

**MENDELOVA UNIVERZITA V BRNĚ**

Lesnická a dřevařská fakulta

Ústav nauky o dřevě



**ANALÝZA DEFORMACÍ DŘEVA SMRKU ZTEPILÉHO  
ZATÍŽENÉHO TLAKEM V TANGENCIÁLNÍM SMĚRU**

Bakalářská práce

## Čestné prohlášení

*Prohlašuji, že jsem práci: Analýza deformací dřeva smrku ztepilého zatíženého tlakem v tangenciálním směru zpracoval/a samostatně a veškeré použité prameny a informace uvádím v seznamu použité literatury. Souhlasím, aby moje práce byla zveřejněna v souladu s § 47b Zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách ve znění pozdějších předpisů a v souladu s platnou Směrnicí o zveřejňování vysokoškolských závěrečných prací.*

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

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

*V Brně, dne: .....*

*Podpis studenta: .....*

## **Poděkování**

*Rád bych touto formou poděkoval mému vedoucímu práce Ing. Václavu Seberovi, Ph.D. za vedení a účinnou pomoc a podporu, především však za užitečné diskuse a připomínky k tématům této práce. Také bych chtěl poděkovat Ing. Martinu Brabcovi, Ph.D. za technickou pomoc při měření mechanických vlastností dřeva a diskusích ohledně optického měření deformací.*

*Velké poděkování patří také mé rodině, a to především za porozumění, trpělivost a podporu, kterou mi během těch několika let poskytovali.*

*Martin Šotner*

## Abstrakt

**Autor:** Martin Šotner

**Název:** Analýza deformací dřeva smrku ztepilého zatíženého tlakem v tangenciálním směru

Hlavním přínosem této bakalářské práce je analýza mechanických vlastností smrku ztepilého (*Picea abies* L.) zatíženého tlakem v tangenciálním směru. Je zde uvedena základní teorie mikroskopické stavby struktury dřeva a přehled starších i moderních metod (dle současné literatury) pro vyhodnocení deformací, z nichž vybrané jsou využity v experimentální části této práce. Měření mechanických zkoušek probíhá za pomoci příčnicku současně s metodou korelace digitálního obrazu (DIC) pro zjištění modulů pružnosti a maximálního napětí (pevnosti). Jsou vyhodnocovány parametry letního a jarního dřeva pomocí tlakových zkoušek vzorků letního dřeva elektromechanickými materiálovými testovacími systémy (Tinius a Zwick) a za pomoci Voigtova modelu deformace kompozitu na přesném změření objemového podílu vláken. Získané výsledky jsou statisticky vyhodnoceny a porovnány. Na základě faktoru trhačky byla hodnota průměrného odvozeného modulu pružnosti stanovena na 807,12 MPa, což je hodnota, která se přibližuje skutečnému modulu pružnosti letního dřeva zjištěného aplikací Voigtova modelu, průměrně 929,32 MPa. Hodnota odvozeného modulu pružnosti je o cca 15 % nižší, než je přesněji zjištěný skutečný modul pružnosti letního dřeva. Podobným způsobem jako separované moduly pružnosti byly zjištěny i pevnosti (max. napětí), průměrná hodnota max. napětí v jarním dřevě byla 5,47 MPa a v letním 10,25 MPa.

**Klíčová slova:** Korelace digitálního obrazu (DIC), deformace dřeva, modul pružnosti, pevnost, příčník, tangenciální směr, Voigtův model

## **Abstract**

**Author:** Martin Šotner

**Title:** Analysis of timber spruce by compressive (mechanical) deformation in tangential direction

The main goal of this bachelor thesis consists in analysis of mechanical features of timber spruce (*Picea abies* L.) under compressive mechanical deformation in tangential direction. Basic theory about the microscopic structure of wood and an overview of traditional and modern methods for analysis and evaluation of mechanical phenomena were introduced in recent literature as well as cited in experimental part of this work. Results of the work – elastic moduli and strengths of early and late wood – are obtained from experiments based on electromechanical material testing systems Tinius and Zwick and digital image correlation (DIC) simultaneously. Modulus of elasticity and mechanical strength are processed by Voigt model. Obtained results are statistically evaluated. The average value of modulus of elasticity (late wood) considering influence of method inaccuracy (mechanical testing device) is specified as 807.12 MPa (experimentally obtained value of target parameter). The value 807.12 MPa approximates value (929.32 MPa) obtained from Voigt model (estimated value of target parameter). Both values of modulus of elasticity have 15% difference. Similar approach (Voigt model) is used for evaluation of average stress of early (5.47 MPa) and late (10.25 MPa) wood.

**Keywords:** Digital image correlation, electromechanical material testing systems, modulus of elasticity, strength, tangential direction, Voigt model, wood deformation

## OBSAH

1	ÚVOD .....	1
2	CÍL PRÁCE .....	2
3	LITERÁRNÍ PŘEHLED .....	3
3.1	Struktura a vlastnosti dřeva .....	3
3.2	Buněčná stěna dřeva .....	3
3.3	Mechanické vlastnosti dřeva.....	4
3.4	Tlak v tangenciálním a radiálním směru .....	6
3.4.1	Nelineární vlastnosti.....	8
3.4.2	Radiální směr.....	8
3.4.3	Tangenciální směr .....	8
3.4.4	Vliv dřeňových paprsků .....	9
3.4.5	Model šestiúhelníkového uspořádání struktury buněk.....	10
3.4.6	Modul pružnosti a mez pevnosti .....	11
3.4.7	Podélný Voigtův model deformace kompozitu.....	13
3.5	Tradiční způsoby měření deformací .....	15
3.5.1	Extenzometry, LVDT (linear variable differential transformer).....	15
3.5.2	Tenzometry.....	16
3.5.2.1	Kovové tenzometry .....	17
3.5.2.2	Polovodičové tenzometry .....	18
3.6	Moderní optické metody měření deformací .....	18
3.6.1	Metoda Moiré.....	18
3.6.2	Metoda DIC (Digital Image Correlation).....	20
4	MATERIÁL A METODIKA.....	22
4.1	Příprava standardních tlakových vzorků .....	22
4.2	Příprava vzorků letního dřeva.....	23
4.3	Zjištění podílu letního dřeva.....	24
4.4	Měření odklonu vláken a plochy letního dřeva .....	25
4.5	Standardní tlaková zkouška v tangenciálním směru.....	26
4.6	Tlaková zkouška letního dřeva .....	27
4.7	Měření pomocí nekontaktní metody korelace digitálního obrazu (DIC).....	28
4.8	Analýza délky vlivu extenzometru .....	30
4.9	Výpočet modulu pružnosti v jarním a letním dřevě na základě podélného Voigtova modelu deformace kompozitu.....	30

4.9.1	Faktor trhačky .....	31
4.10	Metoda zpracování naměřených dat (statistická analýza).....	31
5	VÝSLEDKY A DISKUSE .....	32
5.1	Podíl letního dřeva a odklon vláken .....	32
5.2	Analýza délky vlivu extenzometru .....	34
5.3	Tlaková zkouška .....	35
5.3.1	Zatížení celých vzorků v tangenciálním směru.....	35
5.3.2	Letní dřevo .....	38
5.4	Optické měření deformací .....	40
5.4.1	Výstup dat z DIC a načtení do softwaru Vic-3D .....	40
5.5	Aplikace Voigtova modelu .....	43
5.6	Výpočet napětí v jarním a letním dřevě.....	44
6	ZÁVĚR .....	46
7	SUMMARY .....	47
8	POUŽITÁ LITERATURA .....	48
9	POUŽITÉ NORMY .....	50
10	PŘÍLOHY .....	51
9.1	Postup převzorkování (interpolování) hodnot v programu Octave .....	53
9.2	Použité statistické charakteristiky.....	56
11	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	57
12	SEZNAM TABULEK.....	60

## SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ

DIC.....	digitální korelace obrazu
P .....	primární stěna
S .....	sekundární stěna
S <sub>1</sub> .....	vnější vrstva
S <sub>2</sub> .....	střední vrstva
S <sub>3</sub> .....	vnitřní vrstva
SM.....	smrk
BK.....	buk
DB.....	dub
$\rho_0$ .....	hustota jarního dřeva [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_1$ .....	hustota letního dřeva [kg/m <sup>3</sup> ]
$E$ .....	modul pružností [MPa],
indexy L, R, T .....	podélný, příčný, tangenciální směr
$E_{PŘÍČ}$ .....	modul pružnosti měřený pomocí příčnicku [MPa]
$E_{DIC}$ .....	modul pružnosti DIC [MPa]
$E_{OD}$ .....	modul pružnosti odvozený [MPa]
$G$ .....	smykový modul pružnosti
$F$ .....	síla [N]
e, JD .....	jarní dřevo
L, LD.....	letní dřevo
$\alpha$ .....	odklon vláken [°]
$\mu$ .....	Poissonovo číslo [-]
$\sigma_{max}, \sigma_p, \sigma$ .....	mez pevnosti (napětí) [MPa]
$\sigma_u$ .....	mez úměrnosti [MPa]
$\sigma_d$ .....	napětí dolní meze úměrnosti [MPa]
a, b.....	příčné rozměry zkušebního vzorku [mm]
$\varepsilon$ .....	poměrná deformace [%]
$\varepsilon_u$ .....	deformace na mezi úměrnosti [%]
$\varepsilon_d$ .....	deformace dolní meze úměrnosti [%]
$x$ .....	původní rozměr tělesa [mm]
$d_x$ .....	rozměr tělesa po deformaci [mm]
$s_a$ .....	aktuální posunutí čelisti [mm]
$s_d$ .....	posunutí při zahájení měření [mm]



$l_0$ .....	původní délka vybrání tělesa [mm]
$k$ .....	koeficient korekce
index $c$ .....	znamená celkoví (globální)
$S$ .....	plocha [mm <sup>2</sup> ]
$V$ .....	objemový podíl [-]
$f$ .....	frekvence [Hz]
$R$ .....	odpor [ $\Omega$ ]
$\rho$ .....	měrný elektrický odpor materiálu [ $\Omega$ ]
$l$ .....	délka [m]
$\Delta R$ .....	odpor po deformace [ $\Omega$ ]
$k$ .....	k-faktor
$w$ .....	vlhkost vzorků [%]
RVV.....	relativní vlhkost vzduchu [%]
$T$ .....	teplota [ $^{\circ}\text{C}$ ]
(* .TIFF), (* .PNG), (* .GIF), (* .JPEG), (* .BMP), (* .DICOM), (* .FITS) ...	formáty obrazů
DBI.....	kvalita naskenované fotky
$\bar{L}$ d.....	průměrné procento letního dřeva [%]
$\Sigma dx$ .....	součet šířek letního dřeva [mm]
$m$ .....	hmotnost [g, Kg]
$v$ .....	rychlost [mm/min]
F.T.....	faktor trhačky (příčnicku) [-]
š. l. d.....	šířka letního dřeva [mm]
š. c. v.....	šířka celého vzorku (tělíška) [mm]
%LD.....	procentuální zastoupení letního dřeva [%]
P. ext.....	počet extenzometrů [-]
$D_{0xx}$ .....	horizontální souřadnice (šířka extenzometru) [mm]
$D_{1yy}$ .....	vertikální souřadnice (délka extenzometru) [mm]
P hodnota.....	pro statistické určení hypotézy $P > \alpha$ , nebo $P < \alpha$ , ( $\alpha = 0,5$ )

# 1 ÚVOD

Dřevo je prastará, ale stále moderní surovina a materiál, která se nedá nahradit ani kvantitativně, ani kvalitativně. Dřevo má své nenahraditelné vlastnosti a to např. pevnost, pružnost, plastičnost, houževnatost s konkrétní objemovou hmotností, ohýbatelnost, tepelně izolační vlastnosti apod.

Díky svým vlastnostem, jako je například malá hustota, ale vysoká pevnost, lehká zpracovatelnost nebo nízká tepelná vodivost, je dřevo po celá staletí používáno ve stavitelství jako materiál pro konstrukce krovů a doplňkových stavebních konstrukcí.

Důležitou vlastností dřeva je jeho vysoká trvanlivost. Tato vlastnost se projevuje pouze za určitých podmínek, které musíme znát a dodržovat, pokud nechceme, aby došlo k jeho poškození až destrukci. Z tohoto důvodu musíme tedy znát především optimální podmínky vnějšího prostředí, ve kterém je materiál případně uložen a respektovat je.

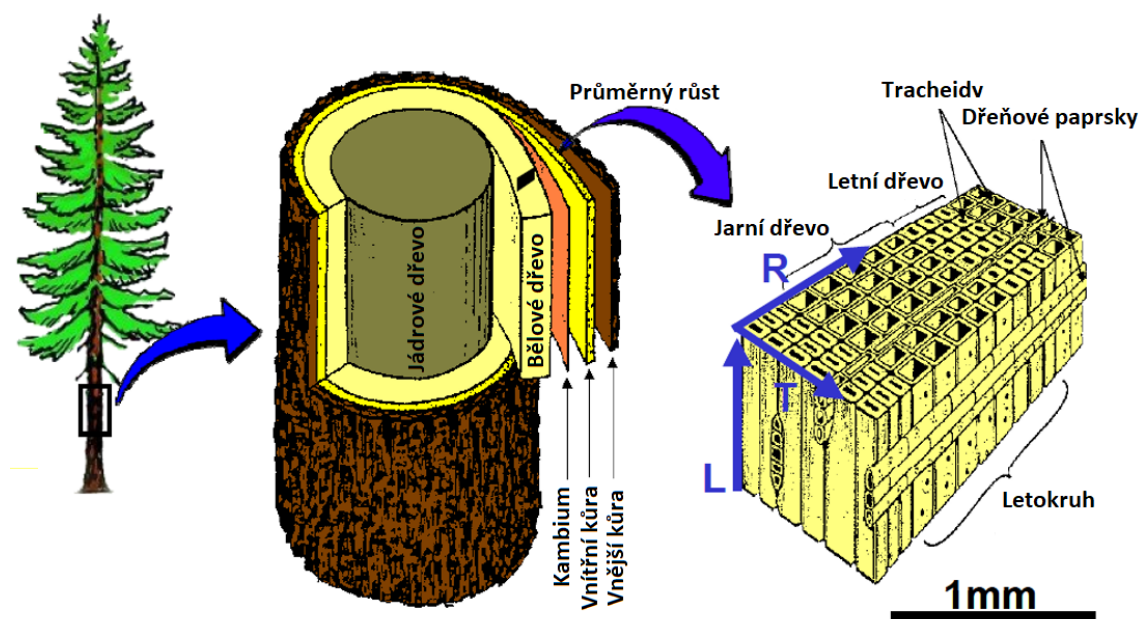
## 2 CÍL PRÁCE

Práce je zaměřena na problematiku analýzy deformace dřeva smrku ztepilého v tlaku v tangenciálním směru za současného měření dvěma metodami, a to standardním měřením deformace pomocí příčnicku a pomocí nekontaktní metody korelace digitálního obrazu (DIC). Konkrétními cíli práce bylo provést zkoušku v tlaku a změřit celkový modul pružnosti pomocí příčnicku a pomocí metody DIC. Dále experimentálně zjistit modul pružnosti letního dřeva a vypočítat napětí, která vznikají v jarním a letním dřevě na základě podélného Voigtova modelu deformace kompozitu. V neposlední řadě bylo cílem práce provést verifikační měření a statisticky vyhodnotit rozdíly mezi všemi skupinami měření.

### 3 LITERÁRNÍ PŘEHLED

#### 3.1 Struktura a vlastnosti dřeva

Při pohledu na průřez stromu je vyčleněná vnější vrstva a střední vrstva kůry. Živá část lýko a vnitřní část kambium – dělivé pletivo – se podílí na vytváření nových buněk bělového dřeva. Strom dopravuje vodu a živiny hlavně v bělovém dřevě. Nejvnitřnější část dřeva se nazývá jádrová. Tato tmavá část dřeva je mnohem sušší než část bělová. Rostoucí stromy v mírném pásu vytvářejí jarní a letní dřevo. Jarní dřevo je tvořeno na začátku vegetačního období a je charakteristické tenkostěnnými lumeny buněk, které mají vodivou funkci kapalin. Letní dřevo je tvořeno tlustostěnnými buňkami, které mají převážně mechanickou funkci (opěrnou) ve stromě. Jarní a letní dřevo tvoří letokruh, což je roční přírůstek dřeva (De Magistris 2005).

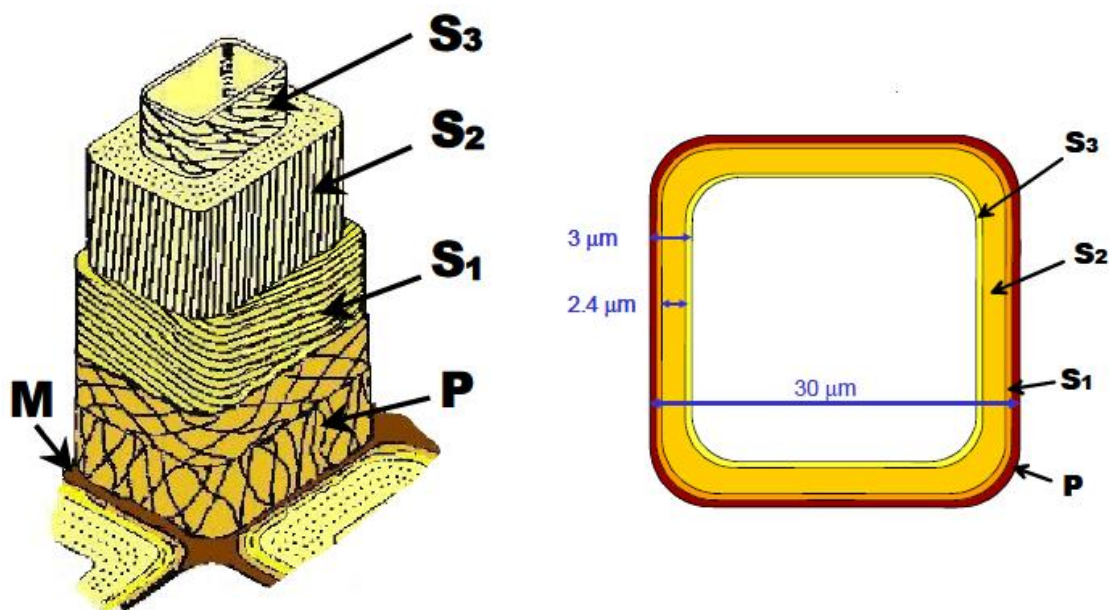


**Obr. 1:** Schématické znázornění struktury dřeva jehličnanů (De Magistris 2005)

#### 3.2 Buněčná stěna dřeva

Skládá se z několika vrstev, primární stěna P, sekundární stěna S, která se dále rozděluje na vnější vrstvu S<sub>1</sub>, střední vrstvu S<sub>2</sub>, vnitřní vrstvu S<sub>3</sub>. Buněčná stěna se skládá z polymerů celulózy, hemicelulózy a ligninu. Hlavní rozdíl mezi těmito vrstvami buněčné stěny je v různých orientaci vláken. Vlákná v primární stěně jsou orientována nepravidelně. Tyto tři vrstvy sekundární stěny mají různé orientace celulózy fibril. Dominantní vrstva je S<sub>2</sub>, která

tvoří asi 70 až 80 % tloušťky buněčné stěny. Ve vrstvě  $S_1$  je úhel fibril 70 až 90° k podélné ose (cév),  $S_2$  vrstva 5 až 15° a v  $S_3$  jsou mikrofibrily orientované 50° (De Magistris 2005).



**Obr. 2:** Schéma a geometrie modelu buněčné stěny v průřezu jarního dřeva (De Magistris 2005)

Celulóza je nejhojnější biopolymer na Zemi. Přibližně 40 % z hmotnosti suchého dřeva se skládá z celulózy. Jedná se o krystalický polymer převážně hydrofilního charakteru. Hemicelulózy jsou amorfni sacharidy ze skupiny heterogenních polymerů. Tvoří 20 až 30 % z hmotnosti suchého dřeva; jsou hydrofilní (váže vodu za vzniku vodíkových vazeb). Lignin představuje 30 % z hmotnosti suchého dřeva, zamezuje pronikání vody do dřeva a vyztužuje řetězce celulózy.

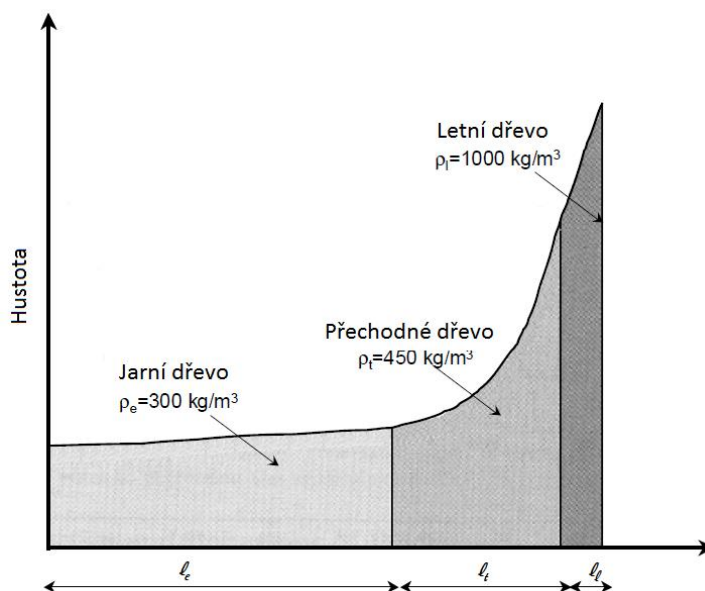
### 3.3 Mechanické vlastnosti dřeva

Mechanické vlastnosti dřeva závisí především na vlastnostech buněčné stěny, hustotě dřeva a tvaru buněk. Je-li vzorek dřeva vyříznut v části vzdálené od středu průřezu stromu, docílíme, že zakřivení růstového letokruhu není tak významné jako u středu. Vlastnosti dřeva jsou anizotropního charakteru, ale často se redukují na ortotropní charakter, který je určen třemi ortogonálními rovinami symetrie – podélné, radiální a tangenciální. Tuhost a pevnost dřeva je největší v podélném (axiálním) směru, rovnoběžném s osou kmene stromu. V radiálním a tangenciálním směru je pevnost hodně podobná (kap. 2.4). Tyto rozdíly se týkají hlavně struktury dřeva, která je tvořena buněčnou pevnou látkou.

Základní elementy charakterizující mikrostrukturu stavbu dřeva jehličnanů (Obr. 1). Jehličnaté dřeviny jsou vývojově starší než dřeviny listnaté a jejich struktura se považuje za jednodušší a více pravidelnou (Dinwoodie 1981, Bodig a Jayne 1993).

- Tracheidy (cévice) – velmi protáhlé buňky tvořící převážnou část struktury dřeva, funkce vodivá a mechanická (95 %)
- Dřeňové paprsky – viditelné na radiálním řezu tvořené parenchymatickými buňkami, funkce ukládání zásobních látek (5–7 %)
- Pryskyřičné kanálky – zásobárna tuků a škrobů (0,2 – 0,3 %)
- Dřevní parenchym (axiální) – funkce zásobní (Wouts et al. 2016)

Dřevo jako materiál vytvořený přírodou má komplexní mechanické vlastnosti. Přirozené rozdíly ve vlastnostech jsou způsobeny rozdílnou strukturou v důsledku genetiky a podmínek růstu (klíma, typ půdy a terénu). Také hustota vykazuje velké rozdíly v závislosti na faktorech podnebí. Struktura letokruhů má za následek velké kolísání hustoty ovlivňující vlastnosti jarního dřeva s hustotou  $300 \text{ kg/m}^3$  a letního dřeva s hustotou  $1000 \text{ kg/m}^3$  (Obr. 3). Rozdíl je způsoben v příčné tloušťce buněčných stěn (lumenu) jarních a letních tracheid (Wouts et al. 2016).



**Obr. 3:** Hustoty jarního a letního dřeva (Wouts et al. 2016)

Kyziol (2016) popisuje zvýšení mechanických vlastností dřeva povrchovou modifikací, tj. jak povrchová úprava ovlivňuje materiálové vlastnosti. Vzorky s různým obsahem polymeru jsou ohýbány na válcové ohýbačce za zjištění materiálových konstant v jednotlivých směrech, vrstev jarního a letního dřeva. Využívá především vzorky bez úprav (čistě přírodní)

a modifikovaných polymerem (polymethylmethanakrylátu.), které mezi sebou v tabulkách přehledně porovnává. V závěru článku Kyziol (2016) tvrdí, že povrchová úprava výrazně zvyšuje pevnost dřeva. Díky porézní struktuře nátěrová hmota lépe vniká (vsakuje se) do povrchu a při vytvrzování dochází ke snížení anizotropii dřeva.

**Tab. 1:** Materiálové konstanty pro vrstvy přírodního dřeva (Kyziol 2016)

Vrstvy	$E_R = E_T$ [MPa]	$E_L$ [MPa]	$G_{TL} = G_{RL}$ [MPa]	$G_{RT}$ [MPa]
Jarní dřevo	1 630	8 600	450	720
Letní dřevo	3 500	16 000	2 100	1 430
$E$ je normálový modul pružnosti, $G$ je smykový modul pružnosti*				

\* Normálový modul pružnosti měřený ve směru kolmo na plochu a smykový měřený v rovině průřezu.

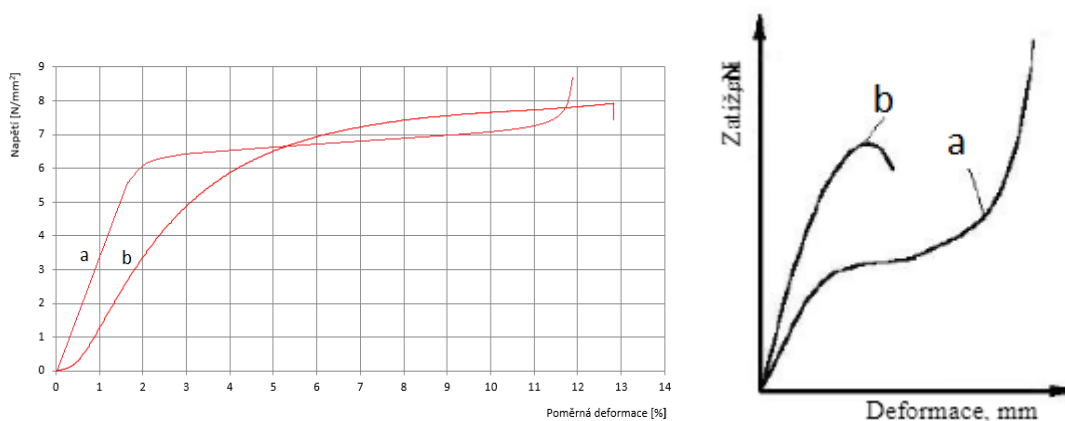
Z hlediska této práce jsou z článku (Kyziol 2016) důležité materiálové konstanty, kde je rozdíl jarního a letního dřeva přibližně poloviční, tento rozdíl je dále využíván v (kap. 4.9).

### 3.4 Tlak v tangenciálním a radiálním směru

Během zatěžování dřeva v tlaku kolmo k vláknům dochází u materiálu pod působícím zatížením ke zhušťování dřevní hmoty. Jsou možné dva způsoby deformací dřeva, deformace dvoufázová a třífázová (Obr. 4). Při dvoufázové deformaci je na diagramu zřetelná lineární část, která probíhá do meze úměrnosti a poté nelineární část, ve které dochází k porušení tělesa. Tato deformace je typická pro dřevo jehličnanů a listnatých dřevin s kruhovitě pórovitou stavbou letokruhů kromě dubu (Juodeikienė 2005).

Třífázová křivka deformace dřeva je typická pro zatížení dřeva při tlaku napříč vláken v radiálním směru pro všechna naše dřeva s výjimkou dubu. V tangenciálním směru pro dřeva listnáčů s roztroušeně pórovitou stavbou, v tomto směru se projevuje i u dubu.

Počáteční, první fáze deformace (lineární část křivky) je způsobena stlačováním jarního dřeva v letokruzích na konci této fáze je dosaženo meze úměrnosti. Po ztrátě stability anatomických elementů se začíná jejich stlačování. Na pracovním diagramu to představuje téměř vodorovnou část křivky (druhá fáze). S postupnou deformací pevnějších elementů letního dřeva v letokruzích dochází k přechodu do třetí fáze deformace. Třetí fáze je charakterizována lineární částí s ostrým stoupáním. Tato fáze probíhá při značném zatížení (Obr. 4). Dochází ke zhušťování dřeva (Juodeikienė 2005; Požgaj et al. 1997; Persson 2000).



**Obr. 4:** Pracovní diagram pevnosti v tlaku napříč vláken, a – třífázová deformace, b – dvoufázová deformace (Juodeikienė 2005)

V buněčných stěnách je na chemické úrovni napětí přenášeno přes makromolekuly celulózy a hemicelulózy na amorfní výplň celulózní kostry buněčné stěny.

Na pracovní diagram mají značný vliv tyto atributy:

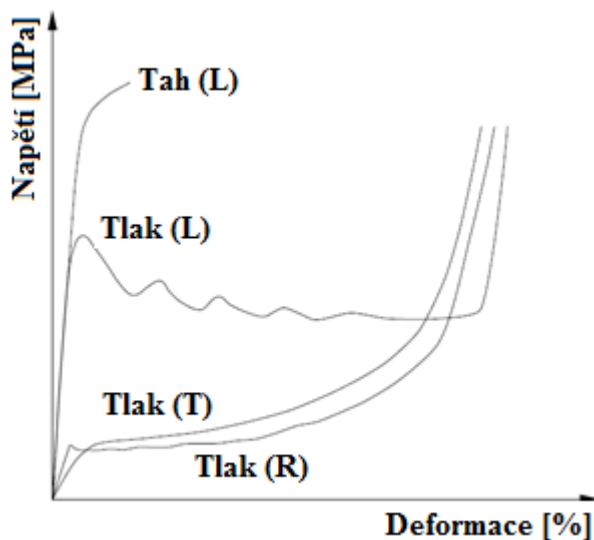
- Orientace letokruhů vzhledem k působícímu zatížení (zejména u jehličnatých dřevin)
- Hustota dřeva (přírodní vady, jako jsou např. suky, což jsou z hlediska materiálu lokální zóny s vyšší hustotou dřeva, mají pozitivní vliv)
- Velikost vzorků (zásadní vliv má výška zatěžovaného vzorku)

Pevnost kolmo na vlákna je menší, protože anatomické elementy nejsou schopny v tomto směru přenášet tak velké zatížení. Příčinou chování je uložení buněk kolmo ke směru působící síly. Dochází k deformování průřezu buněk a k namáhání fibril v  $S_1$  a  $S_3$  vrstvách. Ty jsou slabé a tenké. V konečném případě dochází k prolomení průřezu a k zániku lumenů buněk, dochází k zahušťování stavby. Například jako chodit po „pet lahvích“ (Juodeikienė 2005). Kromě těchto elementů dřeva, mají významný podíl na mechanických vlastnostech chemické vazby. Vlastnost vodíkové vazby v materiálech na bázi dřeva jsou už dlouho známé. Z historického pohledu pevnost vodíkové vazby ve dřevě popisuje několik autorů (Gilli and Gilli 2009) jako vazbu s relativně nízkou energií 12,6 až 25,1 kJ/mol (Gardner 2016) orientovanou v příčném směru (v radiálním i tangenciálním) a kovalentní vazby celulózy s vysokou pevností přibližně okolo 400 kJ/mol působící v podélném směru, která je 10x větší než v příčném směru. Nedávné důkazy podporují, že pevnost vodíkové vazby může být podstatě větší, než věřila většina autorů 4,2 až 188 kJ/mol (Gardner 2016).



### 3.4.1 Nelineární vlastnosti

Když je dřevo vystaveno zatížení nad mezí úměrnosti dochází k nevratným změnám materiálu. Pro dřevo zatížené v tahu jsou tyto změny malé až do okamžiku, kdy dojde ke zlomu. Při působení tlaku na dřevo je průběh na grafu nelineární v důsledku jeho porézního charakteru. Na (Obr. 5.) jsou znázorněny jednoosé napětí deformace, pro suché dřevo zatížené v tahu, tlaku (podélným, tangenciální a radiálním směru).



**Obr. 5:** Typický graf jednoosých stavů napětí závislé na deformaci, pod zatížením v tlaku působeného v podélném, radiálním a tangenciálním směru a tahu v podélném směru (Persson 2000)

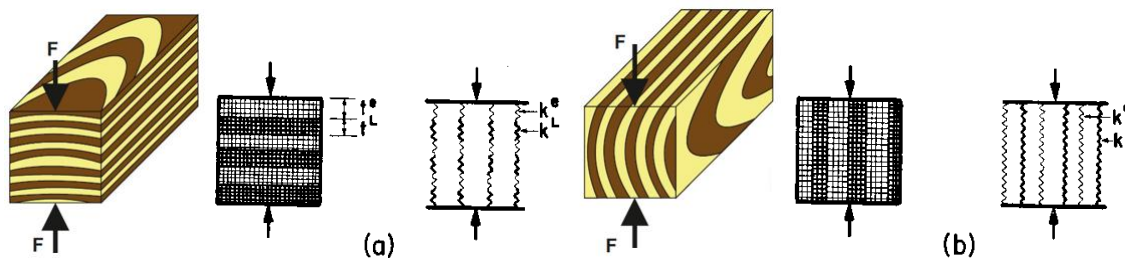
### 3.4.2 Radiální směr

Při namáhání v tomto směru dochází k vybočení tenkostěnných buněk (buněčné stěny, lumen) jarního dřeva v důsledku menší hustoty v porovnání s letním dřevem, obě oblasti jsou zatěžované za sebou (sériově) (Obr. 6). V první fázi dochází k rozrušování buněčných stěn, ke konci jsou stěny výrazně zhuštěny. Například model pružin s odlišnými vlastnostmi, kde buněčné stěny mohou být od sebe relativně dost vzdálené a plastická deformace bude nastávat prvně u méně tuhé pružiny jarního dřeva.

### 3.4.3 Tangenciální směr

V tomto směru namáhání dřeva je oblast jarního a letního dřeva zatěžována současně vedle sebe (paralelně), zatížení tlakem vede k vybočení letního dřeva do okolní oblasti jarního dřeva buňky, mají snahu posouvat se po sobě a porušovat mezibuněčné vrstvy (střední

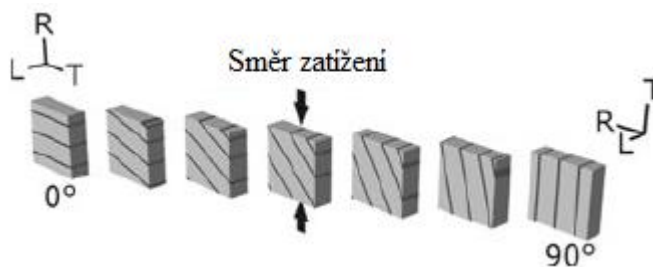
lamely) zároveň v menší míře dochází také k porušování buněčné stěny. Na modelu pružin v tomto směru není tuhost pružiny dřeva oslabena jarní částí (Obr. 6).



**Obr. 6:** Model pružin charakterizující chování jarního a letního dřeva (Bodig a Jayne 1993)

### 3.4.4 Vliv dřevných paprsků

U jehličnanů nemají moc velký vliv, protože mají pouze jednovrstvé dřevné paprsky. Z toho důvodu by pevnost v radiálním směru měla být nižší než v tangenciálním (Da Silva 2007; Garab 2010). Naopak listnaté dřeviny s mohutnými dřevnými paprsky, které mají vyšší pevnost a tím zvyšují tuhost dřeva v radiálním směru lépe než v tangenciálním. V radiálním směru je vyšší mez pevnosti v důsledku své podélné orientace k působící síle. Da Silva (2007) popisuje tlakovou odezvu a selhání balzového dřeva, stejně jako fakt, že balzové dřevo má vynikající tuhost a pevnost v poměru k jeho hmotnosti. Podobně jako smrk ztepilý má Balza mikrostrukturu buněčných stěn uspořádanou hexagonálně (kap. 3.4.5). Da Silva (2007) rovněž analyzuje podélné deformace, ve kterém vykazuje dřevo balzy nejlepší vlastnosti. Tvrdí, že přítomností dřevných paprsků v radiálním směru je modul pružnosti větší než v tangenciálním směru. Garab (2010) u dřeva smrku (*Picea abies* L.) a tisu (*Taxus baccata* L.), měkká dřeva s výrazně odlišnou anatomickou strukturou, experimentálně zjistil modul pružnosti a Poissonovo číslo při standardní tlakové zkoušce v jednoosém stavu zatížení při různých odklonech vláken (Obr. 7). Modul pružnosti byl vyšší v radiálním a tangenciálním směru. Při odklonu vláken  $\alpha = 45^\circ$  se modul pružnosti snížil na minimum Obr. 7.

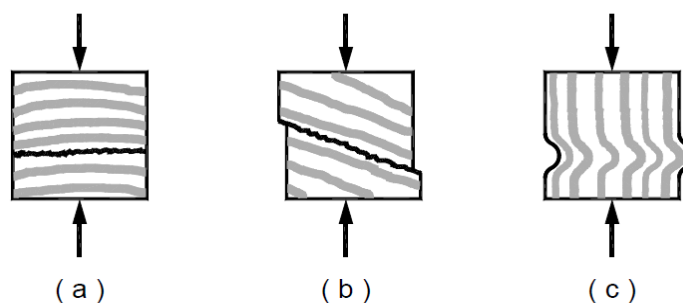


**Obr. 7:** Vzorky 10 x 10 mm o tloušťce 4 mm, při odklonu vláken  $\alpha = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$  deformace tlakem (Garab 2010)

**Tab. 2:** Experimentálně zjištěné hodnoty při různém odklonu vláken (Garab 2010)

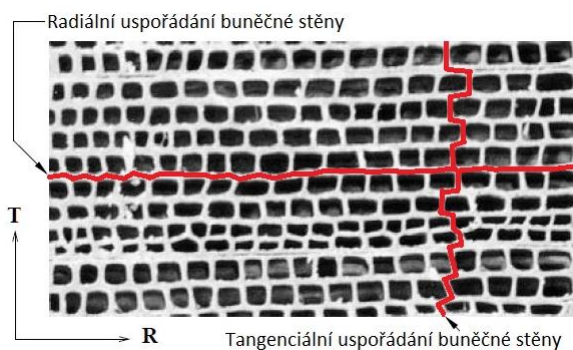
Smrk ztepilý ( <i>Picea abies</i> L.)							
$\alpha$ [°]	0	15	30	45	60	75	90
$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	460	460	460	460	460	460	460
$E$ [MPa]	211	156	100	95	114	160	194
$\mu$ [-]	0,59	0,83	0,89	0,91	0,87	0,64	0,31
$\alpha$ je odklon vláken [°], $\rho$ je hustota [kg/m <sup>3</sup> ], $E$ je modul pružnosti [MPa], $\mu$ je Poissonovo číslo [-]							

Garab (2010) potvrzuje analýzou Digital Image Correlation (DIC), viz kapitola 3.6.2, že při jednoosém stavu zatížení jsou nejzřetelnější rozdíly mezi jarním a letním dřevem u smrku více než u tisového dřeva. Při odklonu vláken 45° dochází k viditelnému oddělení vrstev jarního a letního dřeva. Tato změna není rozpoznatelná na tangenciálním směru při odklonu vláken 90°. V závěru Garab (2010) z laboratorního měření zjistil, že hodnoty modulu pružnosti při odklonu vláken 0° v radiálním směru jsou vyšší o 9 % než v tangenciálním směru při odklonu vláken 90° (viz Tab. 2). Na základě měření se zjistilo, že tuhost v radiálním směru je přibližně 2krát větší než ve směru tangenciálním (Bodig a Jayne 1993).

**Obr. 8:** Selhání smrkového dřeva (*Picea abies* L.) namáhání tlakem při: a) radiálním  $\alpha = 0^\circ$ , b) diagonálním  $\alpha = 45^\circ$  a c) tangenciálním směru  $\alpha = 90^\circ$  (Riggio 2007)

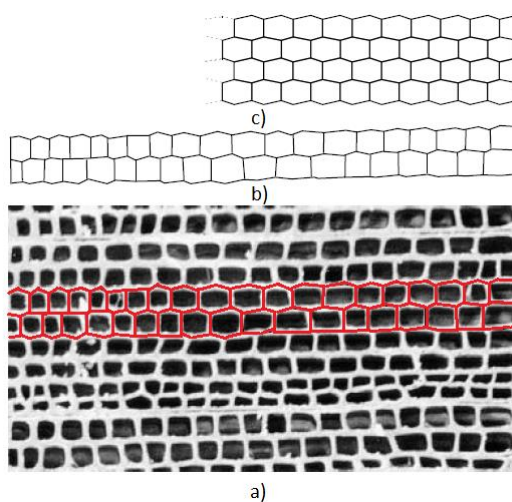
### 3.4.5 Model šestiúhelníkového uspořádání struktury buněk

Studiem struktury buněk letního dřeva lze poznamenat, že uspořádání buněk v radiálním a tangenciálním směru se významně liší. V radiálním směru jsou buňky poskládané v poměrně rovném uspořádání (linii), zatímco v tangenciálním směru jsou převážně v neuspořádaném struktuře (vzoru), (Obr. 9).



**Obr. 9:** Buněčná struktura jarního dřeva v radiálním a tangenciálním směru, zobrazující rozdíly v uspořádání buněčných stěn (Persson 2000)

Tyto neuspořádanosti tvaru buněčné struktury ovlivňují především vlastnosti dřeva v radiálním a tangenciálním směru, které jsou závislé na geometrickém modelu struktury buňky. Persson (2000) popisuje, že hexagonální struktura buňky je nejvíce podobná buňce smrku ztepilému (*Picea abies* L.), jeho cílem je vytvořit model struktury buňky, která bude mít co nejvíce shodné vlastnosti skutečné buňky dřeva smrku (Obr. 10) pomocí metody konečných prvků.



**Obr. 10:** Uspořádání struktury buněk: a) fotografie struktury buněk s hranicí buněčných stěn, b) příklad nepravidelného modelu šestiúhelníkové buněčné struktury, c) příklad pravidelného šestiúhelníkového (hexagonálního) modelu buněčné struktury (Persson 2000)

### 3.4.6 Modul pružnosti a mez pevnosti

Modul pružnosti v tlaku  $E$  [MPa], někdy také Youngův modul pružnosti, geometricky odpovídá směrnici přímkové části pracovního diagramu. Tento počáteční přímkový úsek diagramu přísluší pružné (elastické) deformaci a vyjadřuje úměrnost mezi napětím a deformací podle Hookeova zákona (2). Napětí ve dřevě představuje míru vnitřních sil, které

vznikají v tělese jako výsledek vyvolaný vnějšími mechanickými silami. Napětí je definované jako síla působící na plochu stejně jako tlak, avšak v bodě ve směru normály k ploše. Mez pevnosti je napětí při maximální síle a určí se dle ČSN 49 0102 následovně:

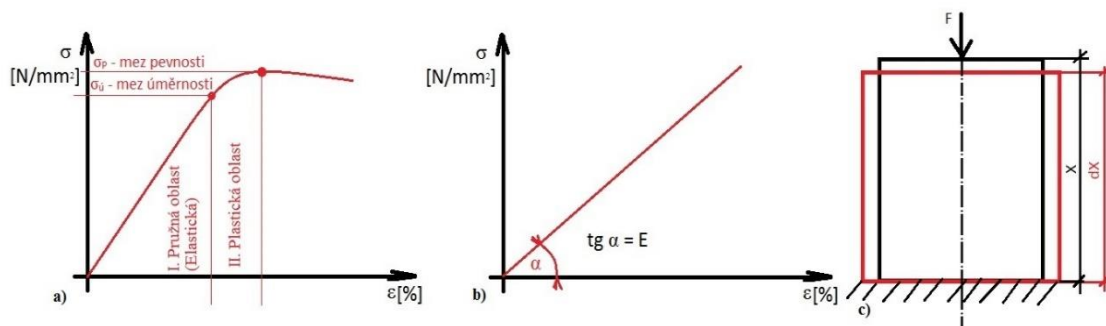
$$\sigma_p = \frac{F_{max}}{a \cdot b} [N/mm^2] \Rightarrow [Mpa] \quad (1)$$

kde:  $\sigma_p$  je mez pevnosti [MPa],  $F_{max}$  je maximální síla [N], a, b jsou příčné rozměry tělesa [mm]

Napětí se dělí na normálové, kde síla působí kolmo na plochu a smykové, kde síla působí v rovině průřezu. Hookeův zákon známý už v 17. století, popisuje pružnou (elastickou) deformaci materiálu působením síly, za předpokladu malých sil a malých deformací, které po odlehčení vymizí. Jednodušší formulace: Deformace je přímo úměrná napětí materiálu.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (2)$$

kde:  $\sigma$  je pevnost [MPa, N/mm<sup>2</sup>],  $E$  je modul pružnosti [MPa, N/mm<sup>2</sup>],  $\varepsilon$  je poměrná deformace [-, %]. Vztah vyjadřuje rovnici přímky, jedná se o jednoosé zatížení.



**Obr. 11:** Grafické znázornění důležitých veličin Hookeova zákona (Bodig a Jayne 1993)

Pevnost je maximální napětí, které je dřevo schopno vydržet. Na pracovním diagramu rozeznáváme mez úměrnosti  $\sigma_u$ , která odděluje pružnou a plastickou část deformace. V pružné a lineární části se po odlehčení struktura tělesa vrátí do původních rozměrů. Charakteristické pro plastickou oblast jsou trvalé změny struktury tělesa (vzorku), po odlehčení zůstává ve zdeformovaném stavu (Obr. 11.).

Materiálovou konstantu charakterizuje modul pružnosti udávající směrnici křivky na pevnostním diagramu, tangenta úhlu alfa je modul pružnosti charakteristický jako odpor

proti deformaci, který je konstantní v oblasti elastických deformací (Obr. 11.). Určení modulu pružnosti:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} [Mpa] \qquad E = \frac{(\sigma_u - \sigma_d)}{(\varepsilon_u - \varepsilon_d)} [Mpa] \quad (3)$$

kde:  $E$  je modul pružnosti [MPa],  $\sigma_u$  je napětí na mezi úměrnosti,  $\sigma$  je napětí [MPa],  $\sigma_d$  je napětí na dolní mezi lineární části,  $\varepsilon$  je poměrná deformace [%],  $\varepsilon_u$  je poměrná deformace na mezi úměrnosti,  $\varepsilon_d$  je poměrná deformace na dolní mezi lineární části.

Poměrná deformace je definována jako zkrácení (přetvoření) vzorku tělesa vzhledem k původnímu rozměru (Obr. 11.), (Bodig a Jayne 1993). Určení poměrné pružné deformace ve směru působící síly (dle ČSN 49 0102)

$$\varepsilon = \frac{d_x}{x} \cdot 100 [\%] \qquad \varepsilon = \left( \frac{(s_a - s_d)}{l_0} \right) \cdot k \cdot 100 [\%] \quad (4)$$

kde:  $\varepsilon$  je poměrná deformace [%],  $x$  je původní rozměr tělesa [mm],  $d_x$  je rozměr tělesa po deformaci [mm],  $s_a$  je aktuální posunutí čelisti [mm],  $s_d$  je posunutí při zahájení měření [mm],  $l_0$  je původní délka vybrání tělesa,  $k$  je koeficient korekce 0,1.

**Tab. 3:** Hodnoty  $\sigma$ ,  $E$ ,  $\varepsilon$  v různých způsobech namáhání (Požgaj et. al 1997)

Dřevina	Pevnost (R/T) [MPa]	Modul pružnosti (R/T) [MPa]	Deformace [%]
SM	3,4/4,0	789/289	2–3
BK	12,9/8,5	-	2–3
DB	11,0/8,5	2046/1028	2–3
SM – smrk, BK – buk, DB – dub			

### 3.4.7 Podélný Voigtův model deformace kompozitu

Podélný Voigtův model deformace kompozitu není nic jiného než směšovací rovnice dvou různých materiálů, v našem případě vrstev jarního a letního dřeva. Na základě experimentálně naměřeného globálního (celkového) modulu pružnosti metodou Digital Image Correlation (DIC) více (kap. 3.6.2), lze za pomoci Voigtova modelu vypočítají moduly pružnosti  $E_{JD}$ ,  $E_{LD}$  vrstev jarního a letního dřeva (DoITPoMS 2015).

Pro celý kompozit, stejně jako pro vrstvy jarního a letního dřeva musí platit, že zatěžovací síla je součin napětí a průřezu. Vyjádření zatěžovacích sil průřezů a napětím dosazením do vztahu pro celkovou sílu (5) v kompozitu dostáváme vztah (6).

Výpočet sil v modelu:

$$F_C = F_{LD} + F_{JD} \quad (5)$$

$$\sigma_C \cdot S_C = \sigma_{LD} \cdot S_{LD} + \sigma_{JD} \cdot S_{JD} \quad (6)$$

Vydělením celkovou plochou  $S_C$  dostáváme:

$$\sigma_C = \sigma_{LD} \cdot V_{LD} + \sigma_{JD} \cdot (1 - V_{LD}) \quad (7)$$

Pokud jsou zatěžovací síly tak malé, aby platil Hookeův zákon pro vrstvy letního a jarního dřeva (do meze pružnosti), musí platit i pro celkový vzorek dřeva. Dosazením do Hookeova zákona (2) do předchozího (7) vztahu dostáváme:

$$E_C \cdot \varepsilon_C = E_{LD} \cdot V_{LD} \cdot \varepsilon_{LD} + E_{JD} \cdot (1 - V_{LD}) \cdot \varepsilon_{JD} \quad (8)$$

Základní vztah získáme, předpokladem že poměrná deformace obou vrstev jarního a letního dřeva bude stejná (Obr. 12).

$$\varepsilon_C = \varepsilon_{LD} = \varepsilon_{JD} \quad (9)$$

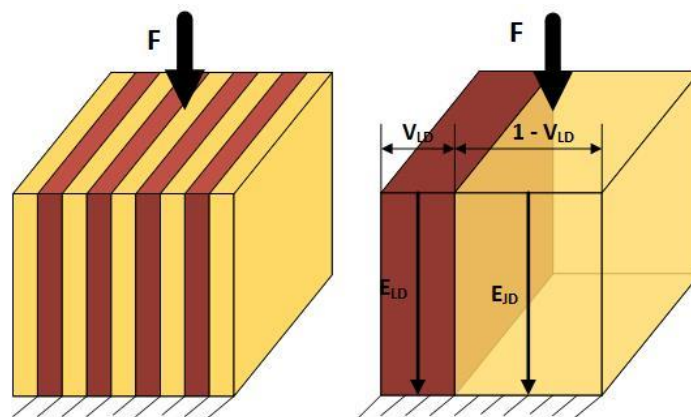
Při vyjádření deformace z rovnice (9) získáváme vztah:

$$\frac{\sigma_C}{E_C} = \frac{\sigma_{LD}}{E_{LD}} = \frac{\sigma_{JD}}{E_{JD}} \quad (10)$$

Vydělením napětím  $\sigma_C$  ze vztahu (10) dostáváme základní vztah směšovací rovnice a názorné schéma (Obr. 12):

$$E_C = E_{LD} \cdot V_{LD} + E_{JD} \cdot (1 - V_{LD}) \quad (11)$$

kde:  $\sigma$  je napětí [MPa],  $S$  je plocha [mm<sup>2</sup>],  $\varepsilon$  je poměrná deformace,  $F$  je působící síla [N],  $E$  je modul pružnosti [MPa],  $V_{LD}$  je objemové množství (zastoupení) [-], index  $C$  je celková (globální), LD je vrstva letního dřeva, JD je vrstva jarního dřeva.



**Obr. 12:** Zatížení vrstev letního a jarního dřeva v tangenciálním směru a princip Voigtova modelu (DoITPoMS 2015)

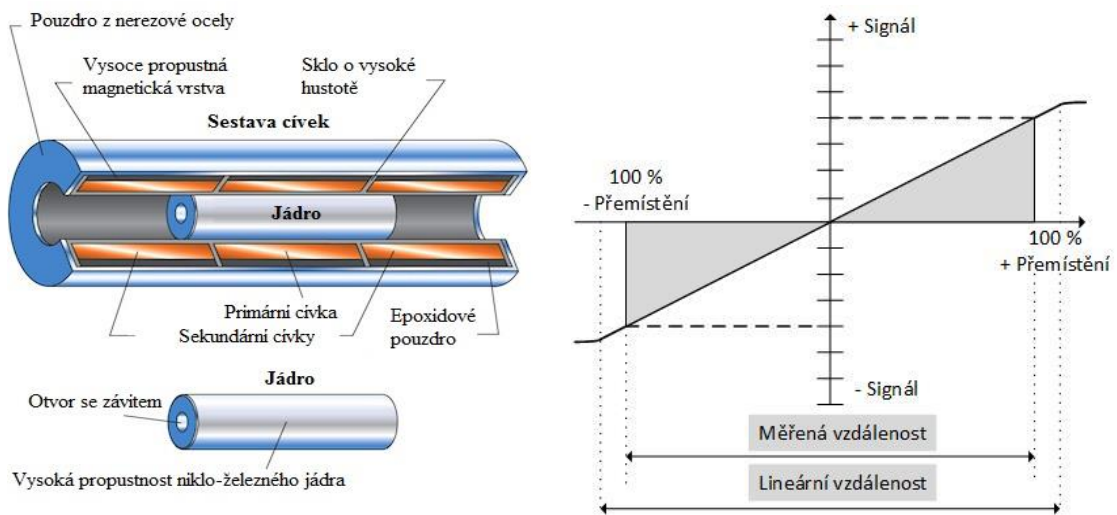
Kyziol (2016) uvádí materiálové konstanty pro vrstvy přírodního dřeva, pro jarní dřevo je modul pružnosti v radiálním a tangenciálním směru  $E_R = E_T = 1630 \text{ MPa}$  a pro letní dřevo  $E_R = E_T = 3500 \text{ MPa}$ . Z toho vyplývá, že poměr modulů pružnosti, mezi letním a jarním dřevem je přibližně poloviční.

### 3.5 Tradiční způsoby měření deformací

#### 3.5.1 Extenzometry, LVDT (linear variable differential transformer)

Používají se hlavně pro měření změny polohy, pohybu v řádu jednotek až desítek milimetrů (malých změn) a dosahují vysoké přesnosti s 0,1 % chybovosti. Využívají se především v hydraulických, pneumatických a mechanických (příčnick) zařízeních pro měření fyzikálních veličin síly nebo tlaku. Skládají se z dutého válce s uvnitř se pohybujícím táhlem. Dutý válec je tvořen soustavou tří válcových cívek, první cívka se nachází ve střední poloze, která se nazývá primární a je napájena harmonickým signálem o frekvenci v rozsahu 50 Hz – 25 kHz a je obklopena po obou stranách sekundárními cívkami, které jsou zapojeny sériově (jejich napětí se odčítají). Uprostřed dutého válce se mezi cívkami pohybuje feromagnetické jádro (kotva), které je součástí táhla. Primární vynutí je napájeno sinusovým signálem o konstantní frekvenci a napětí. Pohyb jádra způsobuje změnu magnetického toku a tím i změnu hodnoty indukovaného napětí v obou sekundárních cívkách. Když se jádro nachází v prostřední části dutého válce na primární cívce, tak na sekundárních cívkách je indukované napětí stejně velké a vzájemně se odčítá a ve výsledku je nulové. Vlivem posunu táhla dojde ke změně polohy jádra, které se více vychýlí na jednu ze dvou sekundárních cívek a dojde na výstupu k rozdílu indukovaného napětí o stejné frekvenci, jako je na primární cívce. Amplituda odpovídá rozdílu napětí jednoho sekundárního napětí od druhého (Obr. 13), (Drumea 2006).





**Obr. 13:** Řez LDVT snímačem a typická lineární převodní charakteristika (Fan 2011)

### 3.5.2 Tenzometry

Jsou to pasivní elektrosoučástky měřící nepřímou metodou mechanické napětí na povrchu deformovaného materiálu tzn. nalepí se na povrch měřeného namáhaného objektu, který má stejné deformace jako objekt, jedná se o nejrozšířenější a nejpoužívanější snímače. Základní princip měření spočívá v tom, že součástka mění svůj elektrický odpor v závislosti na mechanickém namáhání (Piezorezistivní jev).

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} \quad (12)$$

kde:  $R$  je elektrický odpor [ $\Omega$ ],  $\rho$  je měrný elektrický odpor materiálu [ $\Omega$ ],  $l$  je délka vodiče [mm],  $S$  je obsah průřezu vodiče [ $\text{mm}^2$ ]

Při deformaci tlakem (tahem) se mění struktura tenzometru – zmenšuje (zvětšuje) se délka a zvyšuje (zmenšuje) se průřez a podle použitého materiálu se mění i jeho měrný elektrický odpor. Stejně tak na tenzometru platí při působení síly Hookeův zákon včetně poměrné deformace vzorce (2), (4), schématicky charakterizuje (Obr. 14). Lineární vztah elektrického odporu a neelektrické veličiny deformace vyjadřuje, že změna odporu je přímo úměrná poměrné deformaci, kterou charakterizuje vztah (13).

$$\frac{\Delta R}{R} = \varepsilon \cdot k \quad (13)$$

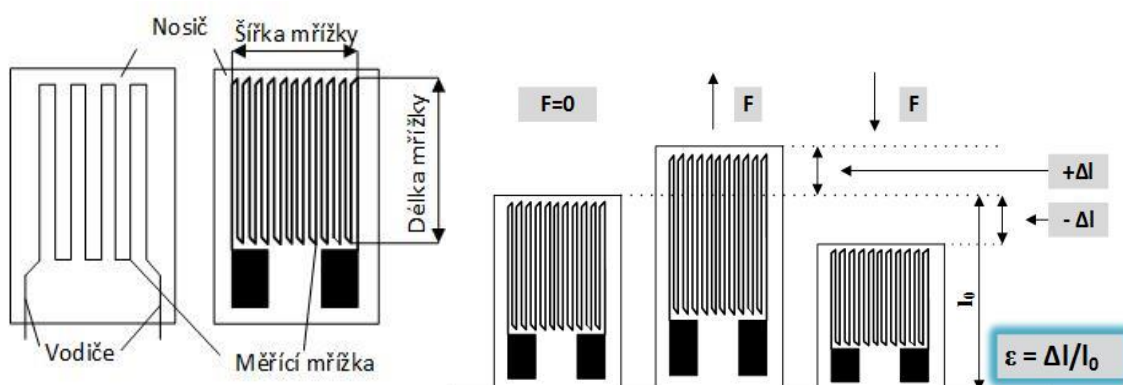
kde:  $\Delta R$  je odpor po deformaci [ $\Omega$ ],  $R$  je odpor před deformací [ $\Omega$ ],  $\varepsilon$  je poměrná deformace [-],  $k$  je k-faktor závisí na použitém materiálu (čím je hodnota vyšší, tím lepší je citlivost snímače).

Při měření elastické (pružné) deformace odporovým tenzometrem, je změna odporu po deformaci velmi mála a normální měřicí přístroje ji nedokáží analyzovat, proto je nutná úprava přes poměr dvou odporů, vztahem pro výpočet neznámého odporu za pomoci známých hodnot, přesných normálů a dekád, ke kterému se v praxi využívá zapojení do tzv. Wheatstoneova můstku. Tenzometry se využívají především na měření síly, ohybu, krutu a tlaku.

### 3.5.2.1 Kovové tenzometry

Odporové tenzometry z vodiče vyrobeného z konstantanu ze slitiny 60 % Cu a 40 % Ni, který má hlavní výhodu v malé závislosti odporu při změnách teploty. Vodič tenzometru má průměr 0,01 mm, který je nalepený na speciálním papíru. Vstupní vodiče jsou spojeny svářením.

Tenzometry fóliové jsou charakteristické vodičem tvořený kovovou fólií tloušťky 0,001 mm. Aktivní vrstva se nanáší ve vakuu na nosnou podložku (nosič).



**Obr. 14:** Odporový, fóliový tenzometr a deformace při zatížení (Wasgestian 2017)

### 3.5.2.2 Polovodičové tenzometry

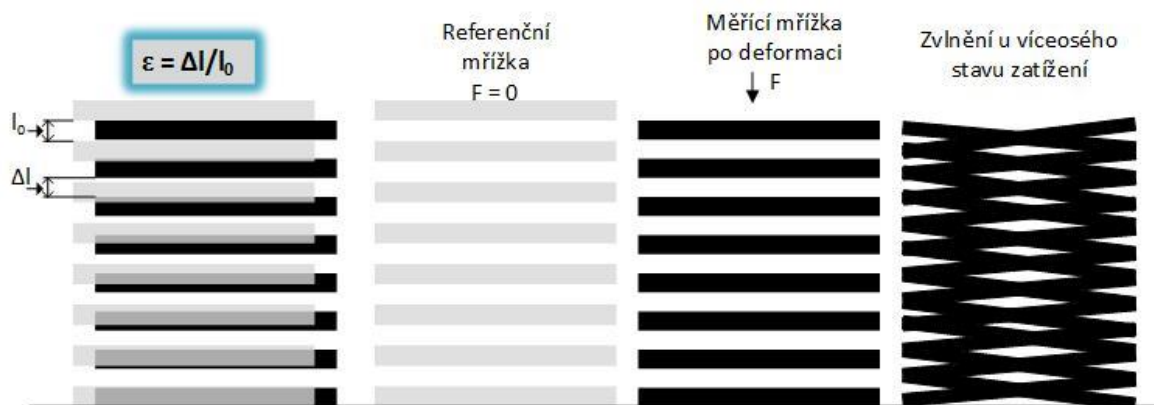
Jsou tvořeny páskem z monokrystalu polovodiče např. křemíku, germania. Princip funkce je obdobný jako u kovových tenzometrů, největší předností je vysoká citlivost 60x větší než u kovových tenzometrů a konstrukčně dosahují velmi malých rozměrů s vysokou tuhostí (délka 2–10 mm, šířka 0,2 – 0,4 mm, tloušťka 0,01 – 0,03 mm).

## 3.6 Moderní optické metody měření deformací

### 3.6.1 Metoda Moiré

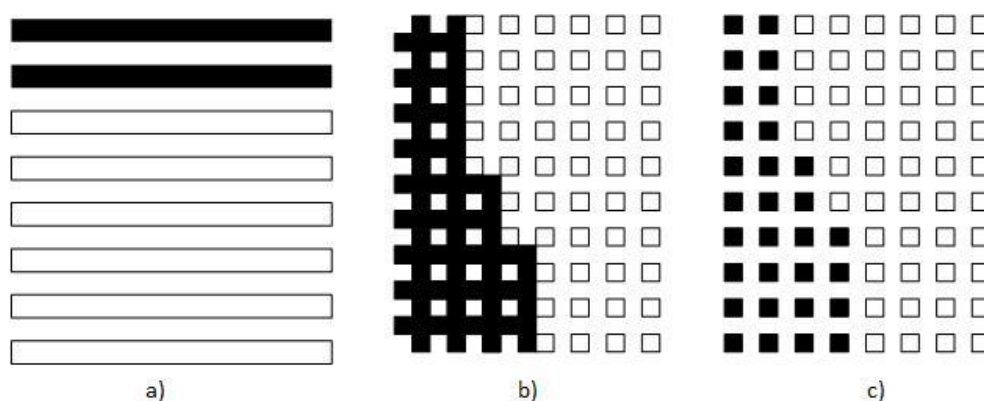
Princip spočívá ve fenoménu překrytí dvou pravidelných geometrických mřížek nebo rastrů v průchozím nebo odraženém světle. Tímto dochází k optické interferenci (vzájemnému ovlivnění), obecně označováno jako „Moirův jev“ a „Moirovo zvlnění“. Příkladem běžného zvlnění jsou postavy v televizi s oblečením s pravidelným geometrickým vzorem (tričko s pruhy) v této situaci se považuje za optický šum. Za jiných okolností se vzory moiré používají pro měření pružných a plastických deformací. Při měření deformací jsou nutné dvě mřížky, jedna mřížka zvaná měřicí nebo modelová, je pevně spojená s povrchem deformovaného materiálu (tělesa). Druhá mřížka, zvaná referenční, se těsně přiloží před mřížku měřicí. Při prosvícení průhledných mřížek po deformaci pozorujeme tmavé a světlé moiré pruhy, hustota a tvar se odvíjí od použitých mřížek např. velikosti rastru (jemnosti) a zatěžovaném materiálu (tělesu), (Xie 2000).

Vznik pravidelných moiré pruhů je nejnázorněji popsáno na prostém působení tlaku, při jednoosém stavu zatížení (Obr. 15). Soustava stejně tlustých čar s pravidelnou roztečí ( $l_0$ ) se nazývá modul (parametr mřížky). Vlivem víceosých stavů zatížení na těleso nebudou vznikat moiré pruhy ale křivky (zvlnění). Pro nás jsou důležité jednoosé napětí, na které se jako obvykle použije obecný Hookeův zákon pro pružné deformace.



**Obr. 15:** Vznik moiré pruhů při jednoosém působení tlaku, zvlnění u víceosého stavu zatížení a názorná poměrná deformace (Ri et al. 2010).

Při využívání metody moiré měření deformací, se používá celá řada motivů mřížek. Nejčastěji se používá mřížka čárová, tvořená stejně širokými tmavými a světlými pruhy. Pro velmi přesné měření se používají mřížky křížové a bodové, lze tím získat i jasnější, ostřejší a užší moiré pruhy (Obr. 16).

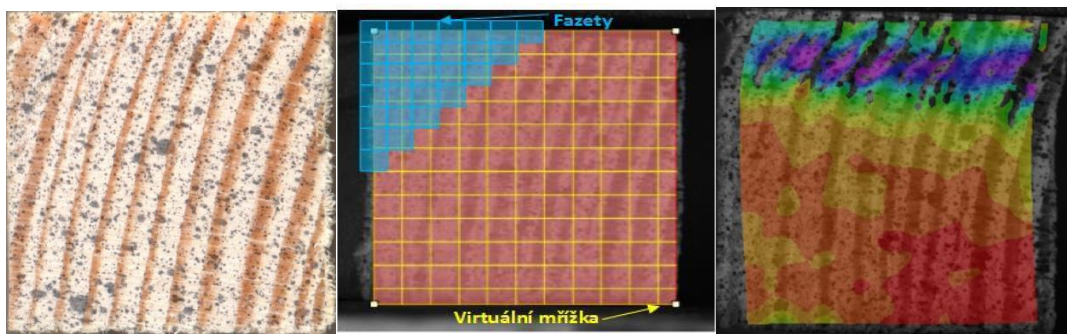


**Obr. 16:** Základní používané mřížky a) čárová, b) křížová, c) bodová (Ri et al. 2010)

Přípevnování mřížek na povrch materiálu před deformací se provádí různě, nejčastěji nalepením hotových mřížek, fotografickou cestou podobně jako při výrobě tištěných spojů, nebo pro náročné plastické deformace přímo výrobou na obráběcích strojích (Ri et al. 2010).

### 3.6.2 Metoda DIC (Digital Image Correlation)

Nejrozšířenější, nejmodernější, a hlavně jednoduše použitelná bezkontaktní metoda měření deformací založená na snímání povrchu deformovaného tělesa (objektu) pomocí systému kamer. Jedná se o optickou metodu měření prostorových poměrných deformací a vektorů posunutí. Metoda je známa už od 80. let 20. století, ale k nejvýznamnějším vylepšením došlo před pár lety. Je to dáno hlavně pokrokem modernizace v oblasti digitalizace (vysoké rozlišení digitálních kamer). V současnosti se jedná o flexibilní metodu, která se využívá v celé řadě odvětví. Největšími přednostmi jsou bezkontaktnost s měřeným objektem, zvolení libovolné oblasti měření včetně míst, kdy nelze s normálními konvenčními metodami měřit (CHEN et al. 2015).

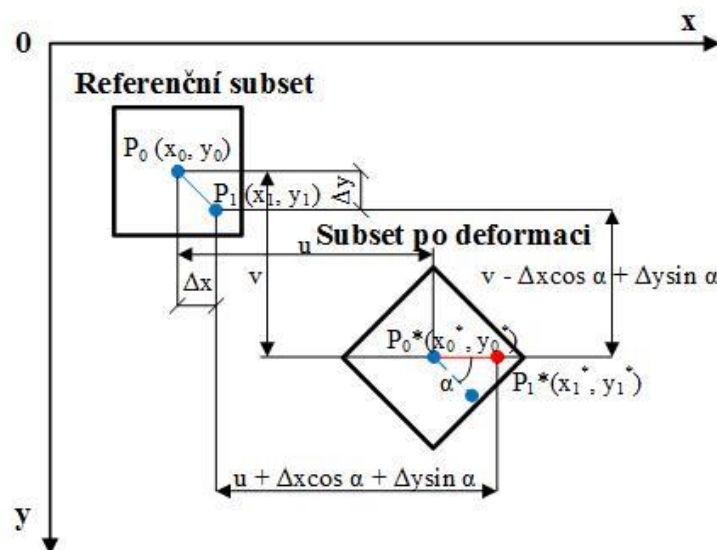


**Obr. 17:** Skvrnitý vzor na povrchu testovaného vzorku smrku (*Picea abies* L.) a grafický typický výstup ze softwaru

Princip spočívá na vyhodnocování změny polohy skvrnitého povrchu (v angl. pixel je jeden základní nejmenší obrazový bod a větší množství těchto bodů vytváří v angl. „speckle pattern“) snímků před a po deformaci zaznamenaný pomocí optických kamer. Skvrnitý povrch se získá nastříkáním přirozené práškové barvy ve spreji, nejlépe černou na bílou. Z toho vyplývá, že po deformaci body (v podobě pixelů v šedotónové škále) změni polohu a program (software) vyhodnotí tyto změny matematickou operací, tzv. korelací. Z těchto skupin pixelů obdržíme vektory posunutí a následně se spočítá poměrná deformace, která je pro software grafickým výsledným výstupem zpracována (viz Obr. 17), (Wu, Qian, Zhang 2016).

Zásady, z nichž vychází digitální korelace obrazu:

- Zkoumaná plocha povrchu vzorku musí být pokryta barevným a náhodným vzorem, který vznikl nastříkáním barvy.
- Diskrétní funkce jednotlivých pixelů reprezentuje úroveň šedi každého pixelu. Velikost těchto pixelů je závislá na rozlišovacích schopnostech digitálních kamer a rozměru sledované oblasti.
- Množiny pixelů jsou nazývány tzv. fazety (subsets) a na těchto fazetách se uskutečňují korelační analýzy, kde je hledán posuv ve dvou na sebe kolmých osách X a Y.
- Na všech fazetách je vždycky stejný počet pixelů.
- Pole posuvu uvnitř každé fazety se předpokládá, že je homogenní.
- Počáteční deformační stav fazety před přetvořením oblasti je popsán diskrétní funkcí  $P_0(x_0, y_0)$  a v procesu přetvoření je mapován na diskrétní funkci  $P_0^*(x_0^*, y_0^*)$ , (Obr. 18), (Janiček a kol., 2013).



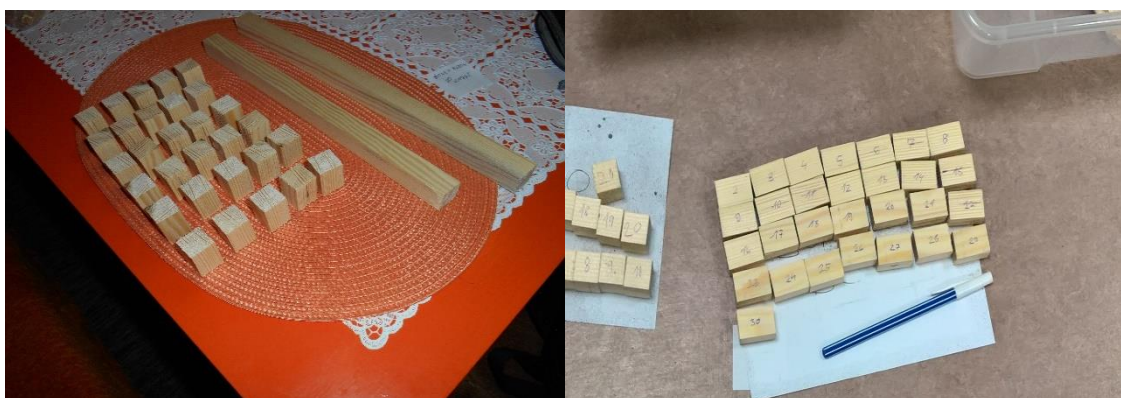
**Obr. 18:** Popis bodů ve fazetě je dán tvarovými funkcemi tzv. disktrétní funkce (Wu, Qian, Zhang 2016)

DIC metoda nám může pomoci změřit modul pružnosti  $E$  při standardních testováních, zejména u jednoosých stavů napjatosti (tlak, tah) a ohybu a zjišťování Poissonových čísel.

## 4 MATERIÁL A METODIKA

### 4.1 Příprava standardních tlakových vzorků

Pro přípravu vzorků jsem použil středové řezivo s minimálním odklonem dřevních vláken ze smrku ztepilého (*Picea abies* L.). Truhlářská fošnová deska o tloušťce přibližně 30 mm a šířce 400 mm a délky 1500 mm, kterou jsem oboustranně ohobloval na truhlářském protahovacím stroji. Poté jsem na formátovací pile hranolky rozmítnul na průřez včetně nadměry 25 x 25 mm a následovalo tloušťkování hranolku na předepsané rozměry vzorků o průřezu 20 x 20 mm. Pomocí zkracovací pily jsem podélné rozměry nakrátil na požadovanou délku 30 mm (Obr. 19).



**Obr. 19:** Připravené vzorky pro standardní tlakovou zkoušku

Pro měření vzorku pro statickou tlakovou analýzu bylo použito 20 kusů, vyrobil jsem 30 kusů a z toho se změřilo 24 kusů, ostatní vzorky vykazovaly poměrně velký odklon vláken, proto byly z měření vyřazeny. Pro správné vysušení na konečnou vlhkost  $w = 12 \%$  dle normy ČSN 49 0103, jsem vzorky vložil do klimatizované komory o relativní vzdušné vlhkosti (RVV) 65 % při teplotě 20 °C v délce 30 dní trvajících sušícího procesu. Ještě před zahájením měření jsem příčnou plochu zkušebních tělísek (sledovanou část) vybrousil na čelní kotoučové brusce, pro dosažení co nejhladšího povrchu, po kterém následovalo nastříkání černé práškové barvy ve spreji pro vytvoření skvrnitého povrchu přibližně ze vzdálenosti 20 cm (Obr. 20), více (kap. 3.6.2).

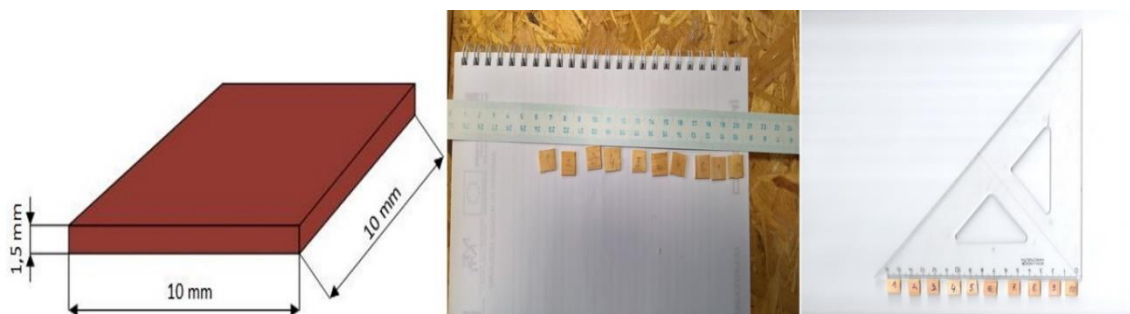




**Obr. 20:** Předepsané rozměry tlakových tělísek dle normy a skvrnitý povrch vytvořený pro snímání DIC

## 4.2 Příprava vzorků letního dřeva

Probíhala ze stejné dřeviny i ve stejné klimatizované komoře více (kap.4.1). Za pomoci dlát (řezbářských) jsem oddělil ze smrkových vzorků části letního dřeva tloušťky přibližně kolem 1,5 mm a snažil jsem se dodržet příčné rozměry 10x10 mm. Pro statistickou analýzu jsem vyrobil 10 kusů. Měření rozměrů probíhalo stejným způsobem jako u standardní tlakové zkoušky, které jsem zapisoval do připravené tabulky. Posuvné měřidlo nezaznamenávalo hodnoty datovým kabelem, ale musel jsem je přímo odečítat z displeje (kap.4.5). Pro přesné určení obsahu plochy jsem použil rovněž program ImageJ (kap.4.3).

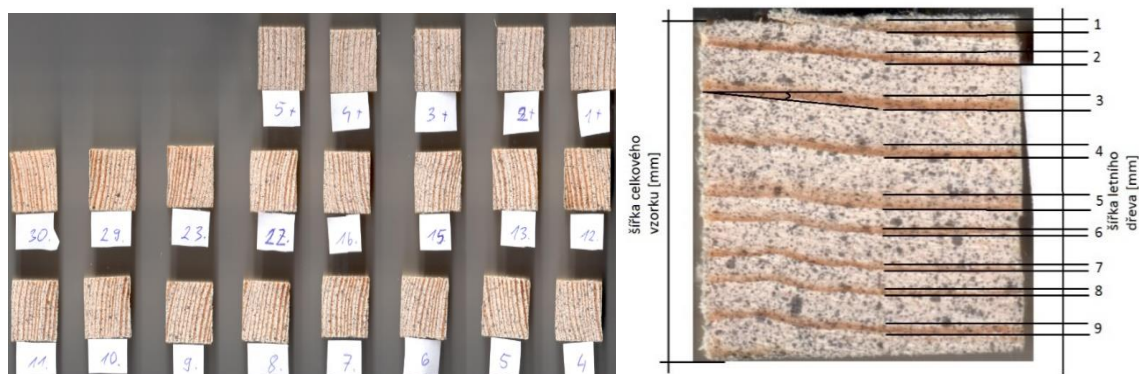


**Obr. 21:** Rozměry vzorku letního dřeva a všech 10 kusů naskenované pro měření obsahu plochy v programu ImageJ



### 4.3 Zjištění podílu letního dřeva

Měření probíhalo za pomoci softwaru ImageJ volně dostupného na internetu. Analyzuje a zpracovává obrazy formátu (\*.TIFF), (\*.PNG), (\*.GIF), (\*.JPEG), (\*.BMP), (\*.DICOM), (\*.FITS), napsán v jazyce Java. Podporuje standardní zpracování obrazu, ze kterých jsou pro mě důležité funkce práce s pixely, měření vzdáleností a úhlů. Nejprve jsem si všechny vzorky naskenoval na skeneru (1 200 DPI, pro dokonalou kvalitu fotky). A hlavně v důsledku skenování docílím kolmosti a přesnosti k příčným řezům vzorků, než pouhým vyfocením digitálním fotoaparátem.



**Obr. 22:** Naskenované vzorky a měření letních vrstev dřeva

V programu ImageJ jsem si v nastavení zvolení měřítka (*set scale*) označil celkovou šířku vzorku, která je ve výchozí jednotce obrazu v pixelech a k této hodnotě přiřadil známou vzdálenost v milimetrech, tím jsem dosáhl toho, aby program pracoval v milimetrech. U každého letního dřeva jsem změřil šířku (Obr. 22) a součet těchto šířek vložil do známého vztahu (14).

Průměrné procento letního dřeva lze spočítat následujícím vzorcem:

$$\emptyset L. d. = \left( \frac{\sum dx}{l} \right) \cdot 100 [\%] \quad (14)$$

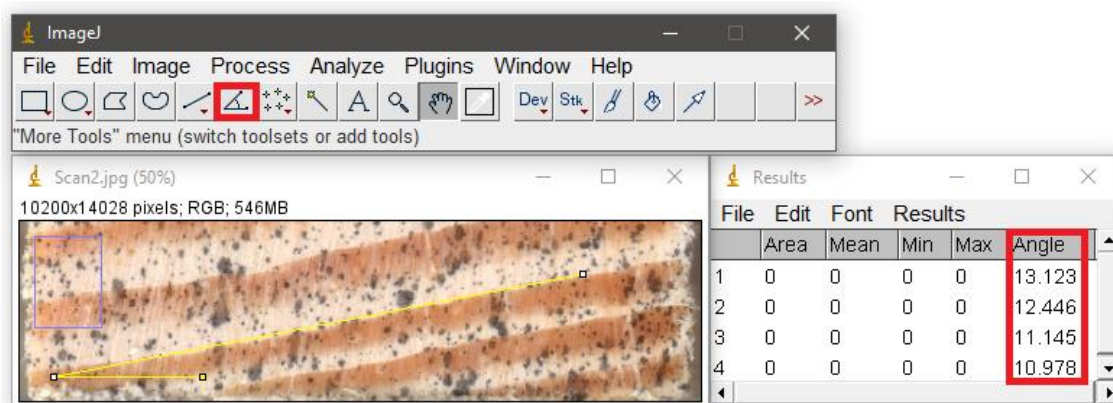
kde:  $\emptyset L. d.$  – průměrné procento letního dřeva

$\sum dx$  – součet šířek letního dřeva

$l$  – celková šířka vzorku (tělíska)

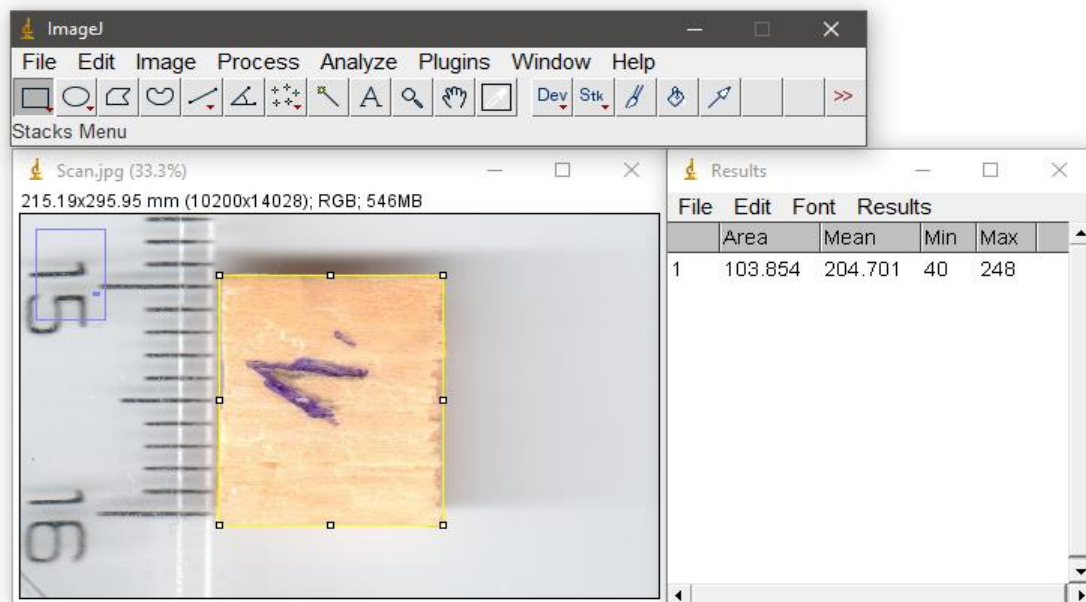
#### 4.4 Měření odklonu vláken a plochy letního dřeva

Měření probíhalo za pomoci funkce ANGLE v programu ImageJ (Obr. 23), kterou jsem změřil úhel odklonu na čtyřech letních vrstvách dřeva v různých částech (na horním, dolním okraji a uprostřed vzorku), které jsem zprůměroval pro přesnější hodnotu.



Obr. 23: Stanovení úhlu odklonu letního dřeva v softwaru ImageJ

Pro měření plochy letních vzorků bylo rovněž nutné použít totožný software (Obr. 24). Pro přesně změření plochy všech letních vzorků, kterou jsem potřeboval pro vztah (1) pro výpočet hodnot napětí.



Obr. 24: Měření plochy letního dřeva v softwaru ImageJ

#### 4.5 Standardní tlaková zkouška v tangenciálním směru

Hlavní náplní této bakalářské práce bylo měření vzorků tlakovou zkouškou v tangenciálním směru, která byla obohacena o současně probíhající snímání technologií DIC (kap. 4.7). Před mechanickým zkoušením jsem musel každý vzorek přesně změřit digitálním posuvným měřidlem Mitutoyo s přesností 0,001 mm, který je připojen datovým kabelem k testovacímu programu v počítači. Pro vážení zkušebních vzorků byly použity digitální analytické váhy Scaltec SBC 41 s přesností 0,001 g. Software TestXpert tyto údaje vyhodnotí a vloží do tabulky. Dopočítá ze vstupních rozměrů včetně hmotností tělísek hustotu. Hmotnost jsem manuálně vypsát do tabulky. Propojení posuvného měřidla s počítačem značně urychlí dobu experimentu. Univerzální zkušební stroj ZWICK Z050 s horním posuvem příčnicku (Obr. 26). Technické parametry – maximální zkušební síla 50 kN (pro představu 5 tun), rychlost příčnicku  $v = 0,001$  až 500 mm/min, komunikační rozhraní sériové. Popis – skládá se ze dvou čelistí pro měření tlaku, tahu a ohybu, je připojen na počítač, na kterém je software TestXpert. V5.01, sloužící pro celkové nastavení řízení posuvu příčnicku.

Zkušební tělísko jsem umístil v požadovaném směru testování do středové pevné části čelisti, pro přesnost vymezenou lepící páskou více (Obr. 26). V panelu v softwaru TestXpert stisknu FORCE pro vynulování síly z předchozího měření, LE pozice příčnicku, který se vrátí po zkoušce na stejné místo. Po stisknutí tlačítka START posuvný příčnick nejprve předzatíží zkušební tělísko a po potvrzení tlačítka OK v dialogu proběhne samotná tlaková zkouška. Průběh pozoruji na obrazovce počítače v podobě pracovního diagramu napětí a poměrné deformace, který při rychlosti zatěžování 1,5 mm/min trvá přibližně 60 sekund. Zkoušku ukončím ikonou STOP po dosažení maximálního napětí, které se začne snižovat, za mezí pevnosti. Výstupem jsou data pro vytvoření pracovních diagramů v textovém souboru (\*.TXT), které software TestXpert zaznamenal v průběhu zkoušky. Data jsem zpracoval přehledně v tabulkovém editoru Microsoft Excel, kde jsou zjišťovány meze pevnosti, úměrnosti, a hlavně moduly pružnosti (kap. 5.3.1).

## 4.6 Tlaková zkouška letního dřeva

Elektromechanický zkušební stroj materiálů od firmy Tinius Olsen (Švýcarská firma patřící mezi nejstarší firmy, které se zabývají zkušebními zařízeními na testování materiálových vlastností). Technické parametry jsou následující: přístroj je vhodný pro měření nejmenších zkušebních vzorků, maximální síla 5 kN, posuv příčnicku 0,001 – 1000 mm/min, klima komora, ve které je možnost řídit atmosféru, teploty od -20 do 120 °C a vlhkost od 0 do 100 %, software Tinius Olsen Horizon



**Obr. 25:** Elektromechanický zkušební stroj Tinius Olsen, 1. zkušební čelisti, 2. klima komora (lze simulovat prostředí), 3. software Tinius Olsen Horizon, 4. velikost zkušebních vzorků vzhledem k čelistem

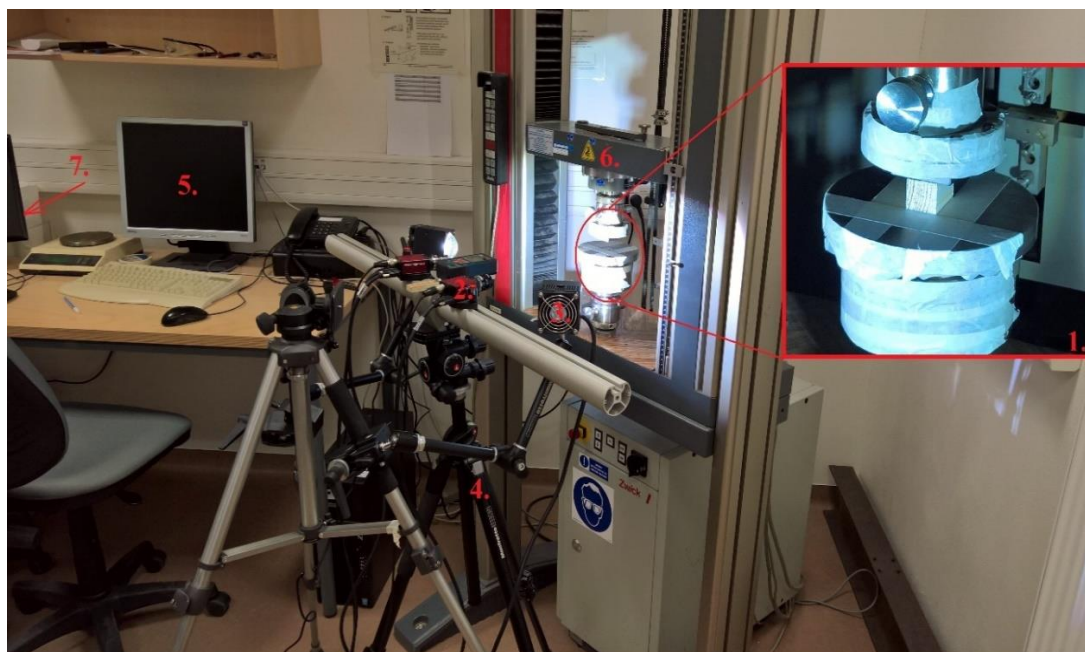
Samotná zkouška probíhá tak, že si vložíím připravené letní dřevo mezi čelisti zkušebního stroje přesně doprostřed (Obr. 25). Zde nefunguje automatické předzatížení vzorku jako u ZWICK 050, z toho důvodu musím manuálně pomocí softwaru horní čelist posunout do pozice co nejbližší ke vzorku. Poté jsem vypsál název souboru, do kterého program uloží data, vynuloval sílu a pozici příčnicku na výchozí polohu, ve které bude zahájena zkouška. Zahájení zkoušky jsem provedl stisknutím tlačítka START při posuvu 0,5 mm/min a délce trvání přibližně 2 minuty. Ukončení zkoušky je nastaveno automaticky při dosažení síly 1000 N (což je přibližně 100 Kg). Výstupem jsou rovněž data, které zpracuji stejným způsobem jako u standardní tlakové zkoušky (kap. 4.5) a statisticky zhodnotím (kap. 5.3.2).



#### 4.7 Měření pomocí nekontaktní metody korelace digitálního obrazu (DIC)

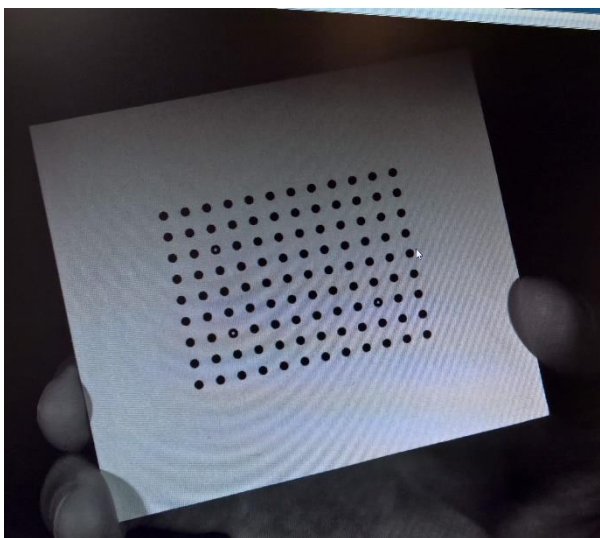
Technické údaje aparatury pro optické měření deformací jsou následující – kamery: 2x CCD AVT 5Mpx Firewire, C-mount, objektivy: 2x Schneider Xenoplan 2.8/50mm Compact, 2x Pentax 25mm Fix focal lens, software: Vic-Snap pro akvizici snímků, Vic-2D pro analýzu deformací ve 2D, Vic-3D pro analýzu posuvů a deformací ve 3D, kalibrační terče: 3mm, 4mm, 5,5mm, 12mm, 15mm, 19mm, 25mm, PC Desktop: čtyřjádrový procesor INTEL Core i5, 3,3 GHz, 8GB RAM, Windows 7 Home Premium 64-bit, LCD monitor 19", stativ pro osvětlení: Flood light tripod, Manfrotto Nano, stativ na kamery Manfrotto Tripod 055XPROB, DAQ a trigger DAQ-T8/DAQ-T4D (GigE-version) pro měření harmonických a dynamických periodických dějů do 20kHz.

Vzorek jsem vložil mezi čelisti stroje ZWICK (Obr. 26) s unikátním barevným vzorem (skvrnitý povrch) na sledované části, která je snímána pomocí dvou kamer pro následný výpočet pomocí 3D varianty DIC. Set obsahuje i dostatečné osvětlení v podobě dvou vzduchem chlazených LED lamp. Pro přesnost měření a fixaci jsou kamery a lampy uchyceny na stativu. Celý stereoskopický systém kamer je umístěn horizontálně naproti vzorku přibližně 400 mm.



**Obr. 26:** Měřicí aparatura při měření tlakovou zkouškou na stroji ZWICK Z050 při současném snímání pomocí DIC (1. zkušební čelisti, 2. kamery, 3. LED lampy, 4. stativ, 5. PC pro záznam mechanické zkoušky, 6. pohyblivý příčník zkušebního stroje, 7. PC pro záznam optického snímání DIC)

Soustavu kamer je nutné před zahájením měření vycentrovat na stativu, tak aby obě kamery zachycovaly přesně střed sledovaného vzorku. Dále se provede kalibrace kamer za pomoci kalibračních terčů s plochou černých bodů s roztečí 5,5 mm. Kamery nasnímají kalibrační terč pod určitým úhlem a otočením (Obr. 27) a vytvoří řadu snímků, které software Vic-3D mezi sebou porovnává a analyzuje. Výsledkem kalibrace jsou přesné parametry vzdálenosti kamer mezi sebou a perspektivy obou kamer.



**Obr. 27:** Kalibrační terč

Samotné měření vzorků může být zahájeno pouze po těchto nutných optických nastaveních. Vložený vzorek mezi čelistmi stroje ZWICK se nejprve předzatíží a poté je nutné synchronizovat spuštění statické a DIC zkoušky zároveň. Měření je ukončeno stejným způsobem, jako v předchozí kapitole. Tento postup se opakuje pro všechny vzorky.

#### 4.8 Analýza délky vlivu extenzometru

Analýza probíhala v programu Vic-3D, kde se na průřez deformovaného tělíska vložil pomocí nástroje *Inspector tools* virtuální extenzometr. Cílem je prokázat, že s délkou extenzometrů se mění deformace a najít konstantní deformaci ze šesti použitých extenzometrů, která bude konvergovat k určité hodnotě (kap. 5.2). Tato hodnota délky extenzometru bude poté použita v dalších analýzách.

#### 4.9 Výpočet modulu pružnosti v jarním a letním dřevě na základě podélného Voigtova modelu deformace kompozitu

Na základě uvedeného Voigtova modelu (viz rovnice 11) lze vypočítat celkový a dílčí moduly pružnosti. Zde uvádím příklad výpočtu modulu pružnosti  $E_{LD}$  a  $E_{JD}$ . Pro globální modul pružnosti jsem použil hodnotu modulu pružnosti změřenou metodou DIC, která je mnohem přesnější než ta změřená klasickým přičínkem. Do směšovací rovnice (11) dosadím hodnoty prvního změřeného vzorku:

$$697,60 = E_{LD} \cdot 0,4544 + \frac{E_{LD}}{2} \cdot (1 - 0,4544) \quad (15)$$

Vztah (15) předpokládá, že modul pružnosti jarního dřeva je přibližně poloviční než  $E_{LD}$ , jak uvádí (Kyzioł 2016).

$$697,60 = E_{LD} \cdot 0,4544 + E_{LD} \cdot 0,2728 \quad (16)$$

$$697,60 = 0,7272 \cdot E_{LD}$$

$$E_{LD} = 959,30 [MPa] \Rightarrow E_{JD} = \frac{E_{LD}}{2} = \frac{959,30}{2} = 479,65 [MPa]$$

#### 4.9.1 Faktor trhačky

Vyjadřuje, jaký vliv má příčnick na přesnost změřených hodnot. Znamená to, že naměřená hodnota je v mém případě 1,38krát menší než skutečná. Celý postup opakuji pro všech 24 změřených vzorků.

$$F.T. = \frac{E_{LD}}{E_C} \quad (17)$$

$$F.T. = \frac{959,30}{697,60} = 1,38$$

kde:  $E_{LD}$  modul pružnosti letního dřeva [MPa],  $E_C$  modul pružnosti celkový [MPa]

#### 4.10 Metoda zpracování naměřených dat (statistická analýza)

Pro vyhodnocení naměřených dat jsem použil software Vic SNAP 2010 pro záznam snímků, software Vic-3D 2010 pro zpracování a výpočet deformací. Pro zpracování statistické části Microsoft Office Excel 2016 (tabulkový procesor), STATISTICA 12 CZ profesionální program pro statistickou analýzu dat.



## 5 VÝSLEDKY A DISKUSE

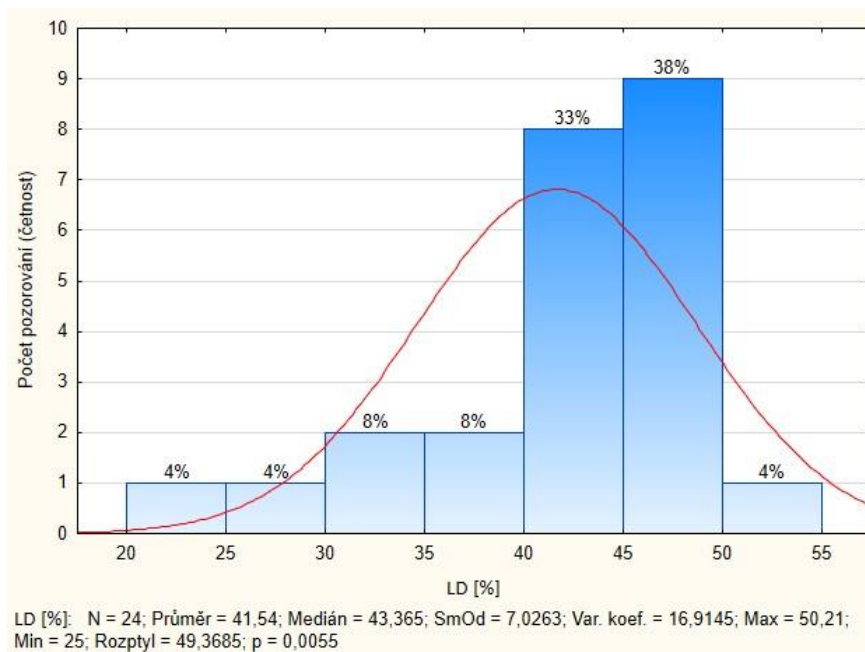
Kapitola charakterizuje nejdůležitější výsledky získané experimentálním měřením, které jsou přehledně zpracovány a vyhodnoceny do pracovních diagramů, tabulek, obrázků a krabicových grafů. Dále diskutují jednotlivé rozdíly mezi získanými hodnotami a snažím se je rozumně zdůvodnit.

### 5.1 Podíl letního dřeva a odklon vláken

Z histogramu (Obr. 28.) zřetelně vidíme průměrnou hodnotu 41,54 procent letního dřeva ze 24 vzorků. S procentuálním zvyšováním letní dřeva, které má větší hustotu se tuhost celkového vzorku zlepšuje, přičemž to ovlivňuje pevnost dřeva. Závislost je prokázána v (Tab. 8 na straně 38) s přijatelným koeficientem korelace o hodnotě 0,29. Nejvyšší četností letního dřeva představuje 9 případů 38 % z celkových vzorků, které se pohybují v rozsahu mezi 45 až 50 % objemu. U jehličnatých dřevin s rostoucí šířkou letokruhu roste procentuální zastoupení jarního dřeva, což je v souladu s Požgaj et al. (1997). Ze znalosti stavby dřeva známe, že letní dřevo bývá obvykle užší než jarní a výsledný histogram to potvrzuje. Když známe procentuální podíl letního dřeva, tak hodnotu jarního dřeva získáme dopočtem do 100 %.

**Tab. 4:** Stanovení procenta letního dřeva a úhlu odklonu letního dřeva na vzorku 24

Počet	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
š. l.d. [mm]	0,72	0,64	0,68	0,61	0,96	0,53	0,43	0,43	0,34
š. c. v. [mm]	20,2								
$\alpha$ [°]	5,02	5,21	6,63	5,23	Průměr	5,5			
LD [%]	<b>26,44</b>								
š. l. d. je šířka letního dřeva, š. c. v. Je šířka celého vzorku (tělíska), $\alpha$ je úhel odklonů letního dřeva, %LD je procentuální zastoupení letního dřeva									



**Obr. 28:** Histogram četnosti letního a jarního dřeva včetně popisné statistiky

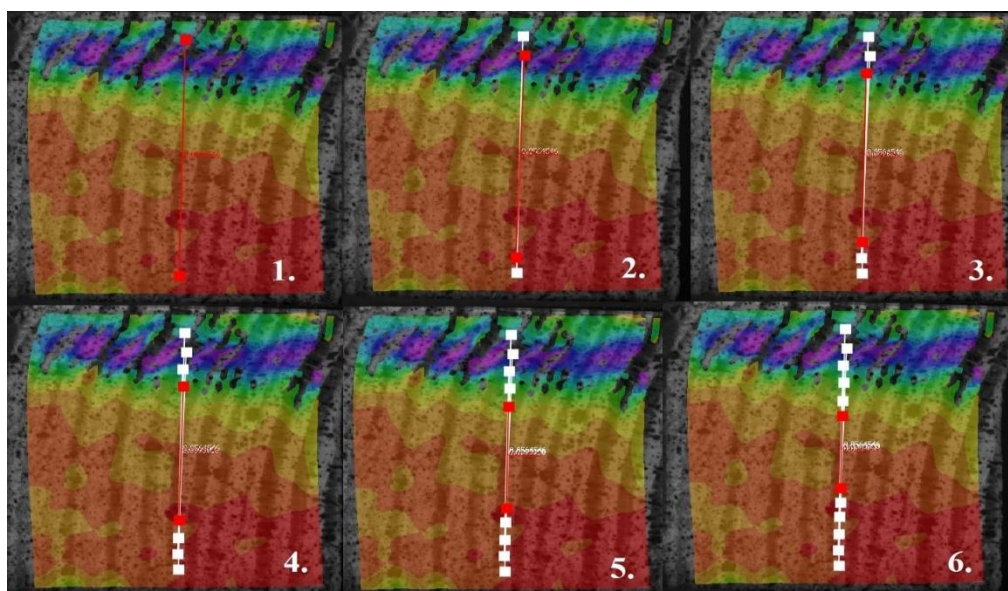
Zjištění podílu letního a jarního dřeva je zapotřebí pro výpočet modulu pružnosti v jarním a letním dřevě na základě podélného Voigtova modelu deformace kompozitu (kap. 4.9). Odklon letokruhů všeobecně snižuje pevnost a moduly pružnosti. Korelační analýza mezi odklonem vláken a pevností dřeva udává korelační koeficient hodnotu  $-0,03$ , prokazatelnější korelace by se měla pohybovat kolem  $-0,6$ , ale vzhledem k tomu, že jsem neměl velké odklony na vzorcích, tak korelační koeficient zůstává menší. Pro ideální vzorky měřené v tangenciálním směru by se měl odklon vláken pohybovat přibližně  $0$  až  $5^\circ$ . V mém případě měřené vzorky vykazovaly průměrně  $9,65^\circ$  (Tab.5) a při dalším zvyšování odklonu dochází ke snížení modulu pružnosti. Experimentálně toto zjistil Garab (2010), který stanovil že poklesne-li úhel odklonů o  $15^\circ$ , má to za následek snížení modulu pružnosti o  $17,6\%$ .

**Tab. 5:** Popisná statistika odklonu vláken

Průměr	Medián	Min.	Max.	Rozptyl	Sm. odch.	Var. Koef.	P hodnota
9,65	10,55	1,7	16,5	13,7	3,7	38,4	0,3200
P hodnota – statistická hodnota pro testování hypotéz							

## 5.2 Analýza délky vlivu extenzometru

Pro přesnost měření jsem zvolil šest virtuálních extenzometrů v jedné vertikální ose pro stanovení přesné deformace (Obr. 29). Protože v horní části vzorku dochází k velkým plastickým deformacím a první extenzometr (nejdelší) vlivem těchto deformací neproказuje skutečnou deformaci tělíska více (Tab. 6).



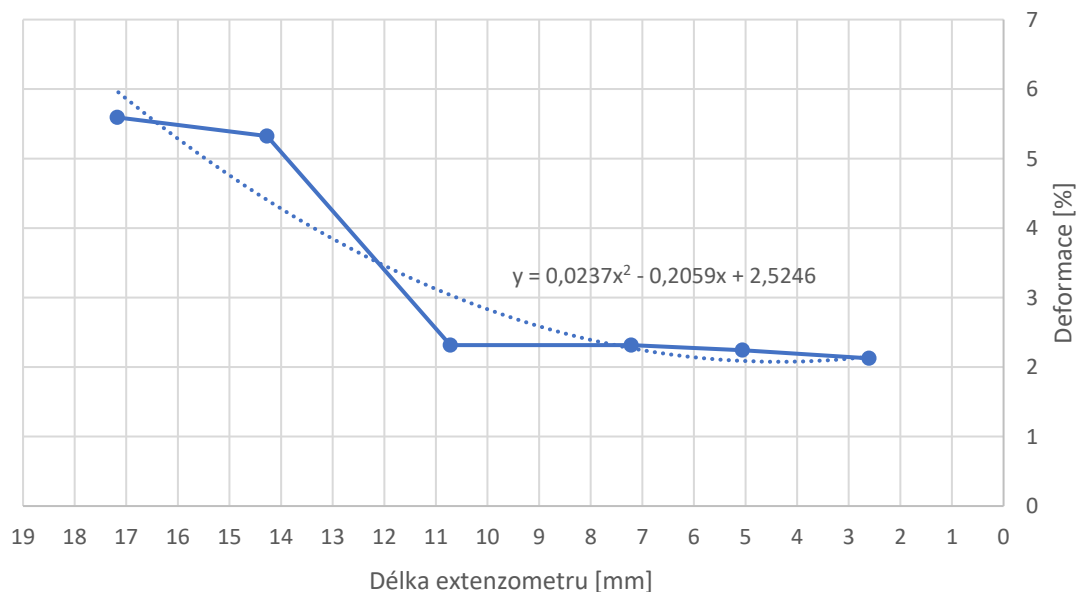
**Obr. 29:** Uspořádání extenzometrů na průřezu vzorku (daný extenzometr je zobrazen červenou barvou)

**Tab. 6:** Hodnoty z virtuálních extenzometrů

Č.	$D_{0xx}$ [mm]	$D_{1yy}$ [mm]	$\varepsilon_{yy}$ [%]
1.	18,190	17,173	5,592
2.	15,075	14,272	5,324
3.	11,001	10,720	2,316
4.	7,386	7,215	2,316
5.	5,175	5,059	2,243
6.	2,661	2,605	2,126

Č. je číslo extenzometru,  $D_{0xx}$  je horizontální souřadnice (šířka extenzometru) [mm],  $D_{1yy}$  je vertikální souřadnice (délka extenzometru) [mm],  $\varepsilon_{yy}$  je deformace [%]

Z Tab. 6 lze vidět, že horizontální souřadnice osy X se nemění, protože v tomto směru nedochází k deformacím a vertikální souřadnice klesají, následkem je stlačování tělíska v souřadnicích osy Y.



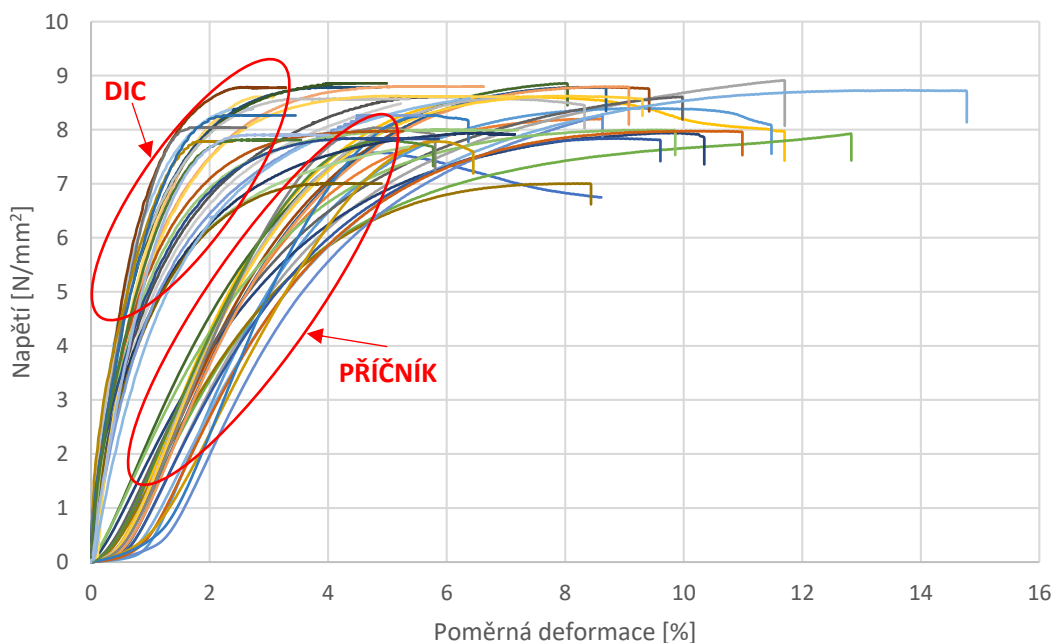
**Obr. 30:** Graf zobrazující vliv délky extenzometru na velikost deformace

Při délce extenzometru 2,605 až 10,720 mm dle (Obr. 30) se hodnota deformace nemění a můžeme jí považovat za konstantní. Ze šesti maximálních hodnot z dat extenzometru jsou z toho čtyři hodnoty konvergující k hodnotě cca 2,126 % deformace, kde nedošlo k výrazným změnám (neobsahují kontaktní zóny plastických deformací) a proto můžeme považovat tyto délky za správné.

### 5.3 Tlaková zkouška

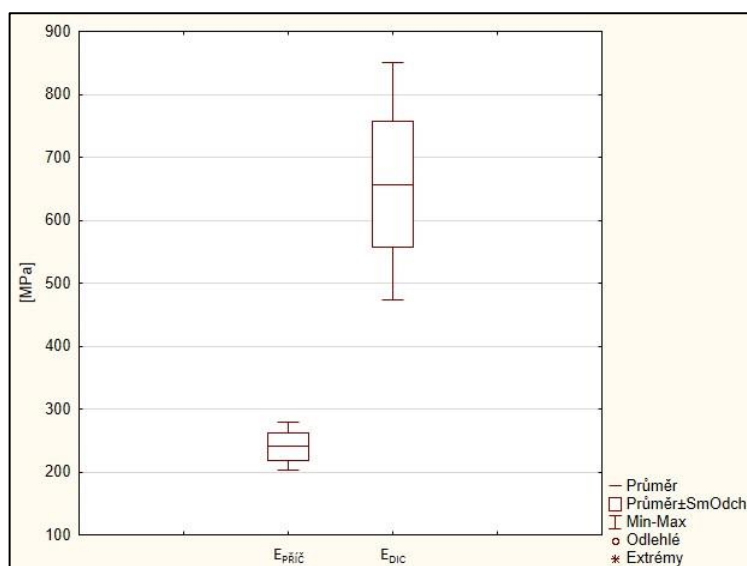
#### 5.3.1 Zatížení celých vzorků v tangenciálním směru

Hlavním úkolem tlakové zkoušky bylo zjistit moduly pružnosti celých vzorků (myšleno jako celek letní a jarní dřeva) kontaktní a nekontaktní metodou snímání deformace. Z pracovních diagramů (Obr. 31) je pozorovatelná rozdílnost v přesnosti měření obou dvou metod, strmější část na levé straně reprezentuje měření pomocí DIC metody, pravá strana reprezentuje měření příčnickem.



**Obr. 31:** Pracovní diagramy tlaku v tangenciálním směru všech vzorků měřené metodou DIC a příčnickem

Průměrná hodnota modulu pružnosti měřená příčnickem je 240,45 MPa. Od metody DIC s velkým rozptylem 10 007 se odlišuje o více než 416 MPa, což značí velkou variabilitu mezi metodami měření (Tab. 7). Příčnick má určité vřle v mechanických kontaktech celého systému (uložení příčnicku, pojezdy), které způsobují velké deformace a následně i nízký modul pružnosti (Obr. 32). Pro zamezení nepřesnosti příčnicku se ve většině případu používá extenzometr, který měří přesně. Ale v případě měření tělísek nebylo možné zařízení upevnit na sledovanou oblast vzhledem k malým rozměrům zkušebních tělísek napříč vláken, proto se pro přesnost zvolila metoda DIC, s kterou jsem experimentálně zjistil celkový modul pružnosti o průměrné hodnotě 656,46 MPa.



**Obr. 32:** Krabicový graf modulu pružnosti – variabilita mezi metodami měření

**Tab. 7:** Popisná statistika standardních vzorků

Proměnná	Průměr	Medián	Min.	Max.	Rozptyl	Sm.odch.	Var.koef.
$E_{PŘÍČ}$ [MPa]	240,45	241,33	203,72	278,68	467,00	21,61	8,99
$E_{DIC}$ [MPa]	656,46	658,20	472,51	851,19	10007,00	100,04	15,24
$\sigma_{max.}$ [MPa]	8,28	8,26	7,01	8,91	0,22	0,47	5,67
$\epsilon_u$ [%]	1,91	1,91	1,18	2,79	0,16	0,41	21,22
$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	543,71	545,50	457,00	587,00	1734,74	41,65	7,66

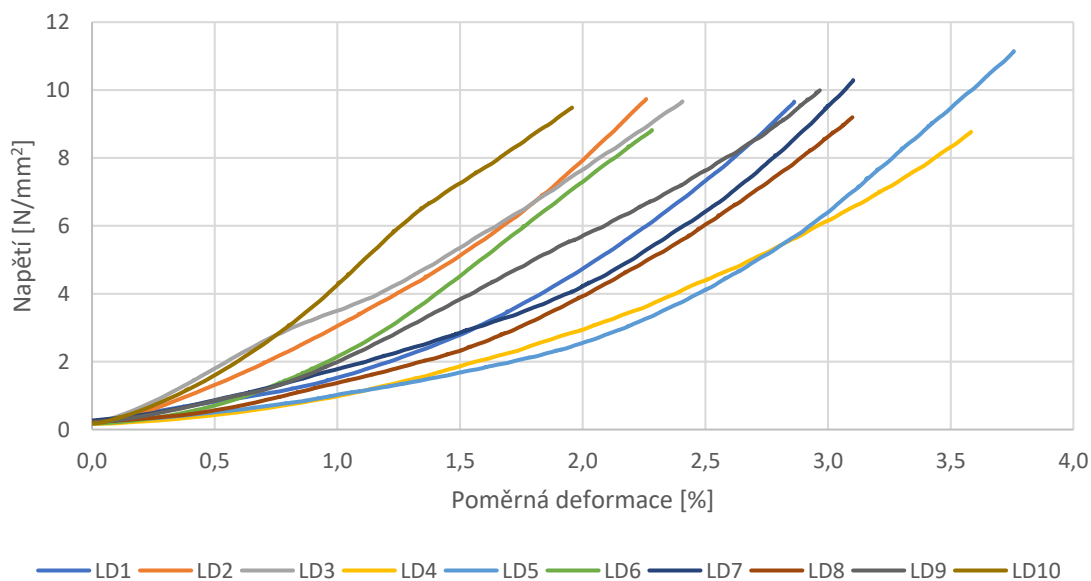
Korelační analýza určuje závislosti mezi proměnnými více (Tab. 8). Nejdůležitější jsou korelace mezi modulem pružnosti a odklonem vláken a mezi pevností. Pozitivní korelace jsou mezi moduly pružnosti a pevností s korelačním koeficientem 0,46 až 0,55. Procentuálním podílem letního dřeva má mít dle Požgaj et al (1997) také pozitivní vliv, ale hodnota  $r = -0,07$  neprokazuje tuto závislost. Negativně jsou ovlivněny hlavně odklonem vláken s reprezentujícím  $r = -0,35$  až  $-0,36$ . Hustota by měla mít vliv na modul pružnosti dle odborné literatury, ale v mém případě  $r = 0,06$  až  $0,14$  dokazuje pouze mírnou závislost.

**Tab. 8:** Korelační koeficienty

	r>=										
	-1	-0.80	-0.60	-0.40	-0.20	0	0.20	0.40	0.60	0.80	1
Proměnná	$E_{PŘÍČ}$ [MPa]	$E_{DIC}$ [MPa]	LD [%]	$\sigma_{max.}$ [MPa]	$\epsilon_u$ [%]	$\alpha$ [°]					
$E_{PŘÍČ}$ [MPa]	1,000000	0,944280	-0,070446	0,462837	0,022475	-0,363253					
$E_{DIC}$ [MPa]	0,944280	1,000000	0,068012	0,555352	-0,066232	-0,357154					
LD [%]	-0,070446	0,068012	1,000000	0,294563	-0,577581	0,459693					
$\sigma_{max.}$ [MPa]	0,462837	0,555352	0,294563	1,000000	-0,078205	-0,035786					
$\epsilon_u$ [%]	0,022475	-0,066232	-0,577581	-0,078205	1,000000	-0,431700					
$\alpha$ [°]	-0,363253	-0,357154	0,459693	-0,035786	-0,431700	1,000000					
$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	0,058860	0,148633	0,689481	0,554037	-0,560055	0,607689					

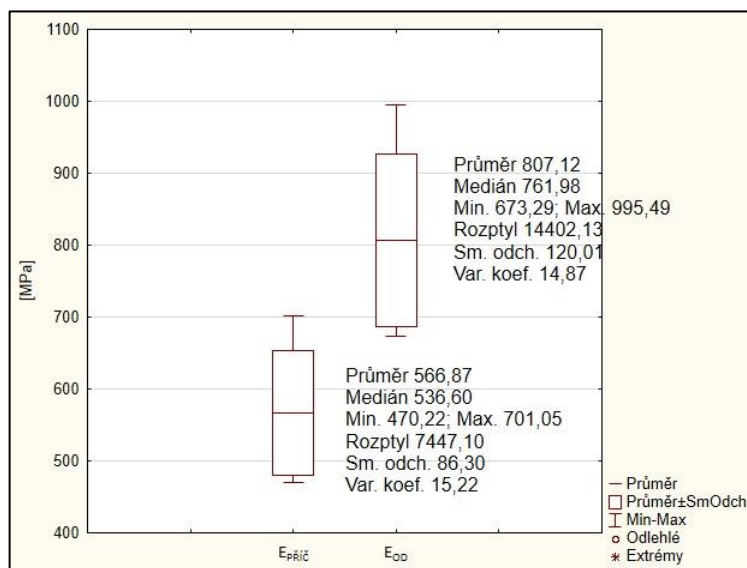
### 5.3.2 Letní dřevo

Průběh závislosti napětí na deformaci pro tělíska letního dřeva v tlaku uvádí Obr. 33. Všechny vzorky jsou zatěžovány na maximální sílu 1000 N, aby nedošlo přetížení zatěžovacího stroje. Vzhledem k tomu není pozorovatelné porušení na mezi pevnosti ale pouze elastická část. Je to způsobeno také tím, že vzorky mají malé tloušťky od 1,1 až 1,6 mm, viz Tab 9.



**Obr. 33:** Pracovní diagram tlaku destiček z letního dřeva o ploše 10x10 mm

Náplní tohoto experimentu letního dřeva bylo důležité z lineárních částí křivek určit moduly pružnosti letního dřeva. A následně dopočítat odvozený modul letního dřeva  $E_{OD}$  pomocí Voigtova modelu (Obr. 34).



**Obr. 34:** Krabicový graf modulu pružnosti – variabilita mezi experimentálně změřeného a odvozeného modulu pružnosti

Průměrná hodnota odvozeného modulu pružnosti je 807,12 MPa, která je větší oproti příčniku o 240,25 MPa. Je to způsobeno faktorem trhačky, který zohledňuje nepřesnosti v mechanických částí příčniku. Pro výpočet odvozeného modulu pružnosti letního dřeva je zapotřebí znát faktor trhačky (více kap. 4.9.1), který jsem vypočítal z materiálových vlastností dřeviny smrku. Dřevina je pořád stejná, takže globální modul pružnosti bude také shodný. V tomto případě můžu použít průměrný faktor trhačky zjištěný ze známého vztahu (17). Modul pružnosti letního dřeva experimentálně zjištěný se vynásobí faktorem trhačky a získám odvozený modul pružnosti letního dřeva, který by se měl přibližovat (shodovat) k modulu pružnosti letního dřeva vypočítaným na základě Voigtova modelu, směšovací vztah (11).

**Tab. 9:** Tabulka výsledků měření vzorků letního dřeva

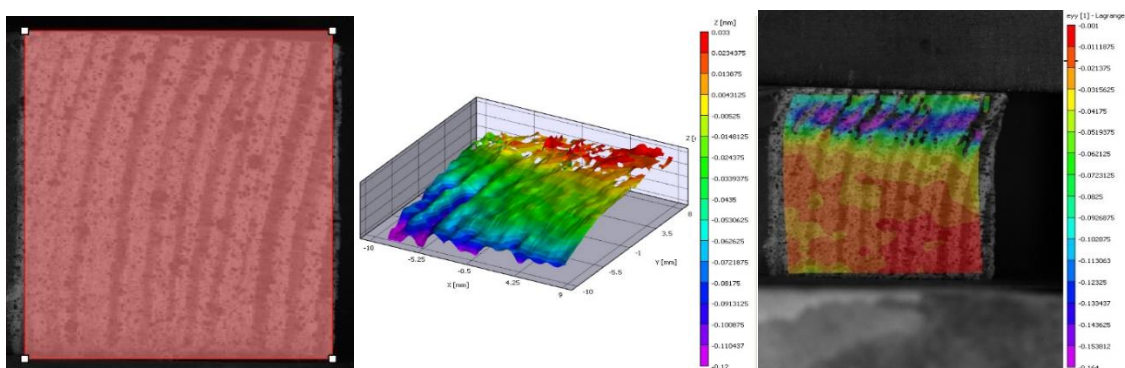
Vzorek	$b$ [mm]	$S$ [mm <sup>2</sup> ]	$m$ [g]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$E_{PŘÍČ}$ [MPa]	$E_{OD}$ [MPa]
1.	1,10	103,82	0,089	779	657,52	933,68
2.	1,26	103,21	0,094	723	666,30	946,15
3.	1,35	103,82	0,091	649	474,15	673,29
4.	1,31	114,32	0,093	621	470,22	689,40
5.	1,40	90,10	0,077	611	618,73	878,60
6.	1,28	113,89	0,087	597	542,73	770,68
7.	1,37	97,477	0,081	607	701,05	995,49
8.	1,61	108,76	0,095	543	530,47	753,27
9.	1,55	100,16	0,089	573	518,16	735,79
10.	1,42	105,74	0,095	633	489,36	694,89
<b>Průměr</b>	<b>1,37</b>	<b>104,13</b>	<b>0,089</b>	<b>633,60</b>	<b>566,87</b>	<b>807,12</b>
<b>Směr. Od.</b>	<b>0,145</b>	<b>7,311</b>	<b>0,006</b>	<b>69,895</b>	<b>86,297</b>	<b>112,00</b>
<b>Var. Koef.</b>	<b>10,651</b>	<b>7,021</b>	<b>6,785</b>	<b>11,031</b>	<b>15,223</b>	<b>14,869</b>
Vlhkost vzorků při 12 %						
$E_{OD}$ je odvozený modul pružnosti letního dřeva zjištěný z experimentálně změřeného modulu pružnosti $E_{PŘÍČ}$						



## 5.4 Optické měření deformací

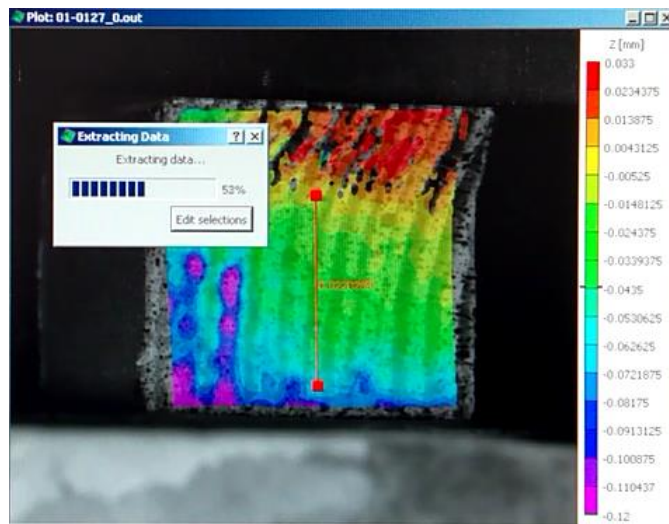
### 5.4.1 Výstup dat z DIC a načtení do softwaru Vic-3D

Kamerový systém získal ze všech změřených vzorků snímky ve formátu s koncovkou (\*.TIF). Tyto snímky a kalibrační soubor kamer jsem načel v programu Vic-3D, jednotlivě pro každý měřený vzorek zvlášť (kalibrační soubor načítám první a poté snímky). Velikost subsetu byla na základě předešlých zkušeností s podobným paternem zvolena na hodnotu 35 a velikost kroku (step) 4 pixely. V programu jsem manuálně označil sledovanou část vzorku, kterou zkoumám, aby se docílilo přesnějších výsledků a kratší době výpočtu. Tento postup jsem provedl na prvním snímku z celé série (Obr. 35).

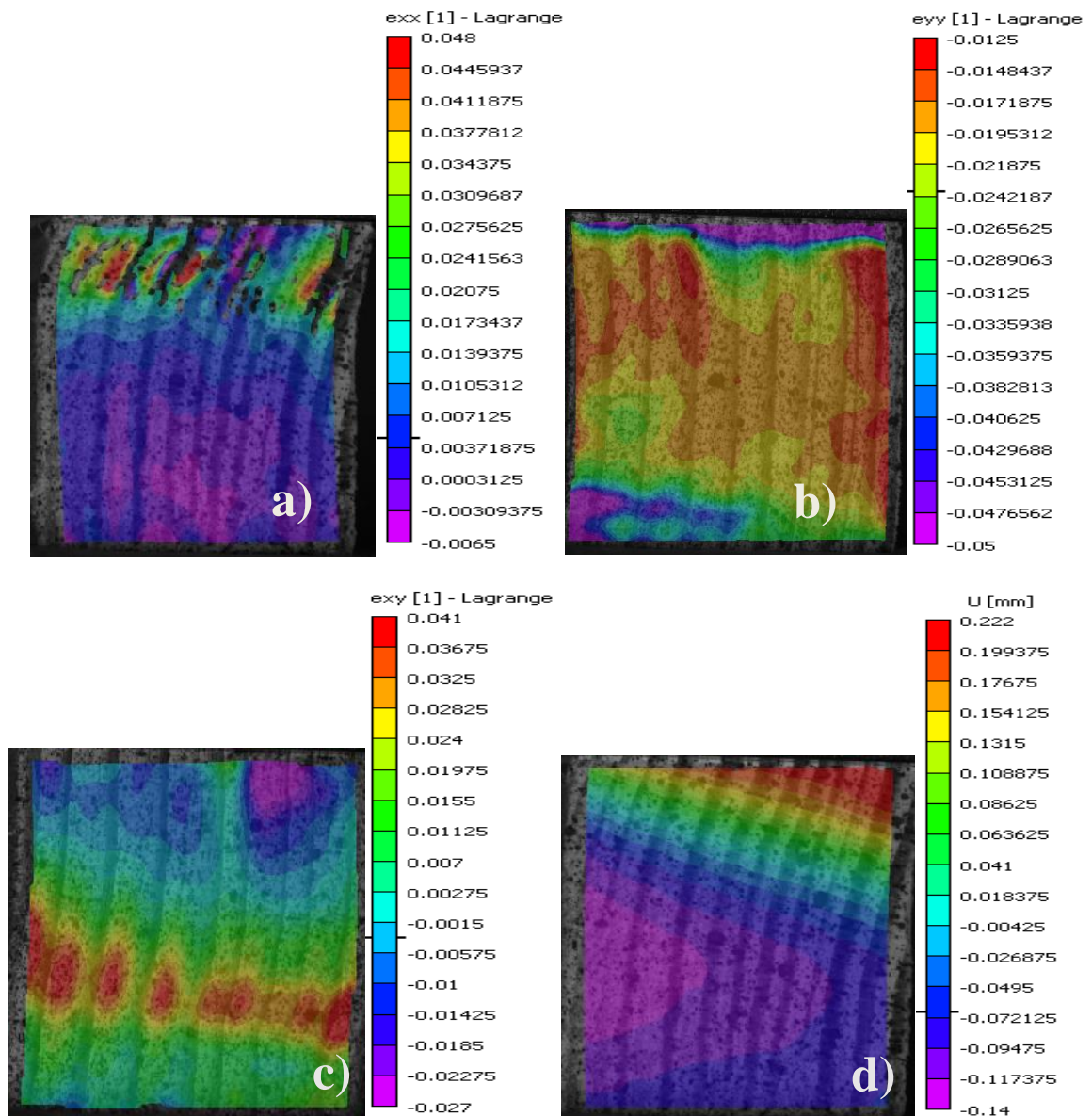


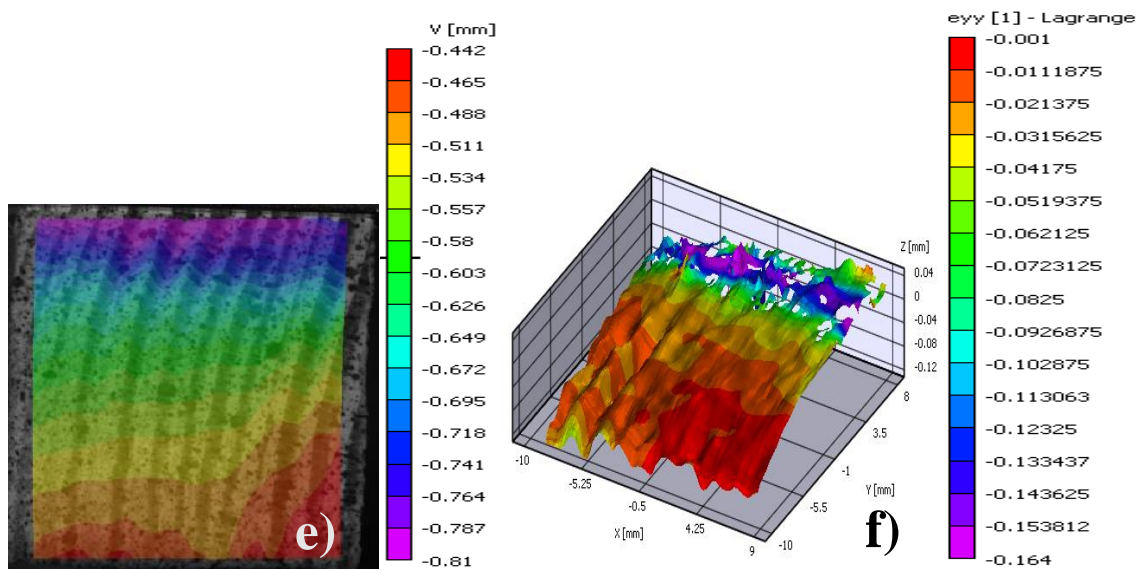
**Obr. 35:** Označení sledované části a grafický výstup deformací vzorku

Po označení zkoumané oblasti byla provedena samotná analýza v software Vic-3D, který postupně počítá posunutí pixelů, které graficky zpracuje a jako výstup vykresluje na každý snímek včetně stupnice (Obr. 36). Samotný výpočet trvá přibližně tři až pět minut. V tomto případě jsou pro mě důležité deformace  $\varepsilon_{yy}$  ve směru působící síly, kde dochází k největším optickým změnám. Pro vyexportování dat do souboru s koncovkou (\*.csv) ke zpracování v programu Microsoft Excel jsem použil virtuální extenzometr o délce odvozené z předešlé analýzy (kap. 5.2). Pomocí analýzy deformace otláčení kovových částí stroje do dřeva byl vhodně umístěn extenzometr mimo tuto oblast (Obr. 36). Tato záležitost by způsobila nepřesnost měření v důsledku nespojitosti měřených bodů (pixelů). Dále bylo nutné použít program Octave verze 4.2.0 pro interpolování získaných dat (viz příloha).



**Obr. 36:** Umístění virtuálního extenzometru mimo plastickou deformační oblast pro získání výsledných dat měřené metodou DIC





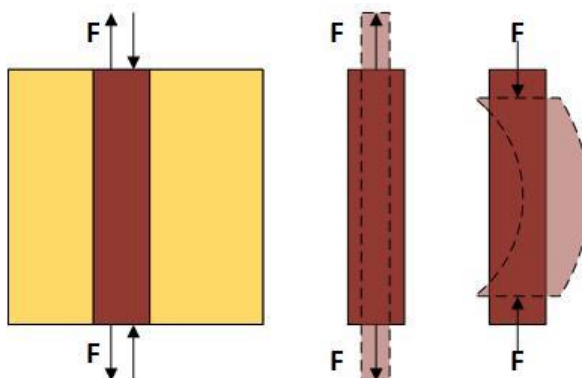
**Obr. 37:** Deformační pole všech možných případů

Obr. 37 uvádí celkový a typický stav deformace pro jedno tělíčko v jednom čase, proto jej tady více do detailu rozepíšu:

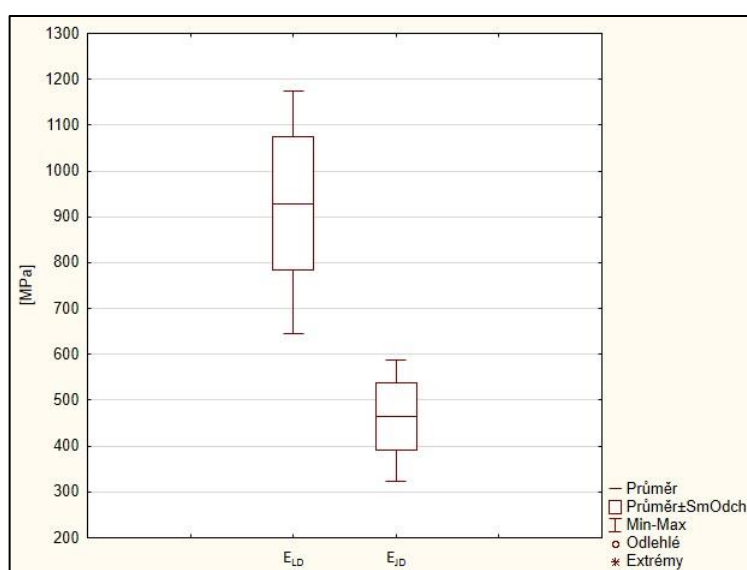
- Charakterizuje poměrnou deformaci v horizontálním směru  $\epsilon_{xx}$  s viditelnou plastickou deformací červeně zbarvenou na vrchních částech vzorku o hodnotě 4,8 %.
- Poměrná deformace ve vertikálním směru  $\epsilon_{yy}$  s pozorovatelným otláčením v okrajových vrstvách vzorku fialově zbarvenou o hodnotě 5 %.
- Poměrná deformace ve smyku  $\epsilon_{xy}$ , kde se v průběhu času objevila smyková rovina v oblasti červeného zbarvení o maximální hodnotě 4 %. Z hlediska teorie Požgaj et al. (1997) dochází k vybočení vláken po diagonále při 50 až 70° a ke vzpěrovému selhání (ztrátě stability). Skluzová rovina vzniká ztrátou stability jednotlivých buněk jarního i letního dřeva.
- Zobrazuje posunutí v horizontálním směru s označením  $U$ , které je maximální v horním okraji 0,2 mm.
- Posunutí ve vertikálním směru s označením  $V$ , které je největší v oblasti fialově zbarvené -0,6 mm.
- Poměrná deformace ve 3D ve vertikálním směru  $\epsilon_{yy}$  přehledně zobrazuje morfologii (tvar) povrchu ve kterém jsou znatelné výškové rozdíly jednotlivých bodů povrchu.

## 5.5 Aplikace Voigtova modelu

Pomocí Voigtova modelu uvedeného v metodice byly analyzovány ostatní moduly pružnosti (letní, jarní). Model je navržený pro dlouho-vláknové kompozity. Používá se pro tah i tlak, ale vhodnější je pro tahové namáhání, vlákno se zapojí maximální možnou mírou do tuhosti celého kompozitu. Naopak při tlaku se vlákno snaží vyboulit a není využívána celá struktura (Obr. 38). Model je postavený na přesném změření objemovém podílu vláken, v našem případě podílu letního a jarního dřeva (kap. 4.3). Situace (modelu) předpokládá, že materiál spojitě navazuje na sebe, což se odborně nazývá kontinuum. Z toho i vyplývá, že předpoklad kontinua není pro dřevo vhodné, protože ve struktuře dřeva jsou prostory vyplněné vzduchem – lumeny. Na základě Voigtova modelu jsem vypočítal průměrnou hodnotu modulu pružnosti letního dřeva 929,32 MPa a modulu pružnosti jarního dřeva 464,66 MPa (Obr. 39, Tab. 10).



Obr. 38: Porovnání chování vlákna při tahu a tlaku



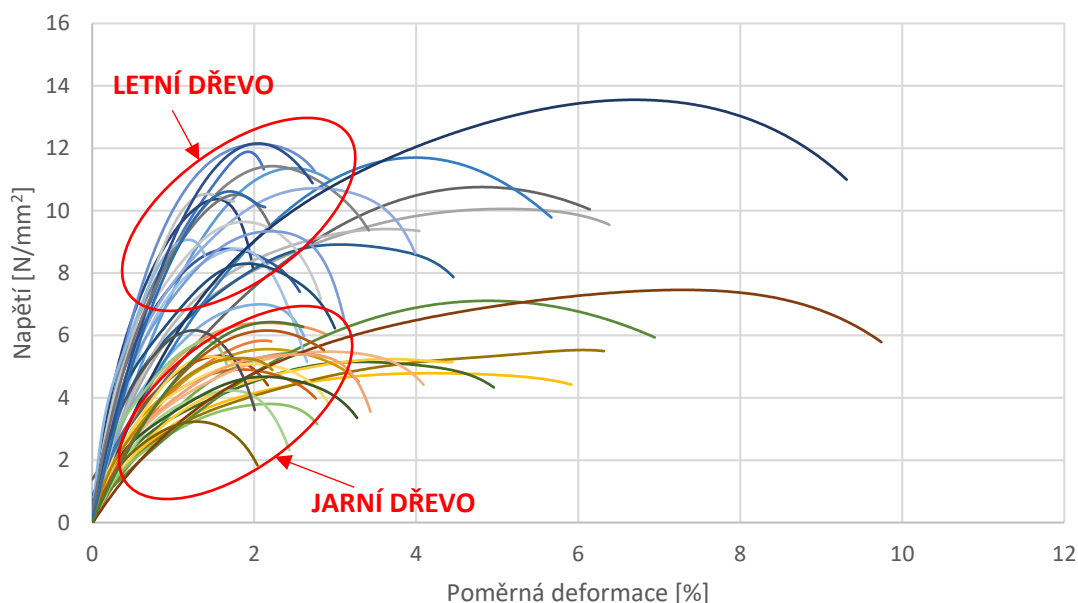
Obr. 39: Krabicový graf modulu pružnosti – variabilita mezi vypočítanými moduly pružnosti letního a jarního dřeva na základě Voigtova modelu

**Tab. 10:** Popisná statistika modulů pružnosti vypočteny na základě Voigtova modelu

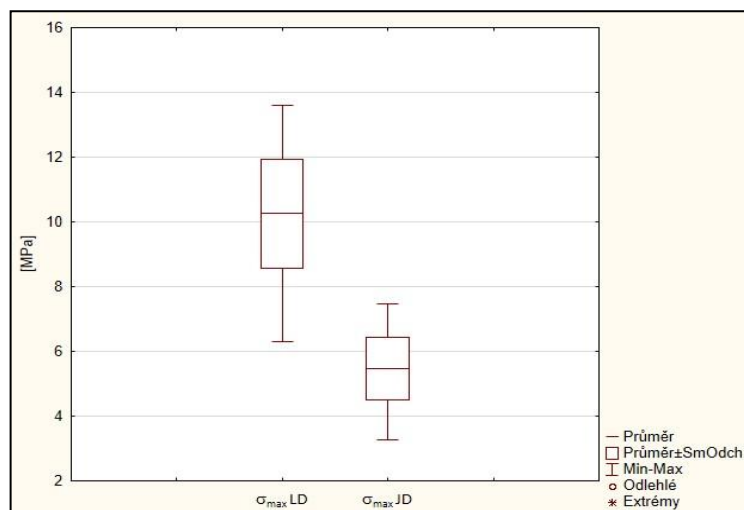
Proměnná	Průměr	Medián	Min.	Max.	Rozptyl	Sm.odch.	Var.koef.
$E_{LD}$ [MPa]	929,32	924,43	645,68	1173,57	21174,18	145,51	15,66
$E_{JD}$ [MPa]	464,66	462,22	332,84	586,78	5293,50	72,76	15,66
F.T. [-]	1,42	1,40	1,33	1,60	0,01	0,075	5,27

## 5.6 Výpočet napětí v jarním a letním dřevě

V programu Vic-3D jsem pomocí bodové analýzy z letního a jarního dřeva, vyexportoval zjištěná data do souboru (\*.csv). Z těchto dat jsem využíval sloupec s deformací ve vertikálním směru  $\varepsilon_{yy}$ , kterou jsem interpoloval (stejný způsob jako u deformace DIC pracovních diagramů) na shodný počet hodnot napětí příčnicku (více příloha). Potom jsem vypočítal z celkového modulu pružnosti za pomoci směšovací rovnice (11) včetně známých objemových podílů vrstev dřeva separovaně moduly pružnosti pro jarní a letní dřevo. A z Hookeova zákona (2) jsem vypočítal napětí pro všechny vzorky, jež přehledně zobrazují pracovní diagramy, ve kterých je rozeznatelná variabilita mezi vrstvami letního a jarního dřeva (Obr. 40). Průměrná mez pevnosti letního dřeva je 10,25 MPa a jarního dřeva 5,47 MPa (Obr. 41).

**Obr. 40:** Pracovní diagramy napětí jarního a letního dřeva všech vzorků



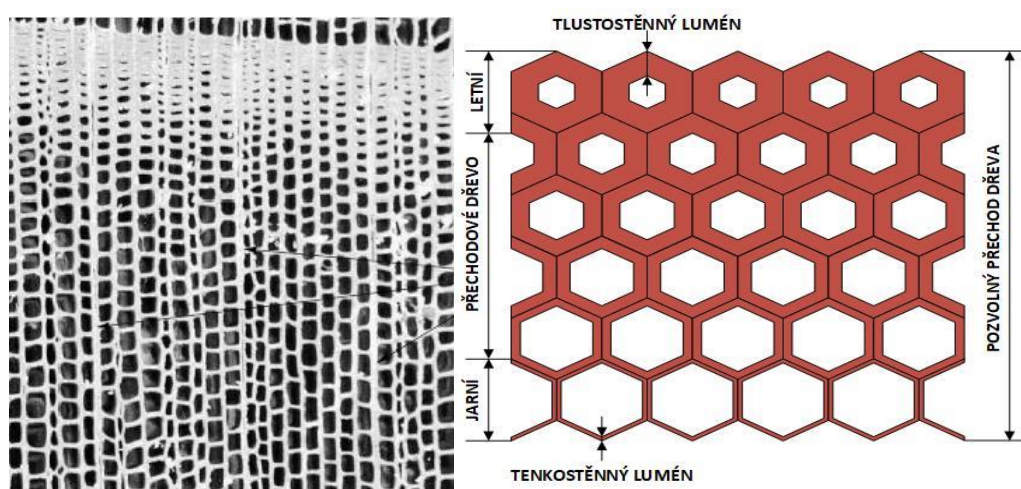


**Obr. 41:** Krabicový graf maximálních napětí – variabilita mezi jarním a letním dřevem

**Tab. 11:** Popisná statistika maximálních napětí vypočtena na základě Voigtova modelu

Proměnná	Průměr	Medián	Min.	Max.	Rozptyl	Sm.odch.	Var.koef.
$\sigma_{max}$ LD [MPa]	10,25	10,53	6,29	13,61	2,88	1,70	16,54
$\sigma_{max}$ JD [MPa]	5,47	5,48	3,28	7,48	0,91	0,95	17,46

Z pracovních diagramů (Obr. 40) je patrné, že jarní dřevo má přibližně poloviční maximální mez pevnosti (Tab. 11). Přitom si musím odpovědět na otázku proč má jarní dřevo menší mez pevnosti. Chemické složení je relativně stejné, ale v anatomické stavbě je viditelný rozdíl. Jarní dřevo má funkci v živém stromě převážně vodivou, proto má větší pórovitost a tím jeho struktura obsahuje více vzduchu (větší příčný průřez) a menší tloušťka buněčné stěny, která je více citlivá na vzpěrové selhání a dojde dříve k vyboulení než u letního dřeva, kde nastane převážně stlačení. Typickým příkladem tlustostěnných buněk je letní dřevo (Obr. 42), dalším příkladem může být reakční dřevo, které má větší kontakty mezi buňkami.



**Obr. 42:** Struktura buněk jarního a letního dřeva (*Picea abies* L.) přibližně šestiúhelníkového tvaru (Persson 2000)

## 6 ZÁVĚR

Bakalářská práce je zaměřena na analýzu deformací dřeva smrku ztepilého zatíženého tlakem v tangenciálním směru. Literární přehled je rozdělen do šesti kapitol popisujících teorii od mikroskopické stavby struktury dřeva po zkoumání deformací staršími a moderními metodami. Pro většinu informací byly použity nejnovější vědecké články, které jsou dostatečné pro porovnání s experimentálními hodnotami. Cílem bakalářské práce bylo zjistit hodnoty modulů pružnosti mechanickými zkouškami dřeva smrku ztepilého zatíženého tlakem v tangenciálním směru. Průměrná hodnota modulu pružnosti v tlaku změřeného pomocí příčnicku vyšla 240,45 MPa. Současně s měřením byly pořízeny snímky optickým setem pro následný výpočet deformace metodou DIC, včetně stanovení celkového modulu pružnosti, jež měla průměrnou hodnotu 656,46 MPa a maximálního napětí (pevnost) 8,28 MPa. Dále byl proveden experiment tlakové zkoušky vzorků letního dřeva, kterým jsem zjistil průměrný modul pružnosti v tlaku – 566,87 MPa. Na základě faktoru trhačky byla hodnota průměrného odvozeného modulu pružnosti stanovena na 807,12 MPa, což je hodnota, která se přibližuje skutečnému modulu pružnosti letního dřeva zjištěného aplikací Voigtova modelu, průměrně 929,32 MPa. Hodnota odvozeného modulu pružnosti je o cca 15 % nižší, než je přesněji zjištěný skutečný modul pružnosti letního dřeva. Podobným způsobem jako separované moduly pružnosti byly zjištěny i pevnosti (max. napětí), průměrná hodnota max. napětí v jarním dřevě byla 5,47 MPa a v letním 10,25 MPa.

## 7 SUMMARY

This bachelor thesis focused on deformation analysis of timber spruce (*Picea abies* L.) using mechanical compressive tests in tangential direction. The literature review was divided to six chapters describing theory of microscopic structure of the wood and traditional and modern methods of deformation evaluation. Recent literature supports the majority of described information in this work in order to compare experimental results to data obtained at different works. The main goal of this work concentrated on finding and evaluation of elastic modulus of timber spruce by mechanical compressive tests in tangential direction. The average elastic modulus of whole sample containing slices of early and late wood provided by electromechanical material testing systems yields 240.45 MPa. Simultaneously used method of digital image correlation gave total average value of modulus of elasticity as 656.46 MPa and maximal average stress 8.28 MPa. The next experiments were focused on extracted samples of late wood where average modulus elasticity reaches 566.87 MPa. The average value of modulus of elasticity considering influence of method inaccuracy (mechanical testing device) was specified as 807.12 MPa (experimentally obtained value of target parameter). The value 807.12 MPa approximates value (929.32 MPa) obtained from Voigt model (estimated value of target parameter). Both values of modulus of elasticity have 15% difference. Similar approach (Voigt model) was used for evaluation of average stress of early wood (5.47 MPa) and late wood (10.25 MPa).



## 8 POUŽITÁ LITERATURA

BODIG, J., A JAYNE, B.A. *Mechanics of wood and wood composites*. Reprint ed. Malabar, Fla.: Krieger Pub., 1993, 712 s. ISBN 08-946-4777-6.

DA SILVA, Andre; KYRIAKIDES, Stelios. Compressive response and failure of balsa wood. *International Journal of Solids and Structures*, 2007, 44.25: 8685-8717.

DE MAGISTRIS, Federica. *Wood fibre deformation in combined shear and compression*. 2005. PhD Thesis. KTH.

DINWOODIE, J M. *Timber: its nature and behaviour*. 2. vyd. London: Taylor & Francis, 2000. 257 s. ISBN 0-419-25550-8.

*Dissemination of IT for the Promotion of Materials Science (DoITPoMS)* [online]. 2015 [cit. 24.03.2017]. Stiffness of long composites. Dostupné z: <[https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/fibre\\_composites/stiffness.php](https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/fibre_composites/stiffness.php)>.

DRUMEA, Andrei, et al. *System on chip signal conditioner for LVDT sensors*. In: *Electronics Systemintegration Technology Conference, 2006*. 1st. IEEE, 2006. p. 629-634.

FAN, Jinhui, et al. *Application of LVDT sensor data acquisition system based on PCI-1716*. In: *Computer Science and Automation Engineering (CSAE), 2011 IEEE International Conference on*. IEEE, 2011. p. 548-552.

GARAB, Jozsef, et al. *Measurement of standard and off-axis elastic moduli and Poisson's ratios of spruce and yew wood in the transverse plane*. *Wood science and technology*, 2010, 44.3: 451-464.

GARDNER, Douglas; TAJVIDI, Mehdi. *Hydrogen bonding in wood-based materials: an update*. *Wood and Fiber Science*, 2016, 48.4: 234-244.

GILLI, Gastone; GILLI, Paola. *The nature of the hydrogen bond: outline of a comprehensive hydrogen bond theory*. Oxford University Press, 2009.

CHEN, Zhenning, et al. *A method to transfer speckle patterns for digital image correlation*. *Measurement Science and Technology*, 2015, 26.9: 095201.

JAHODA J., VALACH Jaroslav, *Image data sequentiality influence on measurement precision of the image correlation method*, In *Technical Computing Prague 2009*. Praha: Humusoft, s.r.o, (2009)

JANIČEK, P., MAREK, J. a kol. *Expertní inženýrství v systémevém pojetí* 1. vyd. Praha: Grada publishing, a.s. 1996. 256 s. ISBN 978-80-7169-413-7

JUODEIKIENĖ, Inga; NORVYDAS, Valdas. *Compression strength of Oak and Ash Wood Perpendicular to Grain*. 2005.

KYZIOL, Leslaw. *Reinforcing wood by surface modification*. *Composite Structures*, 2016, 158: 64-71.

- PAN, Bing, et al. *Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review*. Measurement science and technology, 2009, 20.6: 062001.
- PERSSON, Kent. *Micromechanical modelling of wood and fibre properties*. Division of Structural Mechanics, Lund Institute of Technology, 2000.
- POŽGAJ, ALEXANDER, et al. *Štruktúra a vlastnosti dreva*. Druhé vydanie. Bratislava: PRÍRODA, 1997. 488 s. ISBN 80-07-00960-4.
- RI, S.; FUJIGAKI, M.; MORIMOTO, Y. *Sampling moiré method for accurate small deformation distribution measurement*. Experimental Mechanics, 2010, 50.4: 501-508.
- RIGGIO, Mariapaola. *Morphological Modelling of Timber Elements: An Application of Digital Technologies for the Assessment of Timber Structures*. 2007. PhD Thesis. Università di Trento.
- WASGESTIAN, Petr. *Tenzometry HBM* [online]. [cit. 2017-03-04]. Dostupné z WWW: <<http://www.hbm.cz/Aplikace/tenzometry.pdf>>
- WOUTS, J., et al. *Strain rate effects on the compressive response of wood and energy absorption capabilities–Part A: Experimental investigations*. Composite Structures, 2016, 149: 315-328.
- WU, Rong; QIAN, Hao; ZHANG, Dongsheng. *Robust full-field measurement considering rotation using digital image correlation*. Measurement Science and Technology, 2016, 27.10: 105002.
- XAVIER, J., et al. *Stereovision measurements on evaluating the modulus of elasticity of wood by compression tests parallel to the grain*. Construction and Building Materials, 2012, 26.1: 207-215.
- XIE, Huimin, et al. *In-plane deformation measurement using the atomic force microscope moiré method*. Nanotechnology, 2000, 11.1: 24.

## **9 POUŽITÉ NORMY**

- ČSN 49 0102 Skúšky vlastností rasteného dreva. Metóda zisťovania priemernej šírky letokruhov a priemerného podielu letného dreva
- ČSN 49 0103 Drevo. Zisťovanie vlhkosti při fyzikálních a mechanických skúškach
- ČSN 49 0108 Drevo. Zisťovanie hustoty
- ČSN 49 0112 Drevo. Tlak naprieč vlákien

## 10 PŘÍLOHY

**Tab. 10:** Tabulka výsledků měření standardních tlakových vzorků na ZWICK souběžně z DIC

Vzorek	$E_{příč}$ [MPa]	$E_{DIC}$ [MPa]	$\sigma_{max.}$ [MPa]	$\sigma_{\dot{u}}$ [%]	$\alpha$ [°]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
1.	243,79	697,60	8,198	1,77	10,2	537
2.	226,52	629,58	8,912	1,94	11,3	586
3.	273,74	851,19	8,609	1,93	8,2	580
4.	258,94	699,05	8,397	2,14	10,7	575
5.	221,69	611,31	7,924	1,55	11,1	545
6.	218,75	534,89	7,942	1,18	15,5	551
7.	252,61	688,79	8,788	1,78	10,4	587
8.	229,80	644,60	8,610	1,58	11,4	542
9.	203,72	472,51	7,005	1,69	13,6	536
10.	244,98	707,44	8,785	1,77	6,3	580
11.	248,30	738,87	8,857	1,33	5,7	584
12.	226,18	645,51	8,263	2,50	11,8	540
13.	254,26	670,88	8,799	1,99	11,5	581
14.	278,68	810,56	8,572	1,47	10,0	573
15.	265,54	757,30	8,624	1,89	16,5	583
16.	212,45	552,51	8,731	2,19	9,7	541
17.	227,95	584,89	7,995	1,43	13,0	583
18.	221,39	579,33	7,839	1,77	10,9	546
19.	222,47	551,70	7,976	2,24	11,8	532
20.	273,97	817,34	8,039	2,01	1,7	473
21.	213,66	495,30	7,783	2,72	5,6	492
22.	263,88	724,34	8,265	2,79	2,9	457
23.	248,72	683,24	7,809	2,03	6,2	471
24.	238,87	606,33	7,902	2,19	5,5	474
<b>Průměr</b>	<b>240,45</b>	<b>656,46</b>	<b>8,276</b>	<b>1,91</b>	<b>9,6</b>	<b>544</b>
<b>Směr. Od.</b>	<b>21,613</b>	<b>100,037</b>	<b>0,469</b>	<b>0,406</b>	<b>3,703</b>	<b>41,650</b>
<b>Var. Koef.</b>	<b>8,989</b>	<b>15,239</b>	<b>5,670</b>	<b>21,222</b>	<b>38,391</b>	<b>7,660</b>

**Tab. 11:** Tabulka výsledků měření za pomoci Voigtova modelu

Vzorek	LD [%]	JD [%]	E <sub>LD</sub> [MPa]	E <sub>JD</sub> [MPa]	F.T. [-]	$\sigma_{\max}$ LD [MPa]	$\sigma_{\max}$ JD [MPa]
1.	45,44	54,56	959,30	479,65	1,38	12,107	5,895
2.	48,03	51,97	850,61	425,31	1,35	10,168	4,825
3.	45,06	54,94	1173,57	586,78	1,38	11,355	5,602
4.	46,11	53,89	956,88	478,44	1,37	10,492	5,465
5.	50,21	49,79	813,94	406,97	1,33	10,760	5,563
6.	43,39	56,61	746,06	373,03	1,39	8,996	5,185
7.	49,17	50,83	923,50	461,75	1,34	12,364	6,478
8.	45,96	54,04	883,26	441,63	1,37	9,470	5,272
9.	46,36	53,64	645,68	322,84	1,37	7,077	3,847
10.	40,55	59,45	1006,67	503,34	1,42	8,830	4,918
11.	47,18	52,82	1004,04	502,02	1,36	11,483	5,620
12.	40,21	59,79	920,76	460,39	1,43	11,990	7,297
13.	45,00	55,00	925,35	462,68	1,38	10,813	5,529
14.	43,34	56,66	1130,96	565,48	1,40	9,663	5,131
15.	35,02	64,98	1121,76	560,88	1,48	8,916	4,268
16.	42,54	57,46	775,24	387,62	1,40	13,609	7,482
17.	42,62	57,38	820,21	410,10	1,40	6,287	3,282
18.	40,11	59,89	826,96	413,48	1,43	8,537	4,700
19.	47,61	52,39	747,51	373,76	1,35	9,450	5,486
20.	39,86	60,14	1168,79	584,40	1,43	10,769	5,444
21.	25,00	75,00	792,48	396,24	1,60	9,468	5,853
22.	31,06	68,94	1105,36	552,68	1,53	12,161	6,377
23.	30,69	69,31	1045,59	522,79	1,53	10,564	5,324
24.	26,44	73,56	959,08	479,54	1,58	10,722	6,436
<b>Průměr</b>	<b>41,54</b>	<b>58,46</b>	<b>929,32</b>	<b>464,66</b>	<b>1,42</b>	<b>10,252</b>	<b>5,469</b>
<b>Směr. Od.</b>	<b>7,03</b>	<b>7,03</b>	<b>145,51</b>	<b>72,76</b>	<b>0,07</b>	<b>1,695</b>	<b>0,955</b>
<b>Var. Koef.</b>	<b>16,914</b>	<b>12,019</b>	<b>15,658</b>	<b>15,658</b>	<b>5,269</b>	<b>16,540</b>	<b>17,458</b>

Příklad, jak jsem vkládal vstupní rozměry tělísek za pomoci posuvného měřidla do softwaru

TestXpert:

Specimen number – číslo měřeného vzorku – 1

Délka – šířka v tangenciálním směru – 20,15 mm

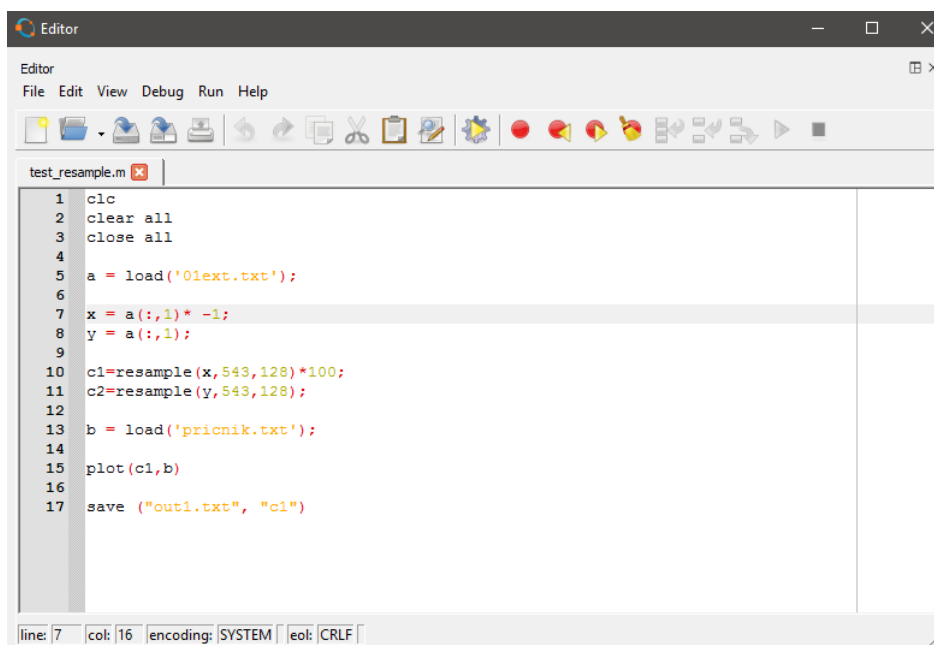
Tloušťka – délka vzorku – 30,13 mm

Šířka – šířka kolmo na směr zatížení 20,17 mm

Hmotnost – 5,830 g

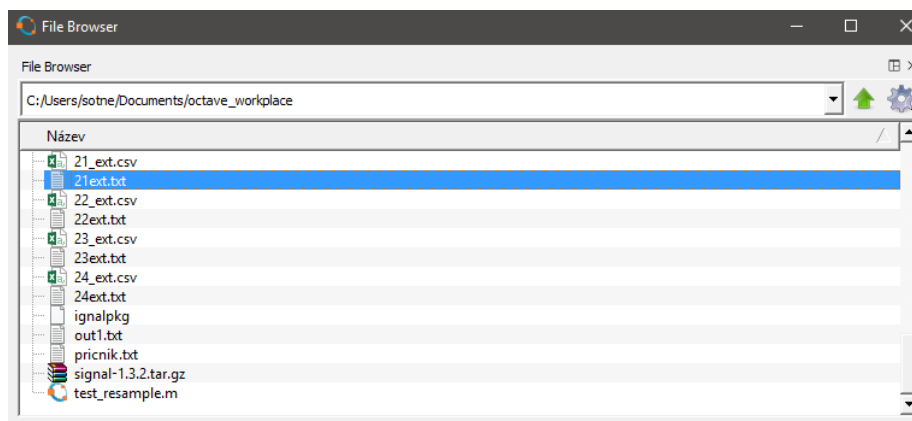
## 9.1 Postup převzorkování (interpolování) hodnot v programu Octave

Pro vytvoření grafu je nutné znát hodnoty X, Y, v našem případě X = deformace a Y = síla (napětí), pomocí virtuálního extenzometru v programu Vic-3 D jsem vyexportoval data ve formátu (\*.csv), které jsou vhodná pro zpracování v programu Excel. Síla (napětí) MPa byla stejná jako u mechanického způsobu testování tělísek. Problém nastal v počtu získaných dat pro X = 128, Y = 543 hodnot. Počet získaných dat je nutné mít stejný pro obě proměnné. Možností bylo použití programu Octave verze 4.2.0, obdobný program jako Matlab volně stažitelný na stránkách ([gnu.org/software/octave](http://gnu.org/software/octave)). 128 hodnot pro X souřadnici bylo nutné převzorkovat na 543 hodnot. Pro tuto možnost jsem použil funkci `>> resample(x, p, q)`, tato funkce je v přídatném balíčku signal processing tools, který je nutné stáhnout ([octave.sourceforge.io/signal/index.html](http://octave.sourceforge.io/signal/index.html)), soubor `signal-1.3.2.tar.gz` je nutné přesunout do vytvořené knihovny (např. `octave_workplace`), ze které program Octave bude načítat data (z extenzometru => hodnoty X deformace) i přídatný balíček. Pro načtení funkce je nutné do příkazového řádku (Command Window) napsat `>> 'pkg load signal'`. Funkce se načte a bude připravena k použití. V editoru je nutné vypsát všechny důležité příkazy a funkce více (Obr. 43).



```
1 clear
2 clear all
3 close all
4
5 a = load('01ext.txt');
6
7 x = a(:,1) * -1;
8 y = a(:,1);
9
10 c1=resample(x,543,128)*100;
11 c2=resample(y,543,128);
12
13 b = load('pricnik.txt');
14
15 plot(c1,b);
16
17 save ('out1.txt', 'c1')
```

Obr. 43: Editor v programu Octave, použití funkce `resample`



**Obr. 44:** Otevřená knihovna pro načítání dat (zdrojů)

V knihovně je uloženo 24. dat z extenzometru z každého vzorku, data jsou v (\*.txt), protože (\*.csv) soubor nesel importovat, také obsahují data z příčnicku a hlavě zde ukládá výsledky z programu.

## CHARAKTERISTIKA JEDNOTLIVÝCH PŘÍKAZŮ

### Načtení souboru s daty pro první vzorek:

```
a = load('01ext.txt');
```

### Označení sloupce a řádků v souboru:

```
x = a(:,1)* -1;
```

kde a... příslušný soubor (prvního vzorku), : ... označí všechny řádky, 1 ... první sloupec, -1 ... získání absolutní hodnoty (hodnoty vycházejí v záporných číslech), x ... soubor upraven o absolutní hodnotu

### Funkce převzorkování:

```
c1=resample(x,543,128)*100;
```

kde c1 ... převzorkuje soubor x na 543 hodnot ze 128 hodnot, aby deformace byla v %, tak \*100

### Načtení Y hodnot síly (napětí) MPa z příčnicku:

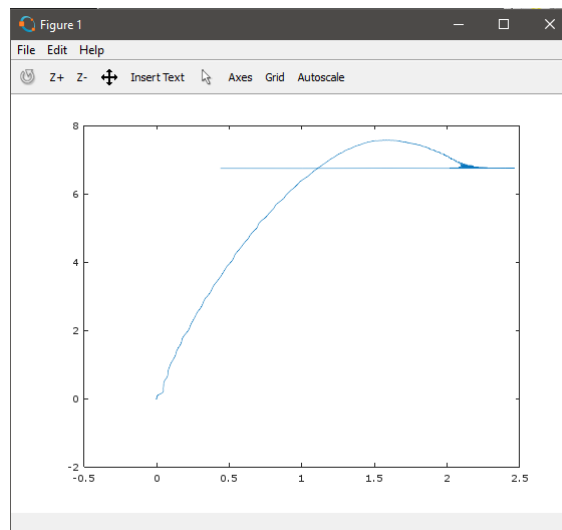
```
b = load('pricnik.txt');
```

### Vykreslení grafu:

```
plot(c1,b)
```

### Uložení výsledků:

```
save ("out1.txt", "c1")
```



**Obr. 45:** Grafické vykreslení hodnot X deformace a Y síly (napětí) v pracovním diagramu

Pracovní diagramy jsem zhotovil v programu Excel na základě výsledků převzorkovaných hodnot deformací z programu Octave.



## 9.2 Použité statistické charakteristiky

### Aritmetický průměr

Charakterizuje hodnotu, okolo níž kolísají jednotlivé prvky souboru.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_j \quad (18)$$

kde:  $x_j$  ... naměřené hodnoty,  $n$  ... počet naměřených hodnot

### Směrodatná odchylka:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})^2} \quad (19)$$

### Variační koeficient:

$$v = \frac{S}{\bar{x}} \quad (20)$$

kde:  $x_j$  ... naměřené hodnoty,  $S$  ... směrodatná odchylka,  $n$  ... počet naměřených hodnot,  $\bar{x}$  ... aritmetický průměr

## 11 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Schématické znázornění struktury dřeva jehličnanů (De Magistris 2005).....	3
Obr. 2: Schéma a geometrie modelu buněčné stěny v průřezu jarního dřeva (De Magistris 2005) .....	4
Obr. 3: Hustoty jarního a letního dřeva (Wouts et al. 2016) .....	5
Obr. 4: Pracovní diagram pevnosti v tlaku napříč vláken, a – třífázová deformace, b – dvoufázová deformace (Juodeikienė 2005) .....	7
Obr. 5: Typický graf jednoosých stavu napětí závislé na deformaci, pod zatížením v tlaku působeného v podélném, radiálním a tangenciálním směru a tahu v podélném směru (Persson 2000) .....	8
Obr. 6: Model pružin charakterizující chování jarního a letního dřeva (Bodig a Jayne 1993) .....	9
Obr. 7: Vzorky 10 x 10 mm o tloušťce 4 mm, při odklonu vláken $\alpha = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$ deformace tlakem (Garab 2010) .....	9
Obr. 8: Selhání smrkového dřeva ( <i>Picea abies</i> L.) namáhání tlakem při: a) radiálním $\alpha = 0^\circ$ , b) diagonálním $\alpha = 45^\circ$ a c) tangenciálním směru $\alpha = 90^\circ$ (Riggio 2007).....	10
Obr. 9: Buněčná struktura jarního dřeva v radiálním a tangenciálním směru, zobrazující rozdíly v uspořádání buněčných stěn (Persson 2000).....	11
Obr. 10: Uspořádání struktury buněk: a) fotografie struktury buněk s hranicí buněčných stěn, b) příklad nepravidelného modelu šestiúhelníkové buněčné struktury, c) příklad pravidelného šestiúhelníkového (hexagonálního) modelu buněčné struktury (Persson 2000) .....	11
Obr. 11: Grafické znázornění důležitých veličin Hookeova zákona (Bodig a Jayne 1993)	12
Obr. 12: Zatížení vrstev letního a jarního dřeva v tangenciálním směru a princip Voigtova modelu (DoITPoMS 2015) .....	15
Obr. 13: Řez LDVT snímačem a typická lineární převodní charakteristika (Fan 2011).....	16
Obr. 14: Odporový, fóliový tenzometr a deformace při zatížení (Wasgestian 2017).....	17
Obr. 15: Vznik moiré pruhů při jednoosém působení tlaku, zvlnění u víceosého stavu zatížení a názorná poměrná deformace (Ri et al. 2010). .....	19
Obr. 16: Základní používané mřížky a) čárová, b) křížová, c) bodová (Ri et al. 2010).....	19

Obr. 17: Skvrnitý vzor na povrchu testovaného vzorku smrku ( <i>Picea abies</i> L.) a grafický typický výstup ze softwaru .....	20
Obr. 18: Popis bodů ve fazetě je dán tvarovými funkcemi tzv. disktrétní funkce (Wu, Qian, Zhang 2016) .....	21
Obr. 19: Připravené vzorky pro standardní tlakovou zkoušku .....	22
Obr. 20: Předepsané rozměry tlakových tělísek dle normy a skvrnitý povrch vytvořený pro snímání DIC .....	23
Obr. 21: Rozměry vzorku letního dřeva a všech 10 kusů naskenované pro měření obsahu plochy v programu ImageJ .....	23
Obr. 22: Naskenované vzorky a měření letních vrstev dřeva .....	24
Obr. 23: Stanovení úhlu odklonu letního dřeva v softwaru ImageJ .....	25
Obr. 24: Měření plochy letního dřeva v softwaru ImageJ .....	25
Obr. 25: Elektromechanický zkušební stroj Tinius Olsen, 1. zkušební čelisti, 2. klima komora (lze simulovat prostředí), 3. software Tinius Olsen Horizon, 4. velikost zkušebních vzorků vzhledem k čelistem.....	27
Obr. 27: Kalibrační terč .....	29
Obr. 28: Histogram četnosti letního a jarního dřeva včetně popisné statistiky .....	33
Obr. 29: Uspořádání extenzometrů na průřezu vzorku (daný extenzometr je zobrazen červenou barvou).....	34
Obr. 30: Graf zobrazující vliv délky extenzometru na velikost deformace.....	35
Obr. 31: Pracovní diagramy tlaku v tangenciálním směru všech vzorků měřené metodou DIC a příčnickem.....	36
Obr. 32: Krabicový graf modulu pružnosti – variabilita mezi metodami měření.....	37
Obr. 33: Pracovní diagram tlaku destiček z letního dřeva o ploše 10x10 mm .....	38
Obr. 36: Umístění virtuálního extenzometru mimo plastickou deformační oblast pro získání výsledných dat měřené metodou DIC .....	41
Obr. 37: Deformační pole všech možných případů .....	42
Obr. 38: Porovnání chování vlákna při tahu a tlaku .....	43
Obr. 39: Krabicový graf modulu pružnosti – variabilita mezi vypočítanými moduly pružnosti letního a jarního dřeva na základě Voigtova modelu.....	43

Obr. 40: Pracovní diagramy napětí jarního a letního dřeva všech vzorků.....	44
Obr. 41: Krabicový graf maximálních napětí – variabilita mezi jarním a letním dřevem...	45
Obr. 42: Struktura buněk jarního a letního dřeva ( <i>Picea abies</i> L.) přibližně šestiúhelníkového tvaru (Persson 2000) .....	45
Obr. 43: Editor v programu Octave, použití funkce <code>resample</code> .....	53
Obr. 44: Otevřená knihovna pro načítání dat (zdrojů).....	54
Obr. 45: Grafické vykreslení hodnot X deformace a Y síly (napětí) v pracovním diagramu .....	55

## 12 SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Materiálové konstanty pro vrstvy přírodního dřeva (Kyziol 2016).....	6
Tab. 2: Experimentálně zjištěné hodnoty při různém odklonu vláken (Garab 2010).....	10
Tab. 3: Hodnoty $\sigma$ , $E$ , $\epsilon$ v různých způsobech namáhání (Požgaj et. al 1997).....	13
Tab. 4: Stanovení procenta letního dřeva a úhlu odklonu letního dřeva na vzorku 24.....	32
Tab. 5: Popisná statistika odklonu vláken .....	33
Tab. 6: Hodnoty z virtuálních extenzometrů .....	34
Tab. 7: Popisná statistika standardních vzorků.....	37
Tab. 9: Tabulka výsledků měření vzorků letního dřeva .....	39
Tab. 10: Popisná statistika modulů pružnosti vypočteny na základě Voigtova modelu.....	44
Tab. 11: Popisná statistika maximálních napětí vypočtena na základě Voigtova modelu ..	45
Tab. 10: Tabulka výsledků měření standardních tlakových vzorků na ZWICK souběžně z DIC.....	51
Tab. 11: Tabulka výsledků měření za pomoci Voigtova modelu .....	52