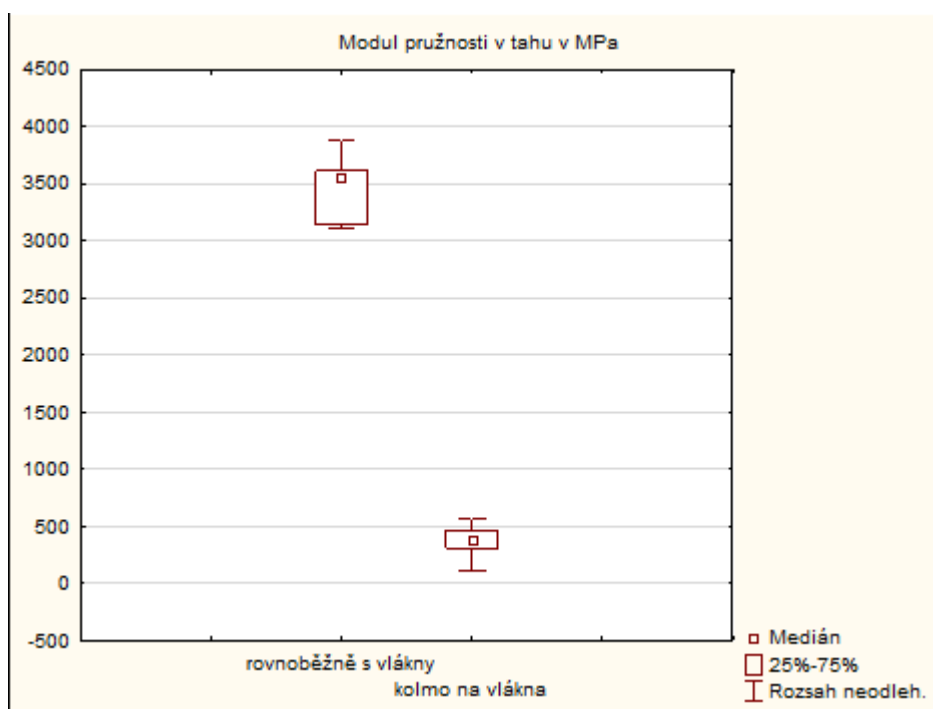
Tab. 27 Modul pružnosti v tahu v MPa

rovnoběžně s vlákny	3151	3888	3613	3563	3107		
kolmo na vlákna	328	315	388	432	569	109	465

Tab. 28 Modul pružnosti v tahu. Popisná charakteristika

	počet hodnot	průměr	medián	min	max	horní kvartil	dolní kvartil	Rozptyl	Sm. Odchyl	var. Koef %
rovnoběžně s vlákny	5	3465	3563	3107	3888	3151	3613	109215	330	9,54
kolmo na vlákna	7	372	388	109	569	315	465	20983	144	38,88

Popisná charakteristika v tab. 28 nám opět ukazuje výrazné rozdíly mezi modulem pružnosti v tahu podél vláken a kolmo na vlákna. Hodnoty modulu pružnosti v tahu kolmo na vlákna jsou až 9 krát menší než modul pružnosti v tahu podél vláken.



Obr. 40 Krabicový graf modul pružnosti v tahu

Tab. 29 Jednofaktorová ANOVA pro modul pružnosti v tahu

ANOVA						
Zdroj variability	SS	Rozdíl	MS	F	Hodnota P	F krit
Mezi výběry	27893430	1	27893429,98	495,65	7,51E-10	4,96
Všechny výběry	562762,3	10	56276,23			
Celkem	28456192	11				

Tento velký rozdíl nám potvrzuje i šetření pomocí jednofaktorové ANOVY v rámci které jsme zjistili, že modul pružnosti v tahu podél vláken a kolmo na vlákna je statisticky významný (tab. 29) to vyplývá i z krabicového grafu na obr. 40.

Z výsledků tahové zkoušky vyplývá, že je možné provádět mechanické zkoušky na minitrhačce iErudio. Ukazují to získané výsledky, které jsou srovnatelné s hodnotami uvedenými v literatuře.

5.6 Výpočtový modul pružnosti ve smyku

Pro určení výpočtového modulu pružnosti ve smyku jsme použili data získaná z tlakové zkoušky. Byl vypočítán modul pružnosti na rovině LT a LR.

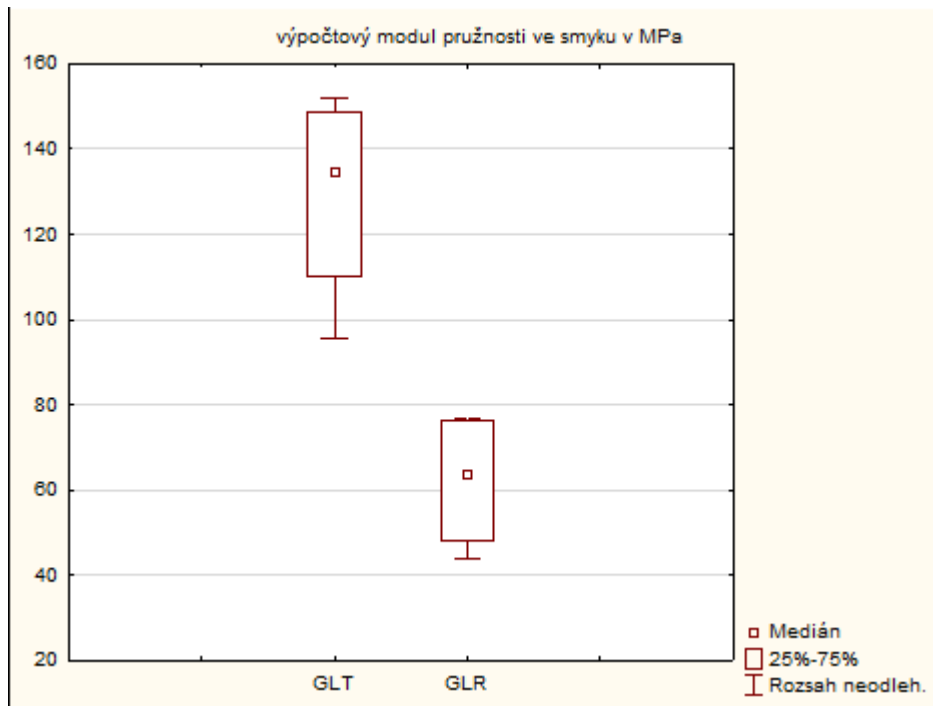
Tab. 30 Výpočtový modul pružnosti ve smyku

výpočtový modul pružnosti ve smyku v MPa				
G_{LT}	124,49	152,12	145,21	104,31
G_{LR}	50,28	45,74	73,1	80,84

Tab. 31 Výpočtový modul pružnosti ve smyku. Popisná charakteristika

	počet hodnot	průměr	medián	min	max	Dolní kvartil	Horní kvartil	rozptyl	Sm. Odchylka	var. Koef %
G_{LT}	4	129,40	134,85	95,80	152,12	110,15	148,66	639,53	25,28	19,54
G_{LR}	4	62,07	63,76	44,08	76,66	47,92	76,22	276,87	16,64	26,80

Hodnota aritmetického průměru modulu pružnosti ve smyku G_{LT} 129,40 MPa s variačním koeficientem 19,54 %. Výpočtový modul pružnosti ve smyku na rovině LR tedy G_{LR} je 62,07 MPa s variačním koeficientem 26,81 % (tab. 31). S průměrnou hustotou balsového dřeva 92 kg/m³. Z tabulky 31 je zřejmé že hodnoty aritmetických průměrů pro modul pružnosti ve smyku se na jednotlivých rovinách liší. Rozdíl mezi aritmetickými průměry je 67,33 MPa.



Obr. 41 Výpočtový modul pružnosti ve smyku. Krabicový graf

Tab. 32 Jednofaktorová ANOVA modul pružnosti ve smyku

ANOVA						
Zdroj variability	SS	Rozdíl	MS	F	Hodnota P	F krit
Mezi výběry	9533,55	1	9533,55	25,08	2,43E-03	5,99
Všechny výběry	2280,54	6	380,09			
Celkem	11814,09	7				

Šetřením jednofaktorové ANOVY bylo zjištěno, že rozdíl mezi středními hodnotami je statisticky významný (tab. 32) což nám potvrzuje i obr. 41 s krabicovým grafem s moduly pružnosti ve smyku.

Daniel et al. (2009) uvádějí modul pružnosti ve smyku $G_{LT} = 166$ MPa a $G_{LR} = 85$ MPa pro balzu s hustotou 100 kg/m^3 . Carlsson et al. 2011 udávají jednu hodnotu modulu pružnosti pro všechny roviny a to 157 MPa při hustotě 100 kg/m^3 .

Naše hodnoty modulu pružnosti ve smyku pro balsové dřevo jsou nižší. Tento rozdíl mohlo způsobit mnoho faktorů. Hodnoty z literatury byly získány na základě mechanické zkoušky ve smyku, kdežto my jsme modul pružnosti dopočítávaly z hodnot získaných z tlakové zkoušky. Taky hustota našich vzorků byla o něco nižší v porovnání s hodnotami v literatuře.

5.7 Zkouška v ohybu

5.7.1 Mez pevnosti v ohybu

Pro experimentální určení meze pevnosti balzového dřeva ve statickém ohybu bylo použito 13 zkušebních tělísek. Hodnoty meze pevnosti ve statickém ohybu můžeme vidět v tab. 33.

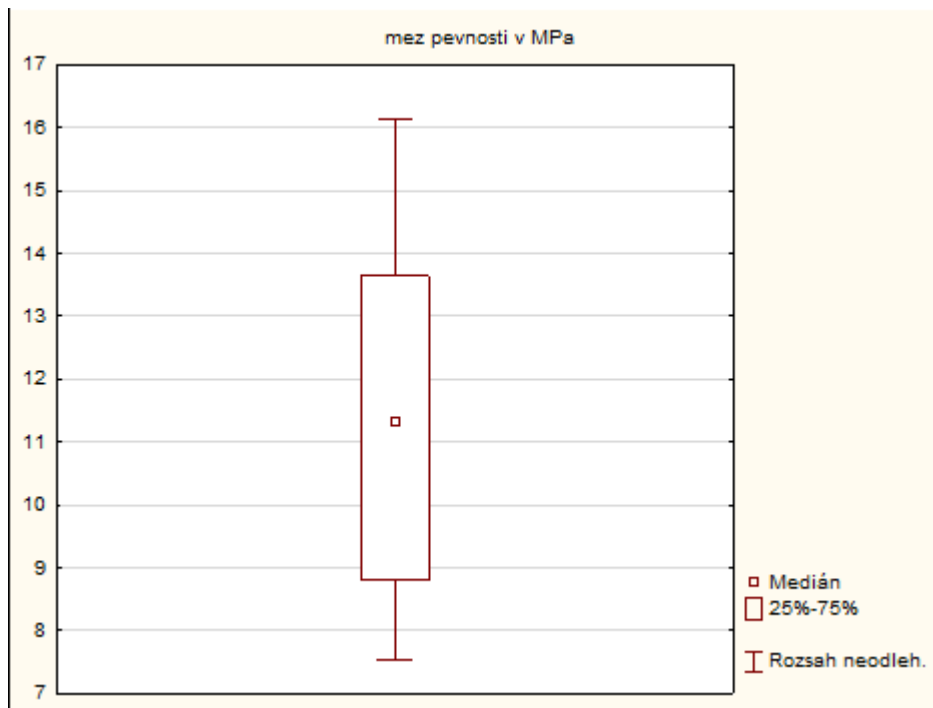
Tab. 33 Mez pevnosti ve statickém ohybu (MPa)

Fmax (N)	L (mm)	b (mm)	h (mm)	mez pevnosti (MPa)
23,38	57	7,01	6,09	7,70
41,93	57	6,08	7,01	12,01
25,56	57	7,85	6,08	7,53
45,44	57	6,08	7,13	12,59
30,34	57	7,03	6,06	10,06
22,03	57	6,05	6,07	8,45
37,27	57	6,09	6,07	14,24
41,69	57	6,85	6,07	14,15
23,15	57	6,09	6,08	8,80
46,36	57	6,06	6,93	13,64
27,48	57	7,03	6,08	9,05
38,84	57	6,07	6,95	11,34
39,10	57	6,06	5,85	16,12

Tab. 34 Mez pevnosti v ohybu. Popisná charakteristika

	počet hodnot	průměr	medián	min	max	horní kvartyl	dolní kvartyl	Rozptyl	Sm. Odchyl	var. Koeff %
mez pevnosti (MPa)	13	11,20	11,34	7,53	16,12	8,80	13,64	7,97	2,82	25,20

Z vypočítaných hodnot byla provedena popisná charakteristika, její výsledky vidíme v tab. 34. Hodnota aritmetického průměru je 11,2 MPa. Variační koeficient je 25,2 %. Rozptyl pevností jednotlivých měření je vidět z krabicového grafu na obr. 42.



Obr. 42 Krabicový graf pro mez pevnosti v ohybu v MPa

Tsoumis (1991) uvádí mez pevnosti ve statickém ohybu pro balzové dřevo o hustotě 160 kg/m³ 19 MPa. Encyclopedia of Materials (2001) uvádí hodnotu pro mez pevnosti 21,6 MPa. Neuvádí, ovšem jaká byla hustota balzového dřeva použitého pro experiment. Dá se ale z uvedené hodnoty usuzovat, že se jednalo o balzu o podobné hustotě, jako použil pro svůj výzkum Tsoumis (1991).

Námi vypočítaná mez pevnosti ve statickém ohybu 11,2 MPa je nižší než uvádí literatury. Je to způsobeno tím, že jsme použili pro experiment balzové dřevo o hustotě 100 kg/m³.

Z toho vyplývá, že použití minitrhačky i Erudio na zkoušku ve statickém ohybu je možné a hodnoty jsou srovnatelné s hodnotami uvedenými v literatuře.

5.7.2 Modul pružnosti v ohybu

Pro experimentální určení modulu pružnosti ve statickém ohybu balzového dřeva byla použita stejná sada zkušebních tělísek jako pro výpočet meze pevnosti ve statickém ohybu. Hodnoty modulů pružnosti ve statickém ohybu můžeme vidět v tab. 35.

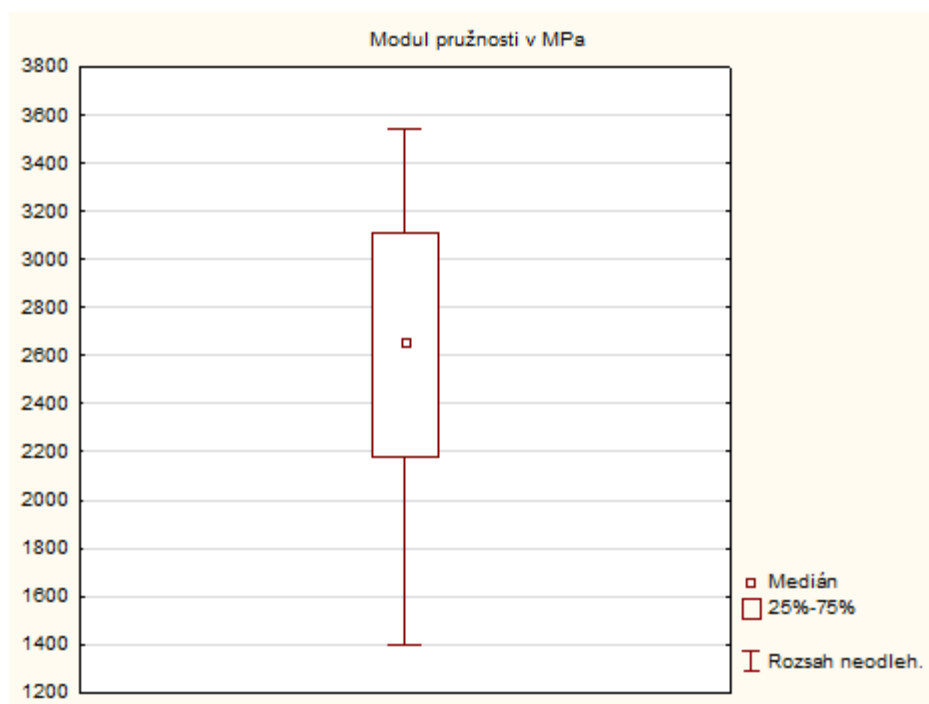
Tab. 35 Modul pružnosti ve statickém ohybu v MPa

Fmax (mm)	L (mm)	b (mm)	h (mm)	průhyb (mm)	E (MPa)
23,368	57	7,011	6,087	1,933	3540
35,715	57	6,078	7,009	3,060	2582
21,775	57	7,852	6,078	2,063	2772
38,706	57	6,080	7,125	3,747	2175
25,850	57	7,025	6,060	2,461	3111
18,764	57	6,052	6,070	2,060	3116
31,748	57	6,085	6,065	4,372	2477
35,512	57	6,850	6,065	5,125	2099
19,722	57	6,092	6,075	2,032	3290
39,496	57	6,060	6,925	4,657	1951
23,411	57	7,025	6,080	2,344	2929
33,087	57	6,070	6,945	5,392	1397
33,313	57	6,060	5,850	4,795	2651

Tab. 36 Modul pružnosti ve statickém ohybu. Popisná charakteristika

	počet hodnot	průměr	medián	min	max	horní kvartil	dolní kvartil	Sm. Odchyl	var. Koeff %
mez pevnosti (MPa)	13	2622	2651	1397	3540	2175	3111	601	22,92

Z vypočítaných hodnot byla provedena popisná charakteristika, její výsledky vidíme v tab. 36. Hodnota aritmetického průměru je 2622 MPa. Variační koeficient je 25,92 %. Rozptyl modulu pružnosti jednotlivých měření je vidět z krabicového grafu na obr. 43.



Obr. 43 Krabicový graf pro modul pružnosti ve statickém ohybu

Tsoumis (1991) uvádí modul pružnosti ve statickém ohybu pro balzové dřevo o hustotě 160 kg/m³ v rozmezí 2550 – 3170 MPa. *Encyclopedia of Materials* (2001) uvádí hodnotu modulu pružnosti ve statickém ohybu 3400 MPa. Opět neuvádí, jaká byla hustota balzového dřeva použitého pro experiment. Pan Biron (2003) v publikaci *Thermosets and Composites* uvádí hodnotu modulu pružnosti ve statickém ohybu 2700 MPa.

Námi vypočítaný modul pružnosti ve statickém ohybu je 2622 MPa je nižší než uvádí literatura. Je to způsobeno tím, že jsme použili pro experiment balzové dřevo o hustotě 100 kg/m³. Musíme ale také říci, že docházelo k velkému otláčení, které bylo způsobeno velkým rozdílem v tlakových tuhostech a pevnostech ocelové tlačené lišty a balzového dřeva a dále také relativně malým poloměrem zaoblení lišty. Ideální by v tomto případě bylo mít tlačné lišty z měkkého dřeva nebo lehčího polymeru s podobnou hustotou jako má balza. Nicméně i tak můžeme konstatovat, že naše hodnoty modulu pružnosti ve statickém ohybu jsou srovnatelné s hodnotami v literatuře.

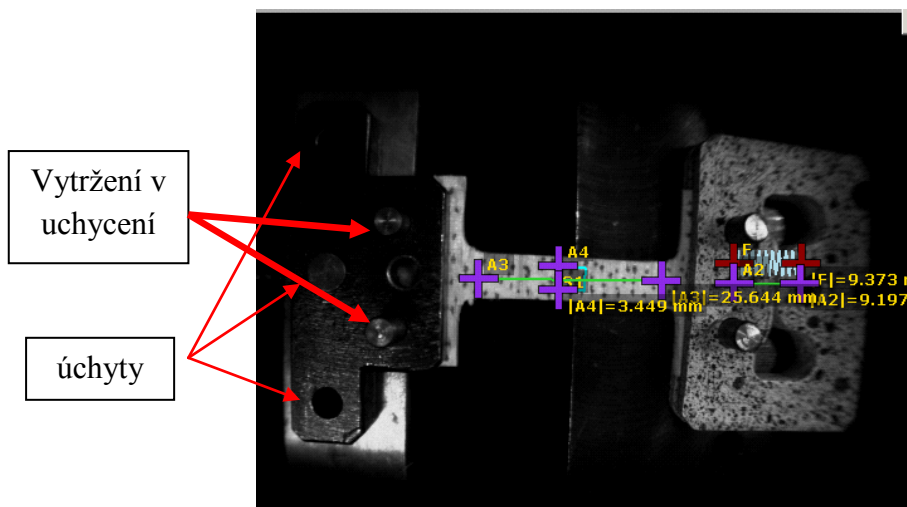
5.8 Minitrhačka iErudio

Jelikož se jedná o prototyp minitrhačky museli jsme počítat s tím, že se mohou, vyskytnou nedokonalosti trhačky, se kterými se budeme muset vypořádat při experimentálním měření.

Při zkoušce tahové podél vláken se vyskytl problém v podobě, že se zkušební tělesa vytrhávala v uchycení kolíky. Dělo se tomu tak ještě než začalo docházet k deformacím v pracovní části zkušebního tělesa. Detail uchycení zkušebních těles můžeme vidět na obr. 44.

Návrh byl použit silnější materiál, to ale nebylo možné. Do upevňovací čelisti se rozměrově nevejde tlustší materiál, který by byl tak silný, aby výsledky zkoušky byly použitelné pro vyhodnocení, tedy aby docházelo v průběhu zkoušky k deformacím v pracovní části tělesa. Proto bylo použito jiného řešení a to zpevnění stávajících vzorků o tloušťce 1mm. Ke zpevnění byla použita lepicí páska. Při dalších úvahách by pro zpevnění bylo snad možné i namočení konců do lepidla, ale i tady by mohl nastat problém, že by se vzorek nemusel vlézt do uchycovacích čelistí.

Další problém, který vyvstal při měření je, že čelist pro zkoušku tahem má být připevněna k trhačce pomocí tří kolíků (obr. 44), což nebylo možné. Bylo možné připevnit vždy jen maximálně dva kolíky a to z toho důvodu, že vyfrézované díry pro kolíky nebyly umístěny symetricky s upevňovací čelistí. Při použití dvou by mohlo docházet vlivem působení tahové síly k natočení a znehodnocení naměřených dat.



Obr. 44 Uchycení zkušebního tělíska při tahové zkoušce

6 Závěr

Diplomová práce se zabývala analýzou mechanických vlastností balzového dřeva na mesoúrovni pomocí zkušebního stroje iErudio. Na prototypu „minitrhačky“ byla provedena tahová a ohybová zkouška. Naměřená data byla zpracována softwarem Mercury RT, který je postaven na metodě korelace digitálního obrazu.

Výsledky z tahové a ohybové zkoušky byly statisticky zpracovány a porovnány s hodnotami uvedenými v odborných literaturách. Z těchto výsledků vyplývá vhodnost použití „minitrhačky“ iErudio pro tento typ zkoušek, protože se veškeré materiálové charakteristiky pohybovaly v rozmezí dat v literatuře. Dalším cílem bylo stanovení Poissonova čísla. Tyto vlastnosti byly získány z obrazových dat pořízených zařízením iErudio a počítány metodou korelace digitálního obrazu. I v tomto případě jsme mohli konstatovat vhodnost použití „minitrhačky“ iErudio.

Veškeré zkoušky byly prováděny na balzovém dřevě, které je měkké, vysoce pórovité a lehké. Balza je nejměkčí a nejlehčí obchodovatelné dřevo a proto by bylo vhodné na iErudiu provést mechanické zkoušky i na dřevě s vyšší hustotou. Práce nabídla nejen potvrzení mechanických charakteristik balzy, které se v literatuře již vyskytují, ale zejména poskytla nová data, která mohou být využita k dalším inženýrským výpočtům, např. pro stanovení ohybové tuhosti sendvičových struktur, které se v současnosti čím dál častěji využívají, nebo jako vstupy do numerických analýz, které vyžadují plný 3D ortotropní materiálový model.

7 Summary

This diploma thesis deals with the analysis of the mechanical properties of balsa wood using the test machine iErudio. On the prototype "minimachine" was performed tensile and bending tests. The measured data were processed Mercury RT software, which is based on a method of digital image correlation.

The results of tensile and bending tests were statistically analyzed and compared with those in vocational literature. These results indicate the suitability of "minimachine" iErudio for this type of test, because all the material characteristics ranged from data in the literature. Another objective was to determine the Poisson ratio. These properties were obtained from the image data recorded iErudio device and calculated using the digital image correlation. In this case, we could say the suitability of using „minimachine“ iErudio.

All tests were carried out on balsa wood, which is soft, highly porous and lightweight. Balsa is the softest and lightest marketable timber and therefore it would be appropriate to iErudio perform mechanical tests on wood with higher density. This work not only gave confirmation balsa mechanical characteristics which are already present in the literature, but in particular provide new data that may be used for further engineering calculations, e.g. the determination of the bending stiffness of the sandwich structures, which are currently increasingly used, or inputs to the numerical analyses that require a full 3D orthotropic material model.

8 Přehled literatury

BIRON, Michel. *Thermosets and Composites: Technical Information for Plastics users*. Elsevier, 2003. 536. ISBN 0080519203

BERGMAN, Richard et al. *Wood Handbook, Wood as an Engineering Material*. General Technical Report FPL-GTR-190. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory: I-1 - I-29. Index. 2010.

BODIG, J., JAYNE, B.A., *Mechanics of Wood and Wood Composites*. 2.vyd. New York, Van Nostrand Reinhold, 1992. 711 s. ISBN 0-89464-777-6

CARLSSON, L.A., KARDOMATEAS G.A., *Structural and Failure Mechanics of Sandwich Composites*, Springer science+Business Media B.V., 2011, ISBN 0925-0042

DANIEL, I.M., GDOUTOS, E.E., RAJAPAKSE, Y.D.S. *Major Accomplishments in Composite Materials and Sandwich Structures*. Springer Science & Business Media, 2009. 818s. ISBN 978-90-481-3140-2

DINWOODIE, J.M., 2000. *Timber: It's Nature and Behaviour*, second ed. E & FN Spon, New York

DRÁPELA, K. *Statistické metody: (pro obory lesního, dřevařského a krajinného inženýrství)* 1. vyd. V Brně: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 2000. 144 s. ISBN 80-7157-474-0.

Encyclopedia of Materials: Science and Technology. Elsevier, 2001, 830 s. ISBN 0-08-0431526

EASTERLING, K.E., HARRYSSON, R., GIBSON, L.J., ASHBY, M.F., 1982. *On the mechanics of balsa and other woods*. Proc. R. Soc. Lond. A 383, 31–41.

FOREST PRODUCT, L. *Wood handbook—Wood as an engineering material*. General Technocal Report FPL-GTR-190. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2010. 508 s.

GANDELOVÁ, L., HORÁČEK, P., ŠLEZINGEROVÁ, J. *Nauka o dřevě*. 1. vyd. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 1996. 176 s. ISBN 80-7157-194-6.

GIGSON, L.J., ASHBY, M.F., 1997. *Cellular Solids: Structure and Properties*. Cambridge University Press

HARRIS, H.G., SABNIS, G.M., *Structural Modeling and Experimental Techniques*, Library of Congress Cataloging-in-publication Data, 1999, 771 s. ISBN 0-8493-2469-6.

HORÁČEK, P. *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva I*. Vyd. 1. V Brně: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 1998, 124 s. ISBN 80-715-7347-7.

JANÍČEK, P., MAREK, J. A KOL. *Expertní inženýrství v systémovém pojetí* 1. vyd. Praha: Grada publishing, a.s. 2013. 592 s. ISBN 978-80-247-4127-7

PETRUŠKA, J. *Počítačové Metody mechaniky II*. 2003 Dostupné z: <http://www.umt.fme.vutbr.cz/img/fckeditor/file/opory/PocitacoveMetodyII/PocitacovaMechanikaII.pdf>

MATOVIČ, Anton. *Nauka o dřevě*. 2., nezm. vyd. Brno: Vysoká škola zemědělská, 1981, 159 s.

MATOVIČ, Anton. *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva a materiálů na bázi dřeva*. 1. vyd. Brno: Vysoká škola zemědělská, 1993, 212 s. ISBN 80-7157-086-9.

MELOUN, M. – MILITICKÝ, J. *Statistická analýza experimentálních dat*. 2. vyd. Praha: Academia, 2004. 953 s. ISBN 80-200-1254-0.

PANSHIN, A. J., ZEEUW DE, C. *Textbook of Wood Technology: Structure, Identification, Properties, and Use of the Commercial Woods of the United States and Canada*. 4. Vyd. New York: McGraw-Hill, 1980. 722 s. ISBN 0-07-048441-4.

PERELYGIN, L. *Náuka o dreve*. 2.vyd. /. Bratislava: SVTL, 1965, 444 s.

POŽGAJ, Alexander, et al. *Štruktúra a vlastnosti dreva*. Druhé vydanie. Bratislava : PRÍRODA, 1997. 488 s. ISBN 80-07-00960-4.

RASTOGI, P. K. *Photomechanics (topicst in applied physics)*Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2000. 472 s. ISBN 3540659900

SUTTON, Michael A., Jean-José ORTEU a Hubert W. SCHREIER. *Image correlation for shape, motion and deformation measurements basic concepts, theory and applications*. Online-Ausg. New York: Springer, 2009 [cit. 2013-04-15]. 321 s. ISBN 978-038-7787-473.

Dostupné z: <http://www.springerlink.com/content/978-0-387-78747-3>

TSOUMIS, George T. *Science and technology of wood: structure, properties, utilization*, Van Nostrand Reinhold, 1991. 494 s. ISBN 0442239858

Použité normy

ČSN 49 0110 – Mez pevnosti v tlaku podél vláken

ČSN 49 0111 – Zkoušky vlastností rostlého dřeva. Metoda zjišťování modulu pružnosti v tlaku podél vláken

Internetové zdroje

Balsa. 2015 (cit. 2015, Březen 2)

<http://www.britannica.com/EBchecked/topic/50863/balsa>

<http://cs.wikipedia.org/wiki/Balsa>

Interesting Facts about Balsa Wood., East Coast Model Center carries the complete line of Sig kits, accessories, balsa and spruce.;1995

<http://www.mat.uc.pt/~pedro/ncientificos/artigos/techbal.html>

http://web.archive.org/web/20050329092244/http://www.greathobbies.com/document/tech_balsa_1.html

Mercury.eru (cit. 2015, Březen 18)

http://www.mercuryprogram.eu/index.php?option=com_content&view=featured&Itemid=621&lang=en#main

VIC-3D (cit. 2015, Březen 18)

<http://www.correlatedsolutions.com/vic-3d/>

Odborné články

V.L. TAGARIELLI, V.S. DESHAPANDE, N.A. FLECK, *The high strain rate response of PVC foams and end-grain balsa wood*, Cambridge University, Engineering Department, Trumpington Street, Cambridge, CB2 1PZ, UK; (cit. 2015, Březen 10)

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836807000406>

Meisam Shir MOHAMMANDI and John A NAIM. *Crack propagation and fracture toughness of solid balsa used for cores of sandwich composites*. Journal of Sandwiches Structures and Materials, 16, 22-41 (2014); (cit. 2015, Březen 10)

<http://jsm.sagepub.com/content/early/2013/09/05/1099636213502980>

K.R. RAMAKRISHNAN, K. SHANKAR1, P. VIOT, and S. GUERARD, *A comparative study of the impact properties of sandwich materials with different cores*. published by EDP Sciences, 2012; (cit. 2015, Březen 12)

http://www.epjconferences.org/articles/epjconf/abs/2012/08/epjconf_dymat2012_01031/epjconf_dymat2012_01031.html

N. MORTAS, P.N.B. REIS, J.A.M. FERREIRA. *IMPact response of balsa core sandwiches*; N. Mortas et alii, *Frattura ed Integrità Strutturale*, 30 (2014) 403-408; DOI: 10.3221/IGF-ESIS.30.48 (cit. 2015, Březen 12)

http://www.gruppofrattura.it/pdf/rivista/numero30/numero_30_art_48.pdf

B. TOSON, P. VIOT, J.J. PESQUÉ. *Finite element modeling of Balsa wood structures under severe loading*. Engineering Structures 70 (2014) 36–52 (cit. 2015, Březen 30)
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029614001710>

9 Seznam obrázků

Obr. 1 Hlavní osy s ohledem na vlákna a letokruhy (Bergman 2010).....	11
Obr. 2 zatížení dřeva při ohybu (Požgaj et al. 1997)	13
Obr. 3 Pevnost dřeva podél vláken (Požgaj 1997)	14
Obr. 4 Pracovní diagramy pevnosti v tlaku napříč vláken (Matovič 1993)	15
Obr.5 Kontrastní skvrnitý vzor	18
Obr.6 Popis bodů ve fasetě (Janíček, 2013)	19
Obr. 7 Balza vlevo-mladá rostlina, vel. listů, vpravo- plantážní růst balzy	20
Obr. 8 Kon-Tiky raft 1948(www.wikipedia.com)	21
Obr. 9 Bojový letoun de Havilland Mosquito(www.wikipedia/De_Havilland_Mosquito)	21
Obr. 10 Struktura dřeva (a) kmen, (b)uspořádání a rozměry buněčné struktury balzy, (c) a (d) směr dřevních vláken (Viot 2013)	23
Obr. 11 Zkušební tělíska s naneseným kontrastním vzorem	26
Obr. 12Vlevo - stereovizní snímání zařízení včetně světél, vpravo – tělísko ve zkušebním stroji.....	27
Obr. 13 Deformace eyy 3D výstup.....	28
Obr. 14 Deformace eyy ve 2D výstup	29
Obr. 15 Tělísko vlevo je plastový vzor pro výrobu zkušebních těles; ostatní jsou zkušební tělíska z balzy	30
Obr. 16 Tvar zkušebního tělesa pro tahovou zkoušku podél vláken.....	30
Obr. 17 Zkušební minitrhačka iErudio	31
Obr. 18 Detail uchycení zkušebního tělíska v zařízení iErudio	32
Obr. 19 Pracovní prostředí software Mercury RT	33
Obr. 20 Zobrazení záznamu zkoušky v programu Mercury RT	33
Obr. 21 Zkušební tělísko připravené na záznam zkoušky	34
Obr. 22 Zkušební tělíska pro ohybovou zkoušku	35
Obr. 23 Upnutí pro ohybovou zkoušku	36
Obr. 24 Zkušební tělísko připravené na záznam ohybové zkoušky.....	37
Obr. 25 Zobrazení záznamu zkoušky v programu Mercury RT	37
Obr. 26 Meze pevnosti v tlaku srovnání jednotlivé roviny	43
Obr. 27Moduly pružnosti na měřených rovinách	46
Obr. 28Posunutí pixelů v příčném směru U,	47
Obr. 29 Posunutí pixelů v podélném směru V	47
Obr. 30Podélná deformace eyy	48
Obr. 31 Příčná deformace exx.....	48
Obr. 32 Poissonova čísla na měřených rovinách	49
Obr. 33Mez pevnosti v tahu podél vláken	51
Obr. 34 Modul pružnosti v tahu podél vláken	52
Obr. 35 Mez pevnosti v tahu napříč vláken	54
Obr. 36 Modul pružnosti v tahu napříč vláken	55
Obr. 37Záznam výpočtu Poissonova čísla z programu Mercury RT.....	56
Obr. 38 Poissonovo číslo	57
Obr. 39 Krabicový graf pro mez pevnosti v tahu.....	59

<i>Obr. 40</i>	<i>Krabicový graf modul pružnosti v tahu</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 41</i>	<i>Výpočtový modul pružnosti ve smyku. Krabicový graf.....</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 42</i>	<i>Krabicový graf pro mez pevnosti v ohybu v MPa</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 43</i>	<i>Krabicový graf pro modul pružnosti ve statickém ohybu.....</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 44</i>	<i>Uchycení zkušebního tělíska při tahové zkoušce</i>	<i>67</i>

10 Seznam tabulek

<i>Tab.1 Mez pevnosti v tlaku</i>	41
<i>Tab. 2: Mez pevnosti dřeva v tlaku (MPa) na měřených rovinách. Popisná charakteristika</i>	41
<i>Tab.3 jednofaktorová ANOVA pro mez pevnosti v tlaku podél vláken</i>	42
<i>Tab. 4 jednofaktorová ANOVA pro konvenční mez pevnosti v tlaku napříč vláken</i>	42
<i>Tab. 5 jednofaktorová ANOVA pro mez pevnost v tlaku</i>	43
<i>Tab. 6Modul pružnosti v tlaku</i>	44
<i>Tab. 7 Modul pružnosti dřeva v tlaku (MPa) na měřených rovinách. Popisná charakteristika</i>	44
<i>Tab. 8 Jednofaktorová ANOVA pro modul pružnosti v tlaku podél vláken</i>	45
<i>Tab. 9 Jednofaktorová ANOVA pro modul pružnosti v tahu napříč vláken</i>	45
<i>Tab. 10 Jednofaktrorová ANOVA pro modul pružnosti v talku</i>	46
<i>Tab. 11 Poissonova čísla na měřených rovinách. Popisná charakteristika</i>	49
<i>Tab. 12 Jednofaktorová ANOVA pro Poissonovo číslo</i>	49
<i>Tab. 13 Mez pevnosti v tahu podél vláken</i>	50
<i>Tab. 14 Mez pevnosti v tahu podél vláken. Popisná charakteristika</i>	50
<i>Tab. 15 Modul pružnosti v tahu podél vláken</i>	52
<i>Tab. 16 Modul pružnosti v tahu podél vláken. Popisná charakteristika</i>	52
<i>Tab. 17 mez pevnosti v tahu napříč vláken</i>	53
<i>Tab. 18 Mez pevnosti v tahu podél vláken. Popisná charakteristika</i>	53
<i>Tab. 19 Modul pružnosti v tahu napříč vláken</i>	55
<i>Tab. 20 Modul pružnosti v tahu napříč vláken. Popisná charakteristika</i>	55
<i>Tab. 21Poissonovo číslo</i>	56
<i>Tab. 22 Poissonovo číslo. Popisná charakteristika</i>	57
<i>Tab. 23 Jednofaktorová ANOVA pro Poissonovo číslo</i>	57
<i>Tab. 24 Mez pevnosti v tahu v MPa</i>	58
<i>Tab. 25 Mez pevnosti v tahu v MPa. Popisná charakteristika</i>	58
<i>Tab. 26Jednofakktorová ANOVA pro mez pevnosti v tahu</i>	59
<i>Tab. 27 Modul pružnosti v tahu v MPa</i>	60
<i>Tab. 28 Modul pružnosti v tahu. Popisná charakteristika</i>	60
<i>Tab. 29 Jednofaktorová ANOVA pro modul pružnosti v tahu</i>	61
<i>Tab. 30Výpočtový modul pružnosti ve smyku</i>	61
<i>Tab. 31 Výpočtový modul pružnosti ve smyku. Popisná charakteristika</i>	61
<i>Tab. 32 Jednofaktorová ANOVA modul pružnosti ve smyku</i>	62
<i>Tab. 33 Mez pevnosti ve statickém ohybu (MPa)</i>	63
<i>Tab. 34 Mez pevnosti v ohybu. Popisná charakteristika</i>	63
<i>Tab. 35 Modul pružnosti ve statickém ohybu v MPa</i>	65
<i>Tab. 36 Modul pružnosti ve statickém ohybu. Popisná charakterisitka</i>	65