

Mendelova univerzita v Brně

Lesnická a dřevařská fakulta

Ústav nauky o dřevě

Analýza deformace kruhového otvoru při
roztlačování čelistmi nového NDT zařízení

Diplomová práce

2015/2016

Bc. Kundera Hynek

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „Analýza deformace kruhového otvoru při roztlačování čelistmi nového NDT zařízení“ zpracoval sám a uvedl jsem všechny použité prameny. Souhlasím, aby moje diplomová práce byla zveřejněna v souladu s § 47b Zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách ve znění pozdějších předpisů a v souladu s platnou Směrnicí o zveřejňování vysokoškolských závěrečných prací.

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

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

V Brně, dne..... podpis studenta.....

Poděkování:

Mé velké díky patří především vedoucímu práce Ing. Václavu Seberovi, Ph.D. a rovněž Ing. Michalu Kloiberovi, Ph.D., který je původcem testovacího zařízení. Poděkování patří také rodině za plnou podporu během celého studia. V poslední řadě bych chtěl poděkovat zaměstnancům Centra excelence Telč, Ústavu teoretické a aplikované mechaniky AV ČR, v. v. i., kteří se jakoukoliv měrou podíleli na této práci a také celému Ústavu nauky o dřevě za poskytnutí potřebného vybavení a zázemí pro zpracování praktické části práce.

Děkuji.

ABSTRAKT

Autor: Bc. Kundera Hynek

Název práce: Analýza deformace kruhového otvoru při roztlačování čelistmi nového NDT zařízení

Široký obor, do kterého spadá problematika této práce, se nazývá Nedestruktivní testování dřeva. Konkrétní náplní práce je experiment, během kterého jsou testovány dřevěné prvky běžně používané pro stavbu dřevěných konstrukcí na našem území pomocí nově vyvinutého semi destruktivního zařízení za současného snímání technologií DIC. Součástí výsledků je i pojednání o vlivu různých faktorů na měřené parametry. Na testovaném zařízení byl v minulosti prováděn rozsáhlý experiment, jehož výsledky byly částečně využity. Práce rovněž pojednává o přesnosti a vhodnosti měření pomocí nově vyvinutého zařízení pro měření konvenční pevnosti a modulu přetvárnosti při roztlačování čelistí ve vyvrtném otvoru (wood testKLOIBer).

Klíčová slova:

Konvenční pevnost, modul pružnosti, modul deformability, digitální korelace obrazu, roztlačování čelistí ve vývrtnu, nedestruktivní testování dřeva.

ABSTRACT

Author: Bc. Kundera Hynek

Title of work: The analysis of the deformation of the circular hole during the measurement by application of a new device that uses the principle of the jaws expansion

The issue of the thesis fall under the department of non destructive testing of wood. The thesis description is an experiment, which includes the measurement by application of a new semi destructive device on wooden beams commonly used in historical constructions in the Czech Republic. This measurement was monitored by DIC technology at the same time. The part of the results of work is also the treatise about the influence of different factors like the wood density, moisture content and others. This final thesis also discusses about the accuracy and appropriateness the measurement by a new diagnostic device for in-situ determination of strength and modulus of deformability in compression of wood parallel to fibers.

Key words:

Conventional strength, modulus of deformability, modulus of elasticity, digital image correlation, pushing jaws in drilled hole, non-destructive testing of wood,

Obsah

1	Úvod	1
2	Cíl práce	2
3	Současný stav řešené problematiky.....	3
3.1	Mechanické vlastnosti dřeva.....	3
	Pevnost.....	3
	Pružnost	4
	Vliv faktorů na tyto vlastnosti	5
3.2	Poškození dřeva	6
	Poškození dřevoznehodnocujícími houbami	7
	Poškození dřevokazným hmyzem.....	10
3.3	Nedestruktivní testování dřeva (NDT)	12
	3.3.1 Historie	12
	3.3.2 Metody nedestruktivního testování dřeva	13
	3.3.3 Semi-destruktivní metody testování dřeva.....	17
3.4	Digitální korelace obrazu (DIC).....	26
4	Materiál a metodika.....	29
4.1	Experiment	29
4.2	Použité předpisy (Normy)	31
4.3	Zkušební zařízení a software	32
4.4	Statistické vyhodnocení dat	33
5	Výsledky	35
5.1	Výsledky měření pomocí zařízení <i>wood testKLOIBer</i> za současného snímání DIC	35
5.2	Srovnání výsledků měření nově vyvinutým zařízením s konvenčními metodami testování.....	42

5.3	Posouzení závislostí měřených veličin a vlivu hustoty dřeva.....	45
6	Diskuse	48
7	Závěr	50
8	Summary	51
9	Seznam literatury	52
10	Příloha	56

1 Úvod

Historické konstrukce přežily staletí. Dnes jsou ovšem vystaveny novým nárokům na zatížení a na splnění požadavků různých stavebních norem, které jsou mnohem přísnější, nebo dříve vůbec neexistovaly. Úkolem inženýra je použít výpočetní nástroje pro výpočet statických vlastností konstrukce. K tomu je ale zapotřebí znát vlastnosti historického materiálu, v našem případě dřeva. Dokážeme velice snadno určit, jaké vlastnosti má dřevo na povrchu. Ovšem jaké jsou vlastnosti uvnitř zabudovaného prvku, je otázka, na kterou jsme donedávna neuměli odpovědět.

U historických staveb oceňujeme nejen jejich stáří, nebo architektonické kvality, ale také původní materiál, z něhož jsou zhotoveny. Povrch zabudovaného dřeva nám může prozradit spoustu zajímavých informací. Můžeme zde najít stopy po opracování původními tesařskými nástroji, které nám prozradí, zdali byl tesař pravák nebo levák, kterým směrem trám otesával, nebo jak dobře měl nabroušené nástroje. Stopy práce řemeslníků ale většinou nejsou hlavním parametrem, který nás na zkoumané konstrukci zajímá. Zajímají nás vlastnosti uvnitř zabudovaného dřeva, stupeň degradace nebo poškození. Přirozené stárnutí dřeva může urychlit spoustu různých faktorů, které spolu často úzce souvisí. Jako „nástroj zkázy“ mohou figurovat dřevokazné houby nebo hmyz. Často ale člověk podporuje tyto degradační faktory nesprávnou konstrukční ochranou, zanedbanou péčí, nebo nesprávnou opravou dřevěných prvků. Většinou jsou tyto poškození ovšem schovány uvnitř dřevěného prvku a jejich odhalení a klasifikace nebývá jednoduchým úkolem. K tomuto účelu slouží speciální přístroje pro diagnostiku dřeva. Některé z nich jsou přenosné a umožňují tak průzkum přímo ve zkoumaných objektech. Jedná se o přístroje, které umožňují měřit vybrané parametry dřeva, přičemž není zapotřebí výrazně narušit daný prvek. Jedná se tedy o nedestruktivní, případně semi-destruktivní testování dřeva.

V teoretické části práce se budu zabývat popisem dostupných zařízení pro nedestruktivní a semi-destruktivní testování dřeva, včetně optických metod měření deformací. Hlavní náplň práce ovšem spočívá v analýze dřeva pomocí nově vyvinutého zařízení pro terénní měření konvenční pevnosti a modulu přetvárnosti při roztlačování čelistí v předvrtaném otvoru s příznačným názvem *wood testKLOIBer*.

2 Cíl práce

Celá práce je zaměřena na problematiku nedestruktivního, respektive semi-destruktivního testování dřeva. Hlavním cílem je důkladně představit nově vyvinutý přístroj pro diagnostiku zabudovaného konstrukčního dřeva. Cíle této práce lze shrnout do několika bodů:

- v teoretické části popsat dosavadní metody a přístroje pro diagnostiku zabudovaného dřeva včetně nově vyvinutého přístroje s názvem *wood testKLOIBer*
- porovnat data získaná měření tímto přístrojem (konvenční pevnost a modul deformability) s daty naměřenými v laboratoři podle standardně prováděných zkoušek dřeva v ohybu a tlaku (mez pevnosti a modul pružnosti)
- zaznamenat měření zařízením *wood testKLOIBer* pomocí metody digitální korelace obrazu (DIC), zpracovat tato data a popsat deformace v okolí otvoru, ve kterém dochází k roztlačení čelistí nově vyvinutého zařízení
- popsat vliv různých faktorů ovlivňujících měřené parametry a pojednat o vhodnosti testovacího zařízení

3 Současný stav řešené problematiky

3.1 Mechanické vlastnosti dřeva

Vinař a kol. (2005) představují dřevo jako materiál, který má relativně vysoké pevnosti vzhledem ke své měrné hmotnosti. Oproti ostatním stavebním materiálům má řádově stejné pevnosti v tahu, tlaku i ohybu. Vlastnosti tohoto materiálu jsou určeny vláknitou buněčnou stavbou, která ovšem skrývá přirozené růstové vady a někdy i dodatečné poškození způsobeno biotickými škůdci. Pevnost dřeva a modul pružnosti se výrazně odlišuje podle způsobu namáhání. Nejvyšší mechanické vlastnosti dřevo vykazuje v tahu a ohybu.

Pevnost

Pevnost dřeva v tlaku je cca 60% vůči hodnotám v tahu. Hodnoty pevnosti v tlaku rovnoběžně s vlákny mohou být získány, pokud síla působí rovnoběžně s dřevními vlákny, a zároveň kontrakce proti působící síle se odehrává uvnitř testovaného vzorku. Je tak kladen důraz na geometrii tělesa, která je nesmírně důležitá při návrhu stavebních prvků (Shmulsky and Jones, 2011).

Carl a kol. (2010) představují pevnost rovnoběžně s vlákny jako maximální možné napětí v zatěžovaném vzorku rovnoběžně s dřevními vlákny, přičemž musí být splněna podmínka, že poměr délky k nejmenšímu rozměru musí být menší než 11.

Požgaj a kol. (1993) představují pevnost materiálu jako jeho odpor nebo odolnost proti trvalému porušení. Dle povahy fyzikálních veličin, kterými je pevnost definována, rozlišujeme 3 druhy pevnosti:

- konvenční (smluvní) pevnost
- skutečnou pevnost
- ideální (teoretickou) pevnost

Konvenční pevnost je definována jako největší napětí, které se vztahuje na původní průřez zkoušeného tělesa. U dřeva se tímto způsobem zjišťuje například pevnost v tahu rovnoběžně s vlákny, kde je průřez zatěžovaného tělesa neměnný.

Skutečná pevnost je definována skutečným napětím v okamžiku porušení zkušebního tělesa. Při pohledu na pracovní diagram ji můžeme definovat jako napětí odpovídající mezi pevnosti materiálu.

Ideální pevnost je maximální teoretická hodnota pevnosti materiálu, které je možno dosáhnout při dané dřevině a daných podmínkách zatížení. Lze ji teoreticky vypočítat z meziatomových vazbových sil. Vzhledem ke složitosti struktury je teoretický výpočet této hodnoty pro dřevo velice nepravděpodobný.

Mez pevnosti při zatěžování na tlak rovnoběžně s vlákny vypočítáme ze vztahu:

$$\sigma_p = \frac{F_{Max}}{a \cdot b} [\text{Pa}]$$

Kde:

a; b..... příčné rozměry zatěžovaného tělesa [m]

F_{Max}..... síla na mezi pevnosti [N]

Pružnost

Pružnost je všeobecně definována jako schopnost materiálu dosáhnout původního tvaru a rozměrů po ukončení působení vnějších sil. Požgaj a kol. (1993) uvádí charakteristiku pružnosti materiálu z fyzikálního hlediska jako stav, kdy změny mezi atomovými vzdálenostmi jsou vratné a po ukončení působení vnějších sil se atomy vrátí do rovnovážného stavu tak, aby dosáhly nejnižší potenciální energie. Při pohledu na pracovní diagram hovoříme o pružnosti jen v lineární části diagramu. Charakteristiky, které pružnost materiálu popisují, jsou modul pružnosti (E), Poissonova čísla (μ), mez úměrnosti (σ_U) a energie pružné deformace (W_p).

Při statických výpočtech dřevěných konstrukcí představuje modul pružnosti základní charakteristiku materiálu. Čím je modul pružnosti vyšší, tím větší energie je potřeba na vyvolání deformace. Požgaj a kol. (1993) a Gandelová a kol. (2004) se shodují při rozdělení modulů pružnosti pro různé druhy namáhání materiálu. Při jednoosém namáhání (tah, tlak) hovoříme o normálovém Youngově modulu pružnosti

a při namáhání na smyk a krut mluvíme o modulu smykovém (G). Modul pružnosti v ohybu je kombinací modulů pružnosti v tlaku a tahu. Urgela (1999) dále dělí modul pružnosti na dynamický a statický. Pro stanovení statického modulu pružnosti používáme standardní normované zkoušky (ČSN 49 0112 *Zjišťování fyzikálních a mechanických vlastností přírodního dřeva*) a pro stanovení dynamického modulu pružnosti jsou vhodné například metody založené na principu vibrací a ultrazvuku. Nový (1995) a také Gandelová a kol. (2004) uvádějí, že Youngův modul pružnosti lze stanovit pouze experimentálně, jelikož dosud nebyly stanoveny matematické vztahy pro jeho přímý výpočet. Požgaj a kol. (1993) uvádějí všeobecný vzorec i výpočet modulu pružnosti z experimentálního měření:

$$E = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} [\text{Pa}]$$

U jednoosého zatěžování jej můžeme jednoduše charakterizovat jako poměr napětí a poměrných deformací.

$$E = \frac{F_u \cdot l}{S \cdot \Delta u_1} [\text{Pa}]$$

Kde:

Δu_1 absolutní deformace [m]

l..... původní délka tělesa [m]

S..... plocha tělesa [m²], na kterou působí síla F [N]

Vliv faktorů na tyto vlastnosti

Faktory, které mají vliv na mechanické vlastnosti, byly předmětem mnoha studií. Ve svých publikacích se na toto téma rozepsali například Shmulsky a Jones (2011); Horáček (2008); Waangard (1956) nebo Record (1914).

Objemová hmotnost neboli hustota dřeva má na mechanické vlastnosti vliv zásadní. Obecně se s rostoucí objemovou hmotností dřeva zvyšují i jeho mechanické vlastnosti.

S rostoucí vlhkostí dřeva se naopak většinou mechanické vlastnosti snižují. Je ovšem třeba uvažovat, že vlhkost dřeva přímo ovlivňuje jeho hustotu. Dalším

ovlivňujícím parametrem je teplota, která rovněž přímo ovlivňuje vlhkost dřeva i parametry vzduchu v jeho okolí a vytváří tak společně vázané teplotně-vlhkostní pole.

S klesající teplotou se mechanické vlastnosti zvyšují, s rostoucí naopak snižují. Tyto změny jsou nevratné, pokud je teplota natolik vysoká, že dochází k rozkladu některé z chemických látek dřeva.

Výrazný vliv na mechanické vlastnosti dřev má rovněž čas, po který je dřevo zatíženo vystavováno. Během krátkodobého zatížení vykazuje dřevo vyšší pevnost než při zatížení dlouhodobém.

Rovněž růstové vady ovlivňují mechanické vlastnosti. S počtem a velikostí přítomných suků se mechanické vlastnosti snižují, přičemž záleží na jejich velikosti, umístění, ale i na tvaru, na zdravotním stavu suku a taky na druhu zatížení. Negativní účinek mají i vady jako odklon dřevních vláken nebo všechny druhy trhlin ve dřevě.

Důležitou roli hraje také stanoviště, na kterém daný strom roste. Pomalu rostoucí strom s velkou hustotou úzkých letokruhů bude vykazovat lepší mechanické vlastnosti než rychle rostoucí jedinec. Tento jev samozřejmě úzce souvisí s hustotou dřeva, viz výše.

3.2 Poškození dřeva

Štefko a kol. (2009) nebo Zabel a Morrell (1992) uvádějí, že na degradaci, poškození a poruchách dřevěných konstrukcí se podílejí abiotičtí a biotičtí dřevoznehodnocující činitelé. Z abiotických činitelů jsou to především atmosférické vlivy, agresivní chemikálie, nebo vysoké teploty. Z biotických činitelů jsou to bakterie, dřevokazné houby, dřevozbarvující houby, plísně, dřevokazný hmyz a taky ptáci. Reinprecht (2008) uvádí, že dřevoznehodnocující organismy hledají ve dřevě živiny a energii potřebnou pro život, případně zde nacházejí útočiště. Biotičtí škůdci napadají dřevo už během růstu stromů, ve formě vytěžené kulatiny, řeziva, štěpek a poškozují různé druhy dřevařských nebo nábytkářských výrobků. Stejný autor představuje jako nejvýznamnější biotické škůdce rostlého dřeva a aglomerovaných materiálů na bázi dřeva dřevokazné houby, protože ti ničí základní stavební komponenty dřeva – celulózu a lignin.

Poškození dřevoznehodnocujícími houbami

Podle Požgaje (1997) jsou houby jednobuněčné nebo mnohobuněčné heterotrofní „stielkaté“ rostliny (stielka = tělo) bez chlorofylu, živící se organickými zdroji uhlíku. Vlákna pletiva pronikají přes pletiva hostitele a působením enzymů je porušuje. Podhoubí se někdy splétá do útvarů podobným kořínkům (označují se *rizomorfy*), jindy vytváří blanité až kožovité povlaky. Za dřevoznehodnocující houby považujeme plísně, dřevozbarvující houby a také dřevokazné houby, viz dále.

Plísně a stejně tak dřevozbarvující houby se řadí k houbám vreckatým (*Ascomycota*) nebo k houbám nedokonalým (*Deuteromycota*). Reinprecht (2008) uvádí, že z pohledu poškození dřeva jsou méně nebezpečné, než houby dřevokazné. Viitanen a Ritschkoff (1991) i Reinprecht (2008) představují plísně jako mikroskopické houby, které napadají povrch dřeva, čímž zhoršují jeho estetickou stránku, ale nezhoršují mechanické vlastnosti jako pevnost nebo tuhost prvku. Zhoršují únik vody ze dřeva a dřevo s vyšší vlhkostí napadají i jiní biologičtí škůdci. Optimální podmínky pro růst plísní jsou 95% relativní vlhkost vzduchu a teplota od 27 do 37 °C. Dřevo nejčastěji napadají plísně z rodu *Alternaria*, *Aspergillus*, *Fusarium*, *Penicillium*, *Trichoderma* nebo *Aureobasidium*. (Reinprecht, 2008)

Dřevozbarvující houby způsobují pouze změnu barvy ve formě skvrn, nebo souvisle probarvených oblastí. Dle Gápera a Pišúta (2003) houbová vlákna narušují buněčné stěny a zbarvují je svými pigmenty, přičemž zpravidla nenarušují polysacharidy a lignin. Reinprecht (2008) uvádí, že dřevozbarvující houby napadají jen dostatečně vlhké dřevo, prorůstají i hlouběji do dřeva, kde ho zbarvují do různých odstínů. Optimální podmínky pro rozvoj těchto hub jsou vlhkost dřeva 30 až 130 % a teplota od 18 do 29 °C. Schmidt (2006) nebo Reinprecht (2008) jako nejčastěji se vyskytující dřevozbarvující houby na dřevě uvádějí *Ceratostomella pilifera*; *Aureobasidium pullulans*; *Cladosporium sp*; *Ophiostoma sp*.

Vinař a kol. (2005) uvádějí, že **dřevokazné houby** jsou takové, které v druhé části degradace vylučují z konců hyf enzymy do dřevěného substrátu, čímž dochází k postupnému rozkladu chemických vazeb stavebních složek dřeva. Dále přestavbou nebo zhuštěním hyf vytváří plodnice, které jsou charakteristické pro každý druh houby. Podle stavební látky, kterou daná houba napadá, rozlišujeme tyto na houby bílého a

hnědého tlení. Houby hnědého tlení (dříve označovány jako houby celulózovorní) napadají celulózu a způsobují měkkou nebo tvrdou hnědou hnilobu. Tyhle jsou hlavní příčinou výrazných změn v mechanických vlastnostech dřevěných konstrukcí. Houby bílého tlení (dříve ligninovorní) rozkládají ve dřevě lignin a způsobují bílou hnilobu. Podle Vinaře a kol. (2005) se v dřevěných konstrukcích vyskytují jen vyjimečně. Reinprecht (2008) rozděluje tyto houby dle způsobující hniloby na houby hnědé hniloby, bílé hniloby a houby měkké hniloby.

Dřevoznehodnocující houby lze rozdělit i podle oblasti, ve které se obvykle vyskytují. Reinprecht (2008) uvádí, že tyto houby atakují dřevo substrátovým myceliem jak živých stromů (parazitické houby), tak i skladovanou suroviny, nebo různé dřevěné výrobky (saprofytické houby). V případě, že houby způsobují velké technické a ekonomické škody na zabudovaném konstrukčním dřevě, tak je označujeme jako dřevokazné houby **domové**. Stejný autor dodává, že existuje jen málo dřevokazných hub, které se vyskytují výhradně v budovách. Vinař a kol. (2005) uvádí nejčastěji se vyskytující houby napadající krovy: Dřevomorka domácí (*Serpula lacrymans*), Koniofora sklepní (*Coniophora putina*), Parnatka Vaillantova (*Poira Vaillantii*), nebo Trámovka plotní (*Gleophyllum sepiarium*). Tyto a další jsou uvedeny v Tab. 1. Jiné druhy těchto hub napadají dřevo na stanovištích, jako jsou sklady dřevní kulatiny, důlní dřevo, podvaly, telekomunikační sloupy, chmelnicové sloupy, mosty, ploty, pergoly, srubové stavby a další. Tyto nazýváme dřevokazné houby **skladové**. Reinprecht (2008) představuje jako nejvýznamnější ze skladových dřevokazných hub Trámovku plotní (*Gleophyllum sepiarium*), Trámovku jedlovou (*Gleophyllum abietinum*), Houževnatec šupinatý (*Lentinus lepidus*), Čechratku sklepní (*Paxilus panuoides*), nebo Outlovku pestrou (*Trametes versicolor*).

Tab. 1 Nejčastěji se vyskytující dřevokazné houby (Reinprecht, 2008, Schmidt, 2007)

Kmen hub	Houby hnědé hniloby	Houby bílé hniloby	Houby měkké hniloby
Příklady hub	Dřevomorka domácí (<i>Serpula lacrymans</i>)	Outkovka pestrá (<i>Trametes versicolor</i>)	<i>Allescheria sp.</i> , <i>Graphium sp.</i> ,
	Trámovka plotní (<i>Gloeophyllum sepiarium</i>)	Donkioporia expansa	<i>Humicola sp.</i> , <i>Chaetomium sp.</i>
	Popraška sklepní (<i>Coniophora puteana</i>)	Pevník chlupatý (<i>Stereum hirsutum</i>)	
Degradované komponenty dřeva	Polysacharidy intenzivně <i>Lignin minimálně</i>	Polysacharidy intenzivně Lignin	<i>Polysacharidy</i> <i>Lignin (nejvíce celulózu v S2 vrstvě)</i>
	enzymatický rozklad polysacharidů, degradace celulózy agresivním oxidačním systémem	erózní forma - souběžné odbourávání polysacharidů i ligninu delignifikační forma - nejprve odbourávání ligninu, poté polysacharidů	Odbourávání všech polymerních složek dřeva vlivem enzymů
Projev hniloby	hnědé odstíny (ztmavnutí), objemový rozklad, příčné a podélné trhliny, výrazně zmenšený objem	bílé a žluté odstíny (zesvětlení), objemový rozklad, objem jen mírně zmenšený	hnědé odstíny (ztmavnutí) povrchový rozklad, příčné i podélné trhliny, zmenšený objem
Fyzikální vlastnosti napadeného dřeva	Pokles hustoty, nárůst nasákavosti, pokles rychlosti šíření ultrazvukových vln	výrazný pokles hustoty, nárůst nasákavosti, pokles rychlosti šíření ultrazvukových vln	Pokles hustoty, nárůst nasákavosti, pokles rychlosti šíření ultrazvukových vln
Mechanické vlastnosti napadeného dřeva	výrazný pokles rázové houževnatosti v ohybu, výrazný pokles statické pevnosti	pokles rázové houževnatosti v ohybu, pokles statické pevnosti	pokles rázové houževnatosti v ohybu, pokles statické pevnosti

Napadení dřevokaznými houbami přináší většinou negativní **změnu fyzikálních nebo mechanických vlastností**. Z fyzikálních veličin je to především hustota dřev, které zásadně koreluje s většinou mechanických vlastností. Zabel a Morell (1992) uvádějí, že při hnědé hnilobě dochází k poklesu až 70 % hmotnosti, přičemž se výrazně mění i objem dřeva z důvodu kolapsu buněk. Stejní autoři uvádí, že pokles hmotnosti dřeva při bílé hnilobě může být až 97 %, přičemž ale nedochází k výrazným změnám objemu. Reinprecht (2008) zmiňuje zvýšenou nasákavost dřeva se zvyšujícím se stupněm degradace. Vodivé buňky jsou jednak vzájemně lépe propojeny díky hnilobě a jednak je výrazně zvýšena pórovitost dřeva. Při hnědé hnilobě pozorujeme pokles navlhavosti a

hlavně tvarových změn s ní spojených. Houby bílé hniloby naopak způsobují zvýšené bobtnání. Reinprecht (2008) rovněž uvádí, že akustické vlastnosti se vlivem hniloby mění výrazně. Změny rychlosti šíření ultrazvukových vln se používají při nedestruktivní defektoskopii dřeva (viz kap. 3.1.2. *Akustické metody*). Jak již bylo zmíněno, hniloba velice negativně ovlivňuje i důležité mechanické vlastnosti dřeva. Obecně má dřevo postižené hnilobou zhoršené pevnostní a pružnostní charakteristiky, především mez pevnosti, moduly pružnosti v tlaku i v tahu a další. Zabel a Morrell (1998) uvádí, že pevnost dřeva klesá spolu s postupujícím rozkladem celulózy, který je výraznější při bílé hnilobě. První stádia bílé hniloby ovšem nejsou tak zjevné jako u hniloby hnědé. Podle Reinprechta (2008) je nejvýraznější pokles mechanických vlastností patrný v mokřém stavu, respektive vždy při zvýšené vlhkosti v intervalu vody vázané. Podle vinaře a kol. (2005) dřevo podléhající hnilobě s úbytkem hmotnosti 6 % vykazuje zhoršení rázové houževnatosti o 50 až 90 %, pokles pevnosti v ohybu až o 60 % a pokles pevnosti v tlaku a stejně tak pokles tvrdosti dřeva až o 28 %.

Poškození dřevokazným hmyzem

Podle Požgaje a kol. (1997) se požerky hmyzu mohou vyskytovat ve dřevě všech dřevin. Na povrchu dřevařského sortimentu se vyskytují jako brázdičky nebo otvory (kruhové či oválné) různé velikosti, které pronikají do hloubky dřeva. Hluboký požerek snižuje mechanické vlastnosti dřeva více než požerek povrchový. Různé druhy dřevokazného hmyzu napadají živé rostoucí stromy, uskladněné dřevo, nebo dřevo zpracované. Dřevo většinou slouží jako potrava pro dřevokazný hmyz nebo jeho larvy, ale mnohým jen poskytuje útočiště a optimální prostředí pro růst a vývoj larev. Zabudované dřevěné konstrukce napadají především červotoči a tesařici. Ostatní čeledi častěji napadají živé nebo uskladněné neodzrněné dřevo. Obecně lze říci, že hmyz má nižší nároky na vlhkost dřeva než houby. Napadají dřevo i při vlhkosti okolo 10 %. Nejčastěji napadající živé dřevo, nebo dřevo skladované jsou Kůrovci (*Scolytidae*), Pilořitky (*Siricoidea*), nebo Hrbohlavci (*Lyctidae*). Hmyz nejčastěji škodící dřevu na stavbách, v konstrukcích a taky na nábytku a muzejních exponátech jsou konkrétně Červotoč proužkovaný (*Anobium punctatum*), Červotoč umrlčí (*Anobium pertinax*),

Tesařík krovový (*Hylotrupes bajulus*), Tesařík fialový (*Callidium violaceum*), Tesařík obrovský (*Cerambyx cerdo*), Tesařík skladištní (*Phymatodes testaceus*), Tesařík smrkový (*Tetropium castaneum*). Optimální životní podmínky pro život dřevokazného hmyzu ve dřevě nebo způsob požerků pro 5 nejčastější zastupitelů můžeme pozorovat v Tab. 2.

Vinař a kol. (2005) uvádějí, že podmínky pro rozvoj dřevokazného hmyzu v interiéru i v exteriéru staveb jsou téměř vždy splněny. Larvy dřevokazného hmyzu poškozují dřevo svými požerky. Vznikají tak vážné škody oslabením průřezu dřevěného prvku. Velikost způsobené škody je závislá na velikosti a množství požerků, nebo výletových otvorů. Nejnebezpečnějším škůdcem stavebního dřeva v našich podmínkách je Tesařík krovový (*Hylotrupes bajulus*). Požerky jeho larev jsou oválné 7 x 12 mm. Obvykle jsou těsně pod povrchem trámu, kde je více bělového dřeva. Na čerstvý výskyt tesaříka poukazují hromádky jemných pilin pod trámy a světlých plošek na trámecích, kde jsou výletové otvory. Tenhle škůdce může úplně zničit celé krovy, stropy, věže a podobně, zejména vyrobené z borového dřeva. Dalším skupina velice nebezpečných škůdců jsou červotoči. Jejich výletové otvory jsou kruhového průřezu o průměru 1,5 až 2,5 mm. Pokud jsou k tomu vhodné podmínky, tak se další generace červotočů vrací opět na stejné místo, až do úplného zničení dřeva. Po napadení dřeva je pro ně typická tzv. červotočina, která je směsí výtrusů a jemných pilin dřeva. Často se vyskytuje spolu s hnilobou dřevomorkového typu. Takto napadené dřevo se pod úderem zcela rozpadá a je kompletně znehodnoceno. Stavební dřevo výrazně poškozují i Dřevokaz čárkovaný (*Xyloterus lineatus*), Mravenci (*Formicidae dp.*), nebo Pilořitky (*Urocerus gigas*), jejichž požerky se často zaměňují s požerky tesaříka.

Tab. 2 Nejčastěji se vyskytující dřevokazný hmyz (Reinprecht, 2008)

Druh dřevokazného hmyzu	Požerky J... Jehličnaté L... Listnaté	Životní podmínky ve dřevě			
		Vlhkost [%]		Teplota [°C]	
		W opt.	W min.- max.	t opt.	t min.- max.
Tesařík krovový (<i>Hylotrupes bajulus</i>)	Interiér J	30 - 35	9 - 65	28 - 30	12 - 38
Tesařík zavalitý (<i>Ergates faber</i>)	Exteriér J	60		30	
Červotoč pronikavý (<i>Anobium punctatum</i>)	Interiér J i L	28 - 30	10 - 50	21 - 24	12 - 29
Červotoč umrlčí (<i>Hadrobregmus pertinax</i>)	Interiér J- uhnílé	30	19 - 55	25 - 26	
Hrbohlav hnědý (<i>Lyctus brunncus</i>)	Interiér L	14 - 16	7 - 23	26 - 27	18 - 30

3.3 Nedestruktivní testování dřeva (NDT)

Vyhodnocení vlastností dřeva může být provedeno téměř dokonale za použitím nedestruktivních technik, které nevyžadují odběr vzorků za účelem testování, ale mohou být použity přímo na dřevostavbě. (Oliveira a kol., 2005)

Hellier (2003) ve své publikaci shrnuje použití nedestruktivního testování dřeva do čtyř základních oblastí:

- hodnocení surovin před zpracováním
- hodnocení materiálu během procesu zpracování
- hodnocení výstupních produktů výroby
- hodnocení produktů a konstrukcí v provozu

Bodig (2000) vysvětluje, že stav zabudovaného dřevěného prvku v konstrukci se dá popsat jako funkce následujících vlastností materiálu: hustota, vlhkost, stupeň biodegradace, teplota materiálu, geometrie prvku a limitující podmínky.

3.3.1 Historie

Začátek používání nedestruktivních testování materiálů lze určit jen velmi obtížně. Mezi tyto metody patří i vizuální průzkum, který používáme od pradávna nejen my- lidé, ale i jiní živí tvorové. Hellier (2003) uvádí jako počátky nedestruktivního testování naslouchání kovářů při kování různých kovů, nebo tvůrce kostelních zvonů při zjišťování kvality materiálů.

Divos a kol. (2007) v publikaci uvedli, že před použitím samotných NTD zařízení se dřevěný materiál hodnotil pouze vizuální prohlídkou a taky dotykem nebo poklepáním na dřevo jiným nástrojem. Podle zvuku, který zkoumaný prvek vydával, je možné odhadnout například vlhkost kulatiny, nebo včas odhalit pokročilé poškození této suroviny.

Pokročilé NDT technologie, jak je známe dnes, se začaly vyvíjet až kolem roku 1920. Zhruba od poloviny 20. století jsme svědky rychlého rozvoje v této oblasti a vývojem spousty nových zařízení na diagnostiku všech druhů používaných materiálů.

3.3.2 Metody nedestruktivního testování dřeva

Vizuální průzkum

Bodig (2000) uvádí, že vizuální prohlídka je běžnou součástí každého průzkumu nebo diagnostiky historických dřevěných konstrukcí. Vizuální zhodnocení spolu s poklepáním kladívkem nebo jiným podobným předmětem a, v lepším případě s mnohaletými zkušenostmi v tomto oboru, bývá mnohdy jediným nástrojem pro návrh sanace běžného krovu nebo menší dřevěné konstrukce.

Tato metoda nemá dostatečně velkou vypovídací schopnost, co se týče zjištění vlastností uvnitř zabudovaného dřeva, ovšem hraje důležitou roli při sortimentaci ať už vstupní suroviny, nebo produktů dřevařské prvovýroby. V současné době existuje spousta norem na třídění především řeziva a jiných dřevařských produktů. Např. norma vydaná pro USA již v roce 1927 s názvem ASTM D245 (*Standard Practice for Establishing Structural Grades and Related Allowable Properties for Visually Graded Lumber*); v současnosti v USA ASTM D245 nebo ASTM D1990; norma S 5756 1997 (*Specification for Visual Strength Grading of Hardwood*) původem z Anglie; v Evropě byly v roce 1995 vydány směrnice EN 518; nebo Italská norma UNI 11119:2004, která se jako jedna z mála zabývá vizuálním hodnocením zabudovaných prvků v dřevěných konstrukcích. Stejně tak hraje vizuální průzkum roli i v dalších odvětvích průmyslu, kde může být inspekce prováděna člověkem.

Měření vlhkosti

Horáček (2008) popisuje dřevo jako navlhavý hygroskopický materiál, který přizpůsobuje svoji vlhkost okolnímu prostředí. Rovněž zavádí pojem rovnovážná vlhkost dřeva (RVD), což je ustálená vlhkost při daných podmínkách prostředí s určitou relativní vzdušnou vlhkostí a teplotou. Takovýto ustálený stav se potom nazývá stav vlhkostní rovnováhy (SVR). Struktura dřeva vytváří kapilárně-porézní materiál s pórovitostí okolo 50-60 %. Dřevo je tak schopné absorbovat vodu jak v plynném či kapalném skupenství na svém měrném vnitřním povrchu.

Jelikož vlhkost ovlivňuje výsledky nedestruktivního nebo semi-destruktivního měření, nesmí být její měření při průzkumech „*in situ*“ opomíjeno. Vlivem vlhkosti na mechanické i fyzikální vlastnosti dřeva se zabývali např. Ross a Pellerin (1994); Požgaj (1997); nebo Kollman (1951).

Ross a Pellerin (1994) uvádí, že vlivem zvýšené vlhkosti jsou vytvořeny ideální podmínky pro rozvoj biotických škůdců dřeva a dochází tak k významnému zhoršení mechanických vlastností prvků zabudovaných v konstrukcích. Z tohoto důvodu se stalo zjišťování vlhkosti jedním z prvních požadavků při provádění průzkumů „*in situ*“

Vlhkost dřeva měříme buď přímo gravimetrickou metodou, nebo nepřímo pomocí přístrojů na zjišťování vlhkosti dřeva. Gravimetrická metoda je založena na porovnávání hmotnosti vzorku absolutně vysušeného se vzorkem nominálním a je popsána normou ČSN 49 0103 (*Drevo. Zisťovanie vlhkosti pri fyzikálnych a mechanických skúškach*). Pro tuto metodu je potřeba destruktivního odebrání vzorků a jejich vážení a proto je pro terénní průzkum naprosto nevhodná. Zároveň je ovšem nejpřesnější ze všech metod určování vlhkosti a rovněž bývá používána jako referenční metoda pro určování přesnosti jiných.

Pilát (2015) uvádí, že nepřímé měření vlhkosti u dřevěných materiálů nejčastěji probíhá na principu měření elektro-fyzikálních veličin, které na vlhkosti dřeva vykazují závislost. Měřena je tak elektrická veličina, která však přímo nepředstavuje materiálovou charakteristiku. Požgaj (1997) rozděluje vlhkoměry podle principu práce na odporové, kapacitní, absorpční, mikrovlnné a jiné. Odporové metody měří elektrický odpor materiálu, kapacitní měří kapacitu a ztrátový činitel elektrického proudu, absorpční vlhkoměry měří energii absorbovanou materiálem. Při měřeních vlhkosti zabudovaného dřeva v konstrukcích se nejčastěji využívají příruční vlhkoměry odporové a kapacitní.

Akustické metody testování

Hasníková a Kuklík (2013) představují zvuk jako podélné mechanické vlnění, kdy částice přenášející energii kmitají ve směru pohybu vlny. Ultrazvuk definují jako zvuk, který zdravé lidské ucho není schopné slyšet, přičemž rozsah slyšitelnosti člověka je 16

Hz – 20 kHz. Práh slyšitelnosti zdravého lidského ucha se uvádí v rozmezí 16–20 kHz. Everest (2001) popisuje ultrazvuk jako mechanické vlnění o frekvenci vyšší než 16 kHz.

Podle Bucur (1995) se každý jednotlivý stavební element ve dřevě chová jako rezonátor a fyzikální parametry buněčné stěny přímo ovlivňují ultrazvukové pole dřeva.

Požgaj a kol. (1997) uvádí poměr šíření rychlosti zvuku v podélném směru a kolmo na vlákna ve směru radiálním a tangenciálním přibližně 15:5:3. Závisí od dřeviny, hustoty a modulu pružnosti a zvýšená vlhkost na něj má negativní vliv.

Lokální poruchy dřevěného materiálu zabudovaného ve stavbě mohou ovlivnit jeho kvalitu. Jejich výskyt by měli odhalit nedestruktivní přístroje na diagnostiku těchto konstrukcí, z nichž je řada založena na principu měření rychlosti šíření akustické či tlakové vlny. Tyto v materiálu způsobují elastickou deformaci. Kloiber (2007) uvádí, že nejpoužívanější přístroje na měření dřeva jsou *Sylvatest*, *Arbosonic Decay D.*, *Pundit* nebo *Tico*, které pracují s frekvencemi od 20 kHz do 500 kHz. Hasníková a Kuklík (2013) varují, že pro prvky větších rozměrů je vhodné použít ultrazvuk o nižších frekvencích, protože vlnění je na delší vzdálenosti méně tlumeno. Naopak by tomu mělo být u laboratorního měření na malých vzorcích, kde se běžně používá ultrazvuk o frekvencích nad 1 MHz.

Tab. 3 Rozdělení zvuku dle frekvenčního rozsahu (Blauert a Xiang 2009)

Sound category	Frequency range
Audible sound	~16 Hz- 16 kHz
Ultrasound	> 16 kHz
Infrasound	< 16 Hz
Hypersound	>1 GHz

Čím menší je hustota dřeva a zároveň čím větší je statický modul pružnosti dřeva, tím větší je rychlost šíření zvuku ve dřevě. (Horáček, 2008) Rychlost šíření zvuku vypočítáme jednoduše:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad [\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]; \text{ nebo experimentálně: } c = \frac{d}{t} \quad [\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$$

Kde:

c..... rychlost šíření zvuku [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]

d..... vzdálenost [m]

t..... čas průchodu elastické vlny [s]

ρ objemová hmotnost materiálu [$\text{kg}\cdot\text{m}^3$]

E..... Youngův modul pružnosti [Pa]

Dynamický modul pružnosti lze vypočítat ze vztahu:

$$E_D = \rho \cdot c^2 \quad [\text{Pa}]$$

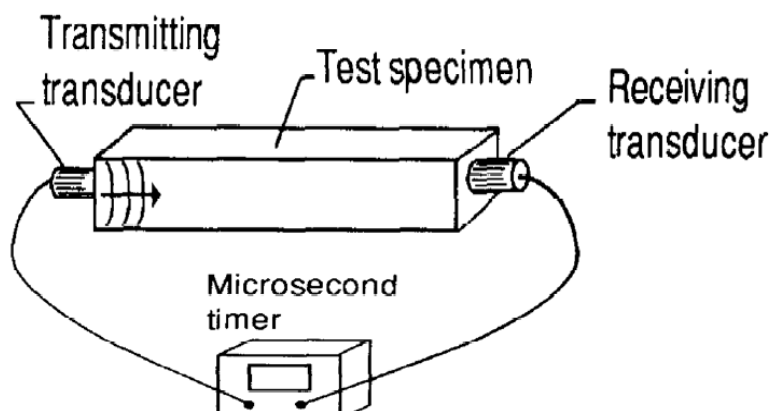
Kde:

E..... Youngův modul pružnosti [Pa]

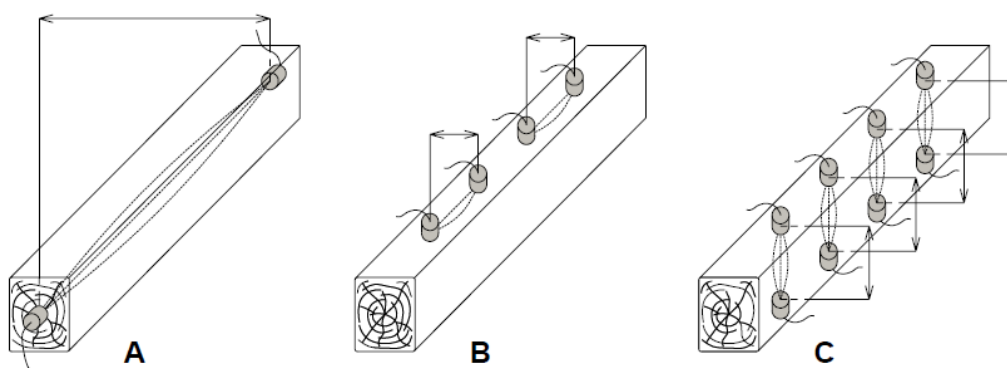
c..... rychlost šíření zvuku [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]

ρ objemová hmotnost materiálu [$\text{kg}\cdot\text{m}^3$]

Hasníková a Kuklík (2013) uvádí, že dynamický modul pružnosti (E_{dyn}) bývá o 10–15 % větší, než modul pružnosti statický (E_{stat}), který zjistíme při standardních statických zkouškách. Vztahem mezi dynamickým a statickým modulem pružnosti se zabývali např. Ross a kol. (1991), kteří uvádí pro přepočet těchto veličin následující rovnici: $E_{dyn} = 0,979 E_{stat} + 0,0408$. Oliveira (2003) uvádí: $E_{dyn} = 1,12 E_{stat} + 488,6$.



Obr. 1 Schéma systému měření ultrazvukem pro měření rychlosti průstupu zvuku různými dřevěnými výrobky (Ross a Pellerin 1994)



Obr. 2 Možnosti přikládání sond při měření ultrazvukem: A. přímé měření podél vláken B. nepřímé měření podél vláken C. přímé měření napříč vláken (Kloiber, 2007)

3.3.3 Semi-destruktivní metody testování dřeva

Odporové zarážení trnu (Pilodyn)

Poškození dřeva při testování pomocí zařízení *Pilodyn* je téměř zanedbatelné. Proto tuto metodu řadíme mezi semi-destruktivní při stavebně technických průzkumech zabudovaného dřeva. Typ přístroje *PILODYN 6J Forest* je vybaven trnem o průměru 2,5 mm a délce 40 mm, který je do dřeva vystřelován konstantní silou 6 J. Jiné verze tohoto přístroje se mohou lišit ve velikosti úderové síly, nebo možnosti opakovaného výstřelu trnu. Pomocí tohoto zařízení lze rychle odhadnout hustotu zabudovaného dřeva. Kloiber (2007) uvedl, že pokusy o využití přístroje *Pilodyn* pro odhalení vlastností uvnitř dřevěného prvku byly neúspěšné.

Kotlínová a Kloiber (2010) uvádějí výhody a nevýhody tohoto zařízení. Výhody jsou jednoduchost, nízká váha, velmi malé poškození materiálu při testování, lze doplnit například měření ultrazvukem a poskytnout tak lepší obraz o stavu celého prvku, zařízení je vhodné pro odhalení poškození měkkou hnilobou, která se projevuje na povrchu dřevěného prvku. Naopak nevýhody jsou malá hloubka penetrace, která poskytuje jen povrchovou informaci o mechanickém stavu prvku, je potřeba velkého počtu měření k získání relevantních výsledků, měření je podstatně ovlivněno vlhkostí a tak musí vždy proběhnout korekce obsahu vlhkosti pro každé měření.

Kloiber (2007) uvádí rovnice pro výpočet hustoty dřeva na základě zjištění vlhkosti dřeva hloubky zaražení trnu:

$$\rho_{12} = -0,027102 t_{p,12} + 0,727987$$

$$t_{p,12} = t_p (1 - 0,007\Delta w)$$

$$\Delta w = w - 12$$

Kde:

ρ_{12} hustota dřeva při vlhkosti 12 % [g/cm³]

$t_{p,12}$ hloubka vniku trnu do dřeva o vlhkosti 12 % [mm]

t_p hloubka trnu do dřeva o známé vlhkosti [mm]

w vlhkost dřeva při měření [%]



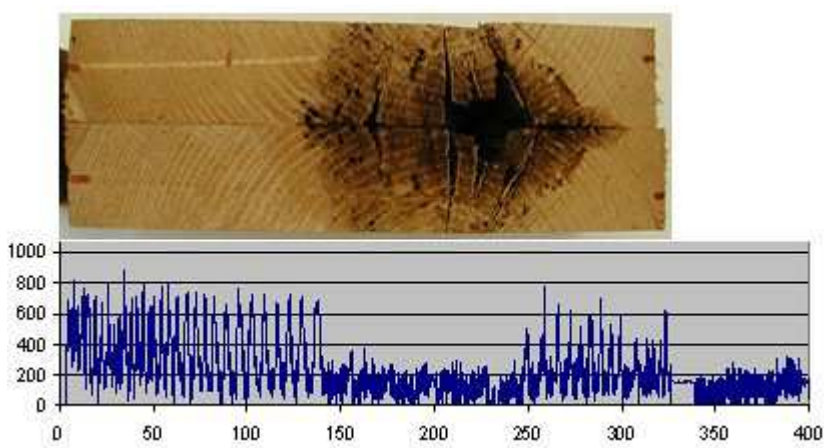
Obr. 3 Příklad přístroje PILODYN 6J (Kuklík a Hasníková, 2013); detail trnu přístroje (Kotlínová a kol., 2008)

Odporové vrtání (Resistograph)

Horáček (2007) uvádí, že testování dřeva pomocí přístroj *Resistograph* spočívá v zaznamenávání spotřebované energie během vrtání zkoušeného prvku. Používají se wolframové vrtáky o průměru 1,5 až 3 mm s takovou úhlovou geometrií, která zaručuje soustředění rezného odporu v ocelové špičce vrtáku. Tím je docíleno, že v okolí dřívku nedochází k nadměrnému tření a výsledek tak není ovlivněn. Uvnitř přístroje se nachází speciální teleskop, který stabilizuje vřetenem vrtáku. Přístroj obsahuje 2 elektrické motory. Jeden zaručuje konstantní posun vrtáku 30 cm. min⁻¹ a druhý konstantní otáčky 6 000 ot. min⁻¹. Výstupem z tohoto zařízení je hustotní profil (tzv. *dendrogram*). Osa Y představuje záznam potřebné energie na udržení neměnné rychlosti vrtání, osa X představuje rozměr prvku ve směru vrtání. Výstupní parametr se nazývá *Resistance*

measure (RM), který udává poměr plochy pod křivkou S (mm^2) a šířkou měřeného úseku h (mm). *Resistance measure* se udává v jednotkách *Bits*.

Kloiber a Kotlínová (2010) představují *Resistograph* jako jednu z nejpoužívanějších metod při stavebně technických průzkumech v dnešní době. Rinn a kol. (1996) uvádějí, že hodnoty naměřené přístrojem *Resistograph* úzce korelují s hustotou suchého dřeva z hustotního profilu naměřeného rentgenem. Na *Obr. 4* můžeme vidět výstupní graf zvaný *dendrogram*, který ukazuje typický průběh křivky při sníženém odporu materiálu způsobený hnilobou. Kloiber a Kotlínová (2010) řadí mezi výhody této metody okamžitou interpretaci výsledků přímo v terénu, jednoduché ukládání naměřených dat a relativně přesné určení stavu prvku i v jeho vnitřních vrstvách. Mezi hlavní nevýhody patří skutečnost, že vrtání musí proběhnout v čistě radiálním směru. V opačném případě dochází ke znehodnocení výsledků. Další nevýhody tohoto přístroje jsou poměrně zdlouhavá měření, invazivní povaha v případě několikanásobného vrtání v jednom prvku a v neposlední řadě je potřeba volný prostor okolo měřeného místa, což je dáno konstrukcí přístroje.



Obr. 4 Dendrogram dřevěného prvku, který je poškozený ve vnitřních zónách (Kloiber, 2007)

Zkoušení radiálních vývrtů

Rovněž metoda zkoušení radiálních vývrtů patří mezi semi-destruktivní metody. Princip spočívá v odebrání radiálního vývrtu pomocí speciálně uzpůsobeného vrtáku a jejich následné testování v laboratorních podmínkách v čelistech s vyfrézovanými drážkami. Díky tomuto postupu je možné testovat dřevo na tlak ve směru vláken.

Odběr radiálních vývrtů a současně přípravek pro testování můžeme pozorovat na *Obr. 5*. Průměr odebraného válcovitého vzorku je 5 mm a délka by měla být minimálně 20 mm. To odpovídá i požadavkům evropských norem pro testovací vzorky na tlak.

Drdácký a kol. (2004) uvádějí, že výsledkem této zkoušky je napěťovo-deformační diagram. Odběrem radiálních vývrtů získáme současně vzorky vhodné pro testování hustoty, vlhkosti, pevnosti nebo modulu pružnosti dřeva. Zároveň je vzorky možné použít pro určení druhu dřeva, mikroskopickou analýzu, vizuální hodnocení degradace a v případě dostatečně dlouhých vzorků i pro dendrochronologické datování. Tlaková pevnost vychází z rovnice:

$$f_c = \frac{F_{\max}}{l \cdot d_c} \quad [\text{Mpa}]$$

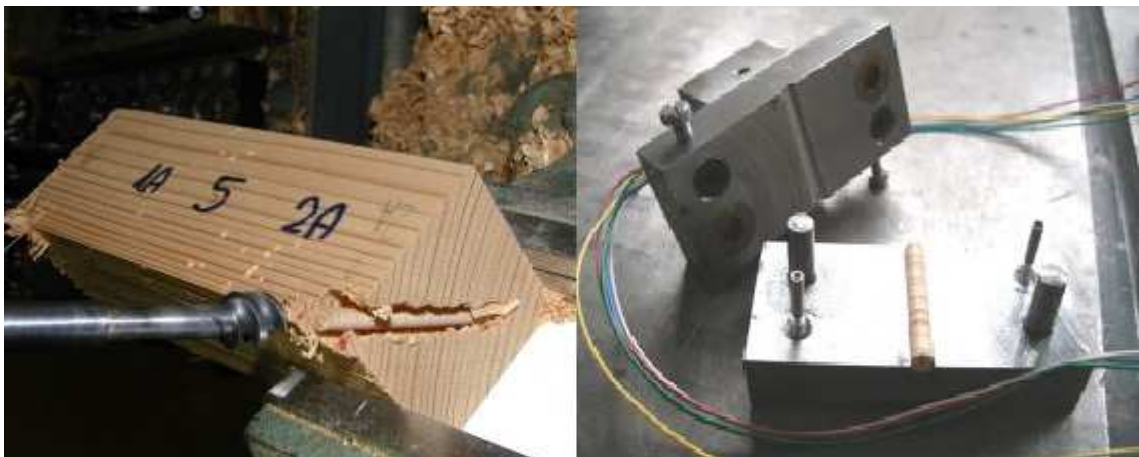
Kde:

f_c tlaková pevnost [MPa]

F_{\max} maximální pevnost [N]

l, d_c délka a průměr odebraného vývrtu [mm]

Kloiber a Kotlínová (2010) uvádějí, že odběry radiální vývrtů nemají vliv na statiku konstrukcí. Lze je použít i ke stanovení jiných fyzikálních a mechanických vlastností s velkou předností. Mezi nevýhody patří nutnost zachování čistého radiálního směru při vrtání a z toho plynoucí potřeba odebrání většího množství vzorků. Přístup pro vyvrtání takového vzorku může být ve stavbách mnohdy omezený. Zásadní nevýhodou může být fakt, že normové vývrty lze bez problémů odebírat jen ve zdravých částech prvku, čímž mohou být výsledky zkresleny.



Obr. 5 Detail vrtáku pro radiální vývrty a zatěžovací přípravek pro zkoušku radiálního vývrtu

Videoskopie

Videoskopie je označována za nejjednodušší metodu pro zjišťování stavu zabudovaného dřeva. Jedná se o tzv. „prodloužené oko průzkumníka“ – endoskop či *videoskop*. Pomocí videoskopie jsme schopni určovat například přítomnost některé z druhů hniloby, odhadovat vývojové stádium hub, změny barvy, zborcení, nebo jiné mechanické poškození (Kloiber, 2007). *Videoskop* obvykle obsahuje zdrojovou jednotku, ovládací panel s displejem a pružný bovden s mikrokamerou a světlem na konci. Zařízení přenáší obraz z kamery na konci bovdenu na displej přístroje. Video může být rovněž uloženo na externí paměťovou jednotku. Předpokladem pro použití této metody je provedení otvoru do sledovaného prvku o průměru 10 až 12 mm.

Roztlačování čelistí ve vývrtnu (wood testKLOIBer)

Zařízení představují Kloiber a kol. (2014). Navrhované zařízení využívá principu tlačných čelistí („mini tlakový test“) oddělených od sebe ve vyvrtaném otvoru o průměru 12 mm tak, aby výsledek co nejvíce odpovídal čistému zatížení v tlaku v laboratorních podmínkách. Měření může být provedeno v libovolné hloubce dřevěného nosníku. Výstup ze zařízení je konvenční pevnost a modul přetvárnosti v tlaku (MOD_L) rovnoběžně se směrem vláken.

Zařízení je navrženo k měření mechanických vlastností dřeva s použitím nedestruktivního nebo semi-destruktivního vyšetření jeho chování během zatížení pomocí malého vloženého konektoru v předvrtaném otvoru. Zařízení může být použito jak v laboratoři, tak v terénním měření při zjišťování stavu a kvality dřevěného prvku. Výstupem je graf závislosti deformace na napětí způsobené tlakem symetricky uložených oddělených čelistí v předvrtaném radiálním otvoru o průměru 12 mm.

Výhoda zařízení spočívá v tom, že umožňuje postupné zaznamenávání síly a posunutí čelistí v různých hloubkách, které odpovídají rozměrům běžně používaných konstrukčních prvků. *Wood testKLOIBer* se pokládá na testovaný prvek (obvykle konstrukční element obdélníkového průřezu) prostřednictvím válcového pláště, který umožňuje měření ve čtyřech hloubkových pozicích v předvrtaném otvoru. Aretace pláště je zajištěn pomocí dvou rýhovaných šroubů, pro pozice (základní hloubky) 5–25

mm, 35–55 mm, 65–85 mm, a 95–115 mm. Když je měřicí část zařízení vložena do vyvrtaného otvoru a zařízení umístěno na testovaném elementu, zaoblené čelisti jsou roztlačovány od sebe směrem do stěn otvoru. Maximální hloubka vtlačení čelistí je 1,5 mm. Zaoblené čelisti jsou 5 mm široké a 20 mm dlouhé. Čelisti obsahují také flexibilní ramena, jejichž pohyb při tlačení zajišťuje roztlačující bronzový klín namontovaný na spodním konci táhla pomocí čepu a šroubu. Vrcholový úhel klínu je 15°. Tento úhel není samosvorný a k uvolnění čelistí postačuje uvolnění rozpínající síly.

Síla potřebná k tažení táhla je postupně zaznamenávána a kalibrována na skutečnou sílu zatěžujícího konektoru za současného měření vzdálenosti pohybu čelistí. Signály jsou přenášeny bezdrátově do přenosného počítače, kde jsou dále zpracovány. Mechanické vlastnosti byly stanoveny použitím záznamu naměřených dat ve formě pracovního diagramu (*stress-strain diagram*) s nahrávkou síly použité pro vytahování táhla. Osa X reprezentuje posunutí tlačných čelistí směrem od sebe, osa Y ukazuje sílu potřebnou pro roztlačení čelistí. Maximální síla (F_{MAX}) – mez kluzu, vznikla z průsečíku tangent elastických a plastických částí pracovního diagramu. Konvenční pevnost v tlaku ($CS_{C(L)}$) byla určena jako podíl mezního zatížení a plochy tlačných čelistí. Modul pružnosti nemůže být spočítán přímo z diagramu. Modul přetvárnosti byl stanoven pomocí úhlu křivky proložené lineární částí nahrávající síly a posunutí. *Wood testKLOIBer* pozorujeme na *Obr. 6* nebo *Obr. 14* (kap. 4.3.).



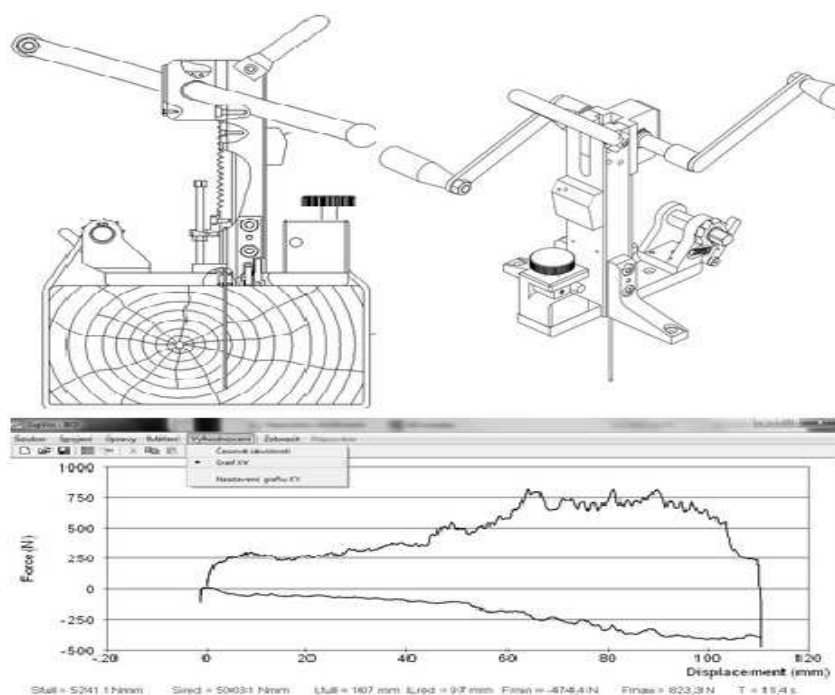
Obr. 6 Otláčení čelistí viditelné na řezu testovaným prvkem (Kloiber a kol., 2014)

Měření mechanického odporu proti vnikání trnu

Tento relativně nový přístroj pracuje na principu měření odporu proti pozvolnému vnikání tělesa do hloubky prvku, která odpovídá běžným rozměrům dřevěných prvků používaných ve stavebnictví. Dále lze nepřímo stanovit hustotu materiálu nebo některé mechanické vlastnosti. Přístroj může sloužit i pro zpřesnění testování jinými metodami, např. akustickými.

Konstrukci tohoto přístroje podrobně popisují Kloiber a kol. (2013). Hlavní části zařízení jsou: základna, těleso vedení a těleso pohybového ústrojí. Síla lidských paží je pomocí hřídele přenášena na ozubené kolo umístěné v pohybovém ústrojí. Ozubené kolo pohání ozubený hřeben umístěný v tělese vedení. Na ozubeném hřebenu je umístěn siloměr (5 kN). K siloměru je přišroubován zatlačovací trn vyrobený z pružinové oceli o průměru 2,5 mm a délce 120 mm. Trn je opatřen půlkulatým hrotem. Snímací čidlo snímače posuvu je pevně spojeno s tělesem vedení. Vysílač je umístěn v zadní části tělesa a je bezdrátově připojen s počítačem.

Výstupem je záznam snímání v podobě pracovního diagramu. Osa X představuje hloubku zatlačení trnu, osa Y odpovídá síle potřebné k zatlačení trnu. Vrcholy v grafickém záznamu představují místa s vyšším odporem dřeva a naopak. Konstrukce i výstupní graf přístroje jsou zobrazeny na Obr. 7.



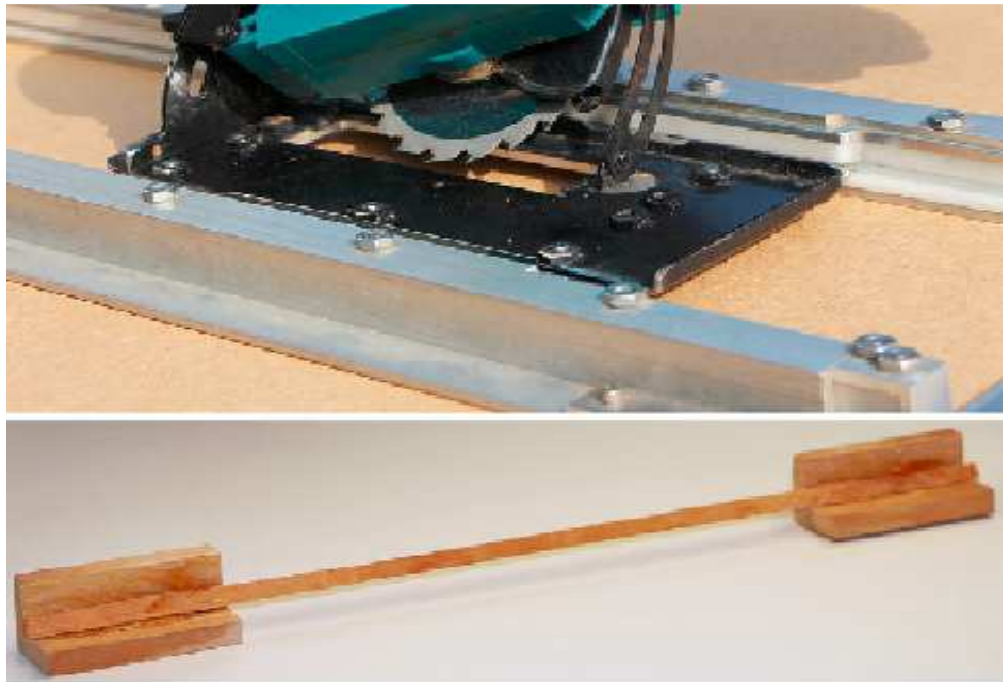
Obr. 7 Konstrukce a výstupní graf přístroje se zatlačováním trnu pro diagnostiku zabudovaného dřeva (Kloiber a kol., 2013)

Ostatní používané metody testování

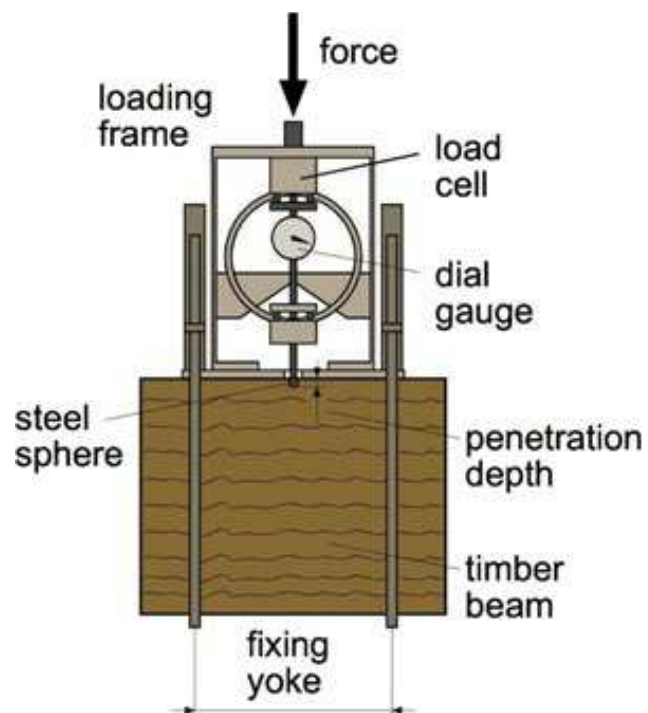
Nároky na diagnostické zařízení pro dřevěné konstrukce jsou neustále větší. Tento fakt vytváří tlak na vývojáře takovýchto zařízení, kteří jsou tak nuceni vyvíjet dokonalejší diagnostické nástroje. Ty by měly být pokud možno co nejméně destruktivní, samozřejmě mobilní, konstrukčně vyřešeny tak, aby práce s nimi byla jednoduchá a možná i v těžko přístupných místech. Nejdůležitějším požadavkem zůstává měření takových parametrů, které co nejvíce korelují s mechanickými vlastnostmi dřeva. Detailně popsat všechny dostupná zařízení by bylo příliš zdlouhavé pro potřeby Diplomové práce. Proto se autor rozhodl ostatní používané metody pouze zmínit v této kapitole.

Nedávno byly úspěšně použity metody jako „vtlačení kolíku“, „vytahování šroubu“ nebo test tvrdosti. Nevýhody zmíněných technik spočívají v tom, že jejich výsledky více korelují s fyzikálními vlastnostmi než s mechanickými a také je potřeba odebrat vzorky pro laboratorní test, které zvyšuje časovou a finanční náročnost prohlídky (Kloiber a kol., 2014).

Thomas a kol. (2014) uvádí například mikro vzorky pro stanovení tahové pevnosti (*Micro-specimens to determine tensile strength*) nebo stanovení Youngova modulu pružnosti v tahu při zatěžování středně velkých vzorků (*Tensile Young's modulus of mesospecimens*), což jsou obdoby normovaná tahové zkoušky na různě velkých vzorcích. Dále odvození Youngova modulu pružnosti na základě testu tvrdosti (*Young's modulus derived by hardness test*) nebo stanovení smykové pevnosti při vytahování šroubu (*Shear strength of screw withdrawals*). (Obr. 8 a Obr. 9)



Obr. 8 Tahová zkouška na mikro vzorcích (Thomas a kol., 2014)



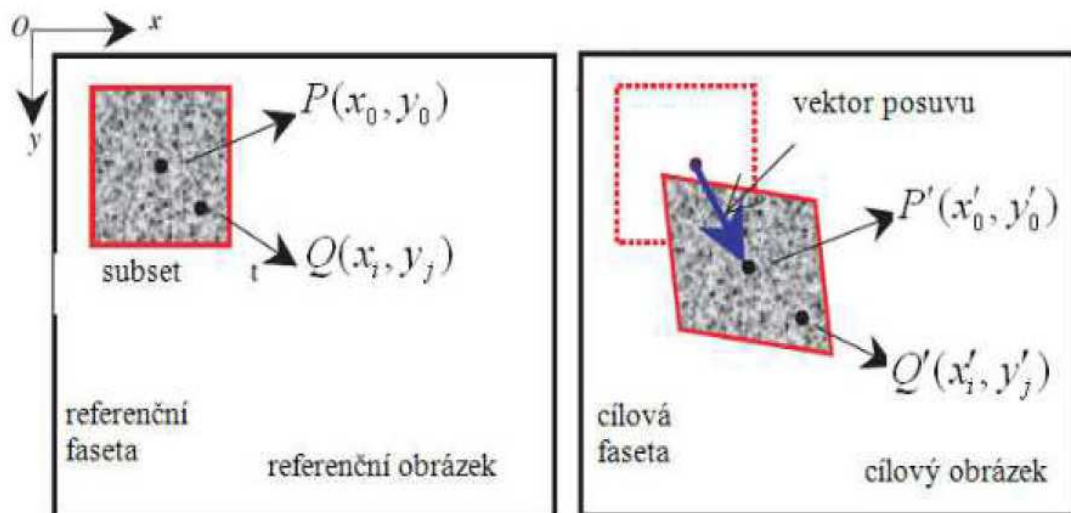
Obr. 9 Zjišťování modulu pružnosti na základě testu tvrdosti (Thomas a kol., 2014)

3.4 Digitální korelace obrazu (DIC)

Dle Petterse a Ransona (1982) je DIC (*Digital image correlation*) bezkontaktní optická metoda, která pracuje na principu vyhodnocení změny polohy kontrastního nepravidelného vzoru (tzv. „*speckle pattern*“) na povrchu tělesa. Dle Daika (2011) slouží pro přesné určování posuvů a deformací na rovinném, ale i prostorovém tělese. Pomocí matematické operace korelace je vyhodnocována změna polohy. Hledání posunutí určitého bodu je tak převedeno na hledání maxima korelační funkce. Ta vychází z obrazu tělesa před deformací v porovnání s obrazem tělesa po deformaci, přičemž zkoumaný obraz je tvořen pixely ve stupních šedi. Velikost těchto pixelů je závislá na rozlišovacích schopnostech měřicí techniky, tedy digitálních kamer a taky na rozměru analyzované oblasti (Sutton a kol. 2009). Daika (2011) uvádí, že hlavním nositelem informací pro korelaci je struktura materiálu zkoumaného tělesa. Obvykle se pracuje s uměle vytvořenou mapou bodů (tzv. „*muster*“), ale v některých případech lze využít i přirozené různorodosti povrchu zkušební vzorku.

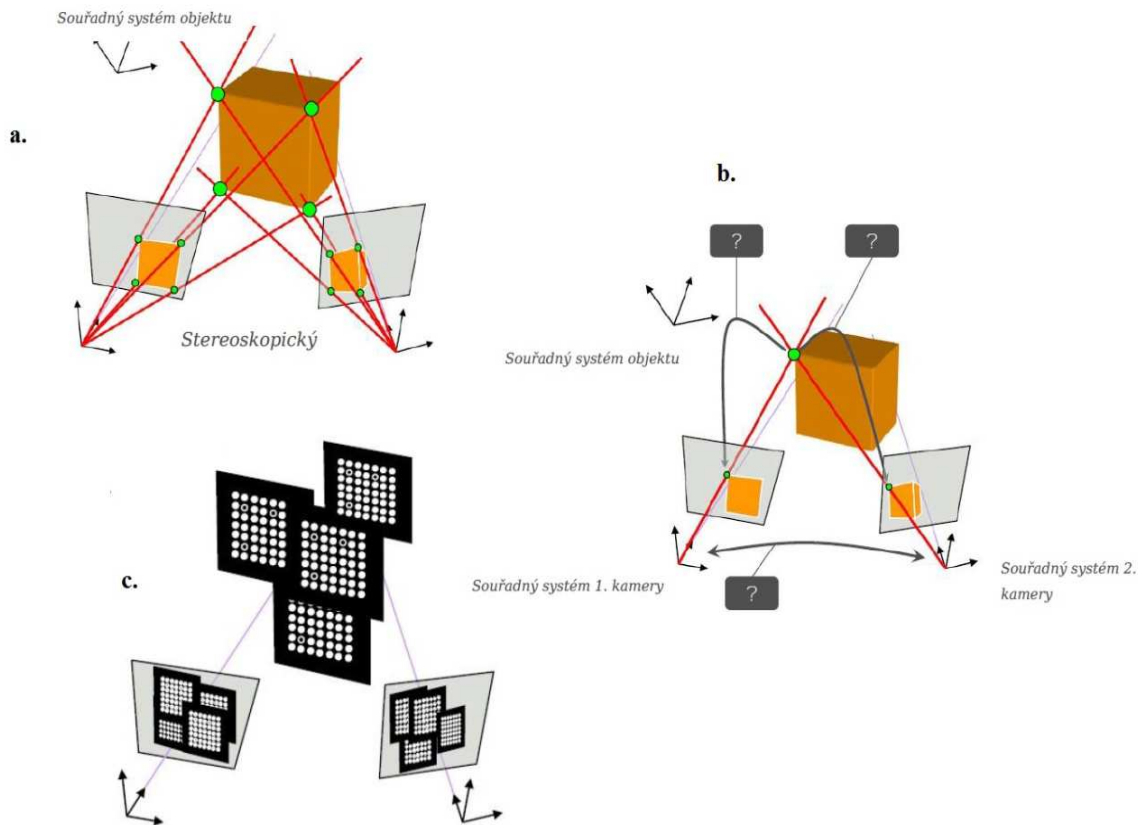
Dle dokumentu *TestingGuide Vic- 3D* (2007) vychází digitální korelace obrazu z množiny skutečností:

- Oblast, kterou chceme analyzovat je opatřena kontrastním vzorem a je virtuálně pokryta pixely o určité velikosti (viz výše)
- Pomocí diskrétní funkce, která udává úroveň šedi každého pixelu, jsou popsány optické vlastnosti těchto pixelů
- Korelační analýza je počítána pouze na vymezených množinách pixelů, ozn. *fasety* („*subset*“)
- Předpokládá se homogenní pole posuvů uvnitř každé *fasety*
- Počáteční stav *fasety* je popsán diskrétní funkcí $f(x, y)$, který je v procesu přetváření mapován na diskrétní funkci $g(x', y')$; (princip znázorněn na *Obr. 10*) (Janíček a kol., 2013)



Obr. 10 Janíček, Marek a kol. (2013) Znárodnění principu posuvu bodů ve fasetě

Sebera a kol. (2013) popisují 3D DIC jako nástroj podobný lidskému oku, jelikož 2 snímky poskytují dostatečnou informaci k postihnutí 3D objektů. U této technologie je nutná dvojnásobná korelace obrazu: 1. Stereokorelační matching; 2. Časový matching („tracking“). Pro získání trojrozměrné struktury použitím dvou snímků se využívá tzv. *stereotriangulace*, která vyžaduje výpočet průsečíků optických paprsků a proto je nezbytné kalibrovat soustavu na společný souřadný systém. Pro kalibraci je třeba získat 1 set *extrinických parametrů* (vzdálenost mezi kamerami) a 2 sety *intrinických parametrů* (vzdálenost obou kamer od objektu. Pomocí fotek kalibračních tabulek v různých pozicích systém tyto parametry vypočítá. Po kalibraci je možné měřit posunutí a následně vypočítat poměrnou deformaci v triangulačním schématu, stejně jako u metody konečných prvků.



Obr. 11 a. stereoskopický souřadný systém; b. princip stereotriangulace; c. kalibrace systému (Correlated Solutions Inc.)

Sebera a kol. (2013) uvádějí výhody DIC: nekontaktní, přenosné zařízení, udává lokální a globální deformace před a po deformaci, eliminuje optické komponenty jako laser, při měření není potřebný vibro-izolační stůl, příprava vzorků je jednoduchá, měřit lze v jakémkoliv měřítku. V oblasti nauky o dřevěném materiálu s DIC můžeme měřit například v oblastech standardního testování (E tlak, tah, ohyb), sesýchání a bobtnání, creep, šíření trhliny nebo delaminaci, zjišťování Poissonových čísel, vlastních frekvencí (tzv. *Chladního obrazce*), testování dřevěných spojů, nebo k ověřování konečně-prvkových modelů.

4 Materiál a metodika

4.1 Experiment

V rozsáhlém experimentu autora zařízení, Ing. Michaela Kloibera, PhD., bylo provedeno měření pomocí zařízení *wood testKLOIBer* a dalších metod na celkem 20 trámech ze dřeva Smrku ztepilého (*Picea abies*) o délce 8 m a příčném profilu 200 x 240 mm. Tyto trámy odpovídají běžně používaným prvkům v historických dřevěných konstrukcích na našem území. Trámy byly vysušeny a klimatizovány na vlhkost 12 %. Do každého trámu byly vyvrtány 2 otvory o průměru 12 mm v čistě radiálním směru. Rozestupy mezi otvory byly 100 mm a hloubka vrtu přibližně 130 mm, což umožnilo měření pomocí zařízení *wood testKLOIBer* ve čtyřech vrstvách: 1 vrstva (hloubka 5-25 mm), 2 vrstva (35-55 mm), 3 vrstva (65-85 mm), 4 vrstva (95-115 mm).

Hlavní náplň této diplomové práce bylo měření pomocí zařízení *wood testKLOIBer* za současného snímání technologií DIC. K tomuto účelu byl zhotoven na každém trámu třetí otvor. Vzorky pro tohle měření byly rozřezány tak, aby měření probíhalo ve druhé vrstvě (hloubka 35-55 mm), aby čelisti zařízení přesahovaly ven ze vzorku a aby měření pomocí kamer DIC probíhalo v rovině rovnoběžné s osou přístroje. Zhotovení vzorků můžeme vidět na *Obr. 12*, celou měřicí aparaturu pak na *Obr. 13*. Před samotným měřením byl každý vzorek opatřen jemným nástřikem černou barvou pro vytvoření kontrastního nepravidelného vzoru (viz kapitola 3.4.).



Obr. 12 Příprava vzorků a kalibrace kamer pro měření DIC

Po upnutí vzorku ke stolu a kalibraci obou použitých kamer mohlo začít samotné měření. Měřicí část přístroje byla zasunuta do testovaného vzorku a současně přiložen *wood testKLOIBer* pomocí válcovitého pouzdra s malými hroty. Měření pomocí přístroje a současně DIC bylo synchronizováno slovně. Měření proběhlo ve směru podélném a následným pootočením přístroje o 90 ° i v tangenciálním směru. Celkem tedy 40 měření přístrojem za současného snímání metodou DIC.



Obr. 13 Fotografie aparatury při měření wood testKLOIBerem při současném snímání pomocí DIC

Mechanické vlastnosti byly určeny na základě pracovního diagramu zařízení (viz *Obr. 14*). Maximální síla (F_{max}) byla stanovena jako průsečík tečen elastické a plastické části průběhu pracovního diagramu. Konvenční pevnost v tlaku ($CS_{C(L,T)}$) byla stanovena z podílu mezního zatížení a akční plochy zatlačovaných čelistí. Ze sklonu přímky elastické části diagramu byl stanoven modul deformability (přetvárnosti).

Data získaná z měření DIC byla dále zpracována pomocí softwaru *Vic-3D 2010*. Postup byl následující: Nejprve bylo zapotřebí nahrát snímky z měření za pomoci adresáře *Project; Speckle images*. Následně byla pomocí nástrojů *AOI tools* nadefinována oblast zájmu. Dále kalibrace přes adresář *Calibration; From project file* a vybráním příslušného souboru uloženého z kalibrace aparatury před zahájením samotného měření. V této fázi bylo možné přistoupit k samotnému výpočtu přes *Data;*

Analysis a příkaz *Run*. Samotný výpočet trval přibližně 2 minuty. Jako referenční vzorek byl stanoven vždy 60. snímek v pořadí, což odpovídalo lineární části pracovního diagramu pořízeného zařízením *wood TestKLOIBer*, který zaznamenává vynaloženou energii vzhledem k posunutí čelistí. Rovněž do textového souboru zaznamenává čas od zmáčknutí spouště pohonu přístroje. Každý z takto získaných referenčních snímků byl dále upravován v části *Postprocessing*. Opět pomocí nástrojů *AOI tool* byla oblast kolem čelistí označena po obvodu spojitou čarou s body. Dále bylo potřeba uložit data do textového souboru přes adresář *Data; Save data*. Exportovány byly pouze E_{xx} ; E_{yy} a E_{xy} , tedy poměrná deformace ve směru podélném, tangenciálním a smyková deformace. Následně byla data převedena do tabulkového editoru *Microsoft Excel* a pomocí jeho funkcí byly vybrány lokální extrémy poměrných deformací ze zkoumané oblasti. Ty byly přeneseny do přehledné tabulky (*Tab. 4, Kap. 5.1*) a dále zpracovány podle statistických metod.

Pro ověření funkce semi-destruktivního přístroje bylo využito srovnání měření s testováním standardních normovaných vzorků destruktivními testy na univerzálním zkušebním stroji *Zwick Z050* a vyhodnocení výsledků pomocí softwaru *TestXpert* v 11.01. Základní zkoumané parametry a jejich případný vliv na mechanické vlastnosti byly: hustota dřeva, pevnost dřeva v tlaku rovnoběžně s vlákny (SC_L), modul pružnosti v tlaku rovnoběžně s vlákny ($MOEC_L$), ohybová pevnost v radiálním směru ($MOR_{B(R)}$) a ohybový modul pružnosti v radiálním směru ($MOE_{B(R)}$). Pro každé měření provedené přístrojem s roztlačováním čelistí ve vrtu byly vyrobeny vždy dva tlakové vzorky velikosti 20×20×30 mm a jeden ohybový vzorek velikosti 20×20×300 mm. Tyto vzorky byly vymanipulovány vždy z přiléhajícího místa měření *wood testKLOIBerem* tak, aby bylo možné statistické srovnání použitých metod.

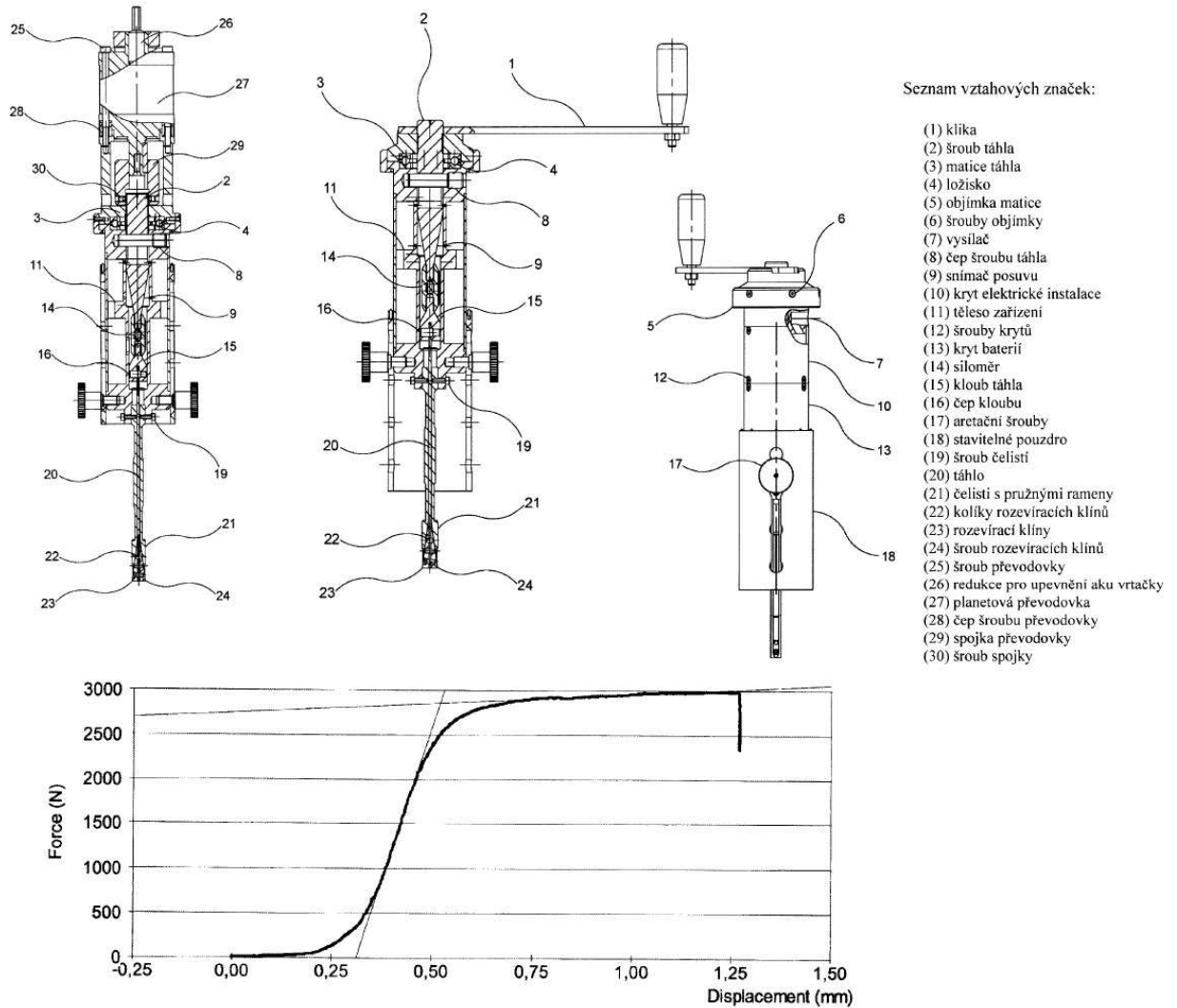
4.2 Použité předpisy (Normy)

- ČSN EN 480 *Dřevěné konstrukce - Konstrukční dřevo a lepené lamelové dřevo - Zjišťování některých fyzikálních a mechanických vlastností*
- ČSN 49 0108 *Dřevo. Zisťovanie hustoty*
- ČSN 49 0103 *Dřevo. Zisťovanie vlhkosti při fyzikálních a mechanických skúškach*
- ČSN 49 0111: *Skúšky vlastností rastlého dreva. Metóda zisťovania modulu pružnosti v tlaku pozdĺž vlákien*

- ČSN 49 0110 *Drevo. Medza pevnosti v tlaku v smere vláken*

4.3 Zkušební zařízení a software

- *Wood testKLOIBer, neboli zařízení pro terénní měření konvenční pevnosti a modulu přetvárnosti při roztlačování čelistí ve vyvrtaném otvoru. Obr. 14*



Obr. 14 Výkres k zařízení wood testKLOIBer (patent přístroje), dole výstupní graf zařízení

- *Aparatura pro optické měření deformací; technické údaje:*
 - kamery: 2x CCD AVT 5Mpx Firewire, C-mount
 - objektivy: 2x Schneider Xenoplan 2.8/50mm Compact, 2x Pentax 25mm Fix focal lens
 - 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
- *Software Vic Snap 2010 pro záznam snímků*
- *Software Vic-3D 2010 pro zpracování a výpočet deformací*
- *Microsoft Office Excel 2007 pro zaznamenání dat, popisnou statistiku, další statistické operace*
- *Statistica 10 CZ pro analýzu a zpracování naměřených dat*
- *SigVis software (MFC Application) pro zobrazení výstupních grafů z nově vyvinutého zařízení (wood testKLOIBer)*

4.4 Statistické vyhodnocení dat

Prvním krokem ve statistickém vyhodnocování naměřených dat byla průzkumová analýza dat. Tedy jakési ověření předpokladu o datech při použití obvyklých metod matematické statistiky. Posouzení normality dat bylo provedeno pomocí grafických nástrojů. Konkrétně byly pro tyto účely sestaveny kvantil-kvantilové grafy a také grafy hustoty pravděpodobnosti, které jsou vhodné pro tyto účely. Určení dostatečného rozsahu výběru, neboli určení minimální velikosti výběru bylo stanoveno dle:

$$n = U_{\alpha}^2 \frac{S^2}{\Delta^2} \quad [-]$$

Kde:

U_{α} symbol normované náhodné veličiny (pro α 0,05 je U_{α} 1.96)

S míra variability; odhad rozptylu, nebo variační koeficient

Δ^2 hodnota požadované přesnosti

Dále byly provedeny testy náhodnosti, které ověří předpoklad nezávislosti prvků výběru a také ověření homogenity výběru, kde se autor práce zaměřil hlavně na

odlehlá data. Hladina významnosti α byla stanovena na 0,05. To znamená, že pravděpodobnost zamítnutí byla $p < 0,05$.

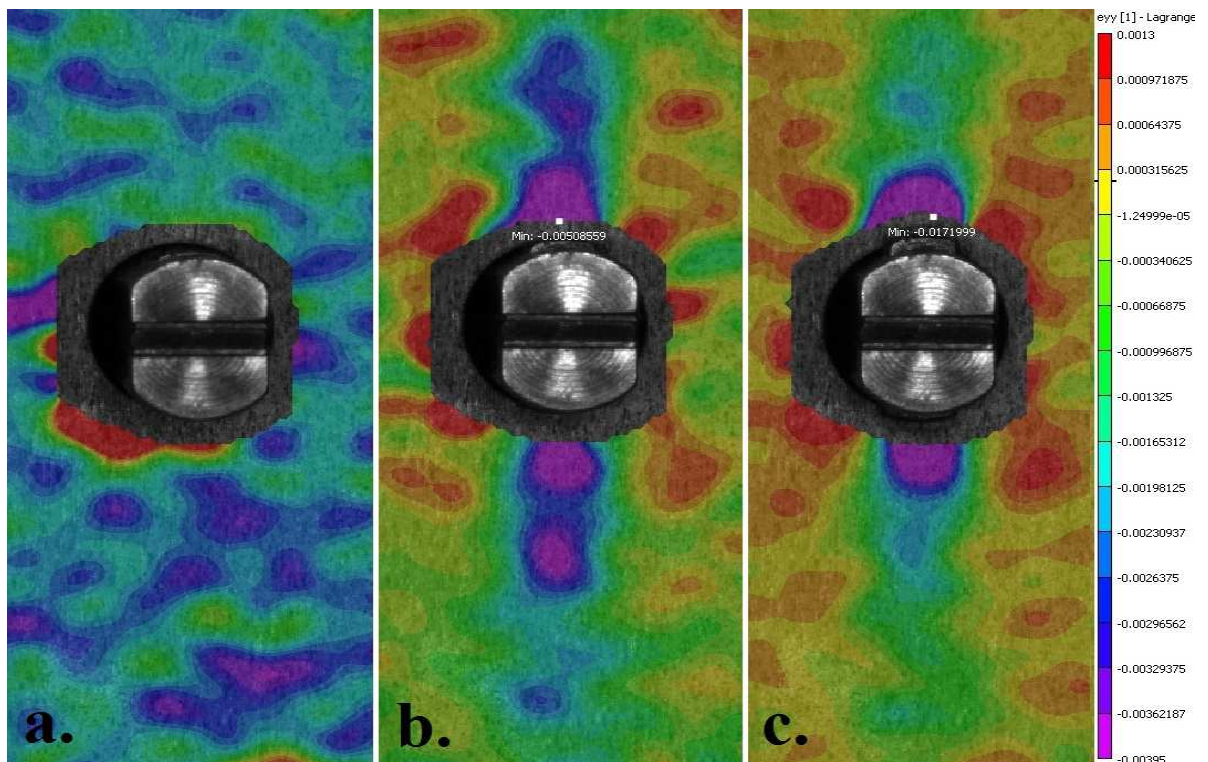
Při zpracování dat byly rovněž použity parametrické testy pro testování rozdílů středních hodnot. Konkrétně to byl *dvouvýběrový t-test pro nezávislé výběry*, jehož výpočet probíhá ve dvou krocích. Nejprve bylo zapotřebí pomocí *dvouvýběrového F-testu* otestovat nulovou hypotézu a shodě rozptylů obou souborů a na základě tohoto pokračovat v testování pomocí *dvouvýběrového t-testu s rovností rozptylu*, nebo pomocí *dvouvýběrového t-testu s nerovností rozptylu*. Takto provedený test vyhodnocujeme porovnáváním *testového kritéria s kritickou hodnotou*, nebo porovnáváním hodnoty p s hodnotou pravděpodobnosti α .

Součástí práce jsou rovněž několikanásobné krabicové grafy, které dávají přehled o rozložení dat a jsou tak vhodným grafickým nástrojem pro porovnání několika měřených veličin najednou. Pro určení závislosti některých veličin byly použity grafy lineární regrese, které nám poskytují koeficienty R a R^2 , popisující těsnost („sílu“) závislosti.

5 Výsledky

5.1 Výsledky měření pomocí zařízení *wood testKLOIBer* za současného snímání DIC

Tato kapitola je zaměřena na výsledky získané technologií digitální korelace obrazu, která byla použita ke snímání měření dřevěných vzorků nově vyvinutým přístrojem *wood testKLOIBer*. Výsledkem zpracování dat je tabulka maximálních hodnot poměrných deformací v blízkosti předvrtaného otvoru ve směru horizontálním i vertikálním vždy pro oba směry zatěžování a stejně tak pro smykové poměrné deformace (Tab. 4). Vybrané dvojice těchto poměrných deformací byly porovnávány pomocí parametrického testování. Pro přehlednost je vše doplněno grafickými výstupy z programu *Vic-3D*, který sloužil k výpočtu a zpracování naměřených obrazových dat.



Obr. 15 Poměrná deformace v průběhu testování- a. začátek roztlačování čelistí (10. snímek); b. 50. snímek (lineární část deformace); c. 80. snímek (těsně před dosažením mezi pevnosti)

Obr. 15 představuje průběh zatěžování *wood testKLOIBerem* shrnutý do třech základních snímků (viz popis obrázku). Na Obr. 15 a. můžeme pozorovat čelisti

přístroje, které jsou v základní (neroztažené) pozici. Obr. 15 c. představuje maximálně roztažené čelisti zařízení a tudíž i hodnoty poměrných deformací jsou zde nejvyšší.

Tab. 4 Tabulka maximálních poměrných deformací

Směr zatěžování	L		T		Smyk	
Číslo vzorku	ϵ_{xx} [%]	ϵ_{yy} [%]	ϵ_{xx} [%]	ϵ_{yy} [%]	L [%]	T [%]
1	1,67	9E+14	1,67	2,55	0,63	0,59
2	0,78	0,53	0,10	0,06	0,33	0,06
3	2E+40	2E+40	3,19	0,56	2E+40	0,49
4	0,20	0,80	1,95	0,22	0,49	0,41
5	0,21	0,21	1,69	0,24	0,27	0,62
6	0,35	0,38	0,62	0,11	0,20	0,31
7	0,24	0,71	1,01	0,27	0,49	0,36
8	0,48	0,31	1,75	0,19	0,23	0,38
9	0,42	1,57	0,55	0,20	0,64	0,37
10	2965,37	2971,39	1,38	0,20	2977,12	0,63
11	0,66	1,19	1,15	0,33	0,57	0,37
12	0,56	0,35	1,19	0,21	0,49	0,57
13	0,34	0,64	5,92	0,27	0,43	0,48
14	0,30	0,26	0,74	0,29	0,36	0,22
15	0,47	0,51	0,86	0,16	0,49	0,37
16 (37)	0,68	1,49	1,05	0,51	1,10	0,32
17	0,75	0,59	1,02	0,21	0,30	0,28
18 (22)	0,51	1,15	2,37	0,67	0,59	0,40
19 (25)	0,90	0,34	4,38	0,43	0,58	0,35
20 (26)	0,59	0,29	2,33	0,19	0,41	0,23
Stř. hodnota	0,56	0,67	1,48	0,28	0,48	0,39
Medián	0,49	0,53	1,17	0,22	0,49	0,37
Směr. Odchylka	0,33	0,42	0,99	0,15	0,20	0,14

Tab. 4 uvádí maximální hodnoty poměrných deformací ϵ_{xx} a ϵ_{yy} ve směru podélném (L) a tangenciálním (T). Rovněž jsou zde uvedeny hodnoty smykových deformací pro oba směry. Pro všechny tyto data je přiložena základní popisná analýza dat.

V následujících tabulkách jsou uvedeny výsledky parametrického testování zvolených dvojic poměrných deformací, které jsou určeny pro testování rozdílů středních hodnot dvou souborů.

Tab. 5 Porovnání poměrných deformací pro jednotlivé směry pomocí parametrických testů

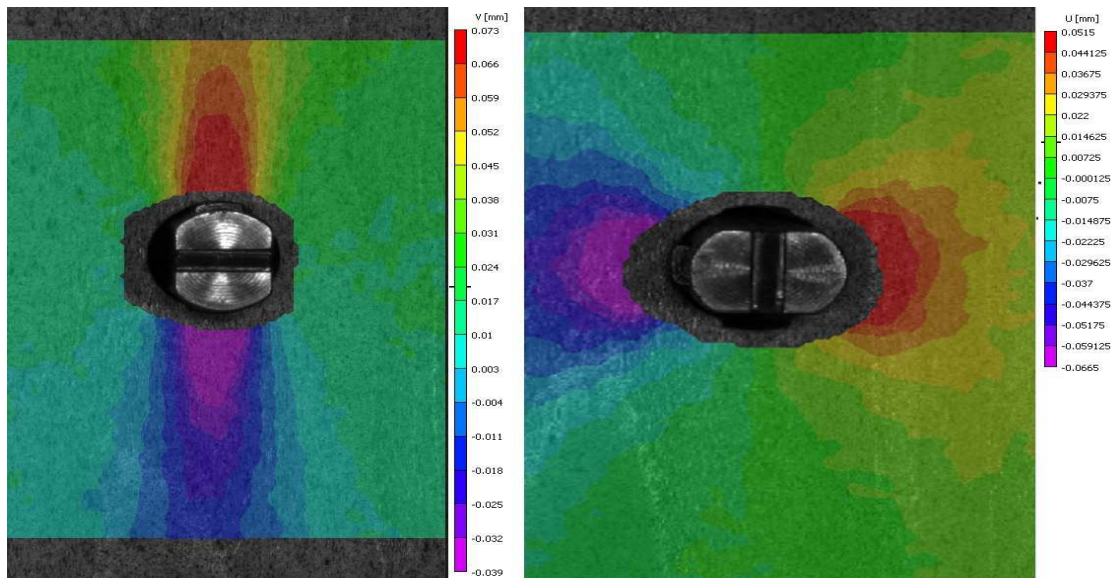
Parametrické testování				Parametrické testování			
Směr zatěžování	L	vs.	T	Směr zatěžování	L	vs.	T
Poměrná deformace	ϵ_{yy} [%]		ϵ_{xx} [%]	Poměrná deformace	ϵ_{xx} [%]		ϵ_{yy} [%]
F-test	TK 0,18	<	KH 0,43	F-test	TK 4,75	>	KH 2,23
	P 0,0006	<	α 0,05		P 0,001	<	α 0,05
H0 zamítnuta				H0 zamítnuta			
t-test	TK 3,1	>	KH 1,71	t-test	TK 3,18	>	KH 1,71
	P 0,003	<	α 0,05		P 0,002	<	α 0,05
H0 zamítnuta				H0 zamítnuta			
Střední hodnoty obou souborů se navzájem statisticky významně odlišují				Střední hodnoty obou souborů se navzájem statisticky významně odlišují			

Tab. 6 Porovnání smykových poměrných deformací pro jednotlivé směry pomocí parametrických testů

Parametrické testování			
	Smyková deformace		
Poměrná deformace	L [%]	vs.	T [%]
F-test	TK 2,07	<	KH 2,19
	P 0,06	>	α 0,05
H0 přijata			
t-test	TK 1,53	<	KH 1,69
	P 0,067	>	α 0,05
H0 přijata			
Střední hodnoty obou souborů se navzájem statisticky významně neliší			

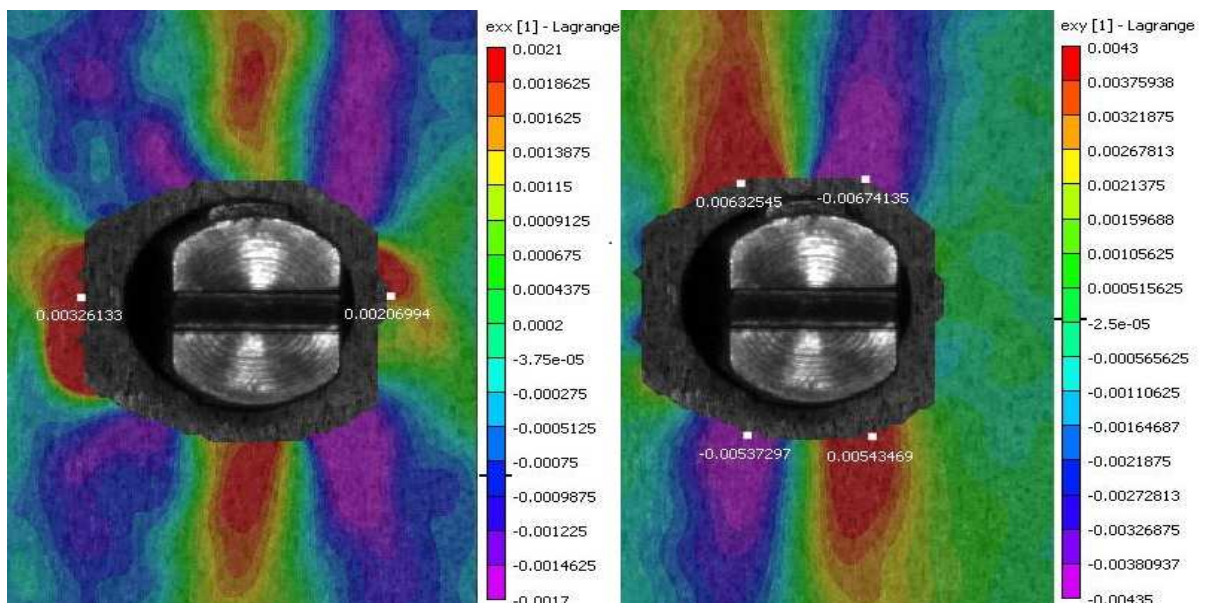
Nejprve byly testovány hodnoty poměrných deformací ve směru zatěžování, tedy pro L ϵ_{yy} a pro T ϵ_{xx} . Nulová hypotéza t-testu byla zamítnuta, což znamená, že oba porovnávané soubory se svými středními hodnotami navzájem statisticky významně odlišují na hladině významnosti $p = 0,05$. Stejné výsledky ukázalo testování poměrných deformací ve směru kolmém na osu zatěžování, tedy pro L ϵ_{xx} a pro T ϵ_{yy} . Výsledkem testování smykových deformací pro oba směry zatěžování je přijetí alternativní hypotézy, tedy střední hodnoty obou souborů se navzájem statisticky významně neodlišují.

Následující *obrázek 16* představuje vybraný grafický výstup z programu *Vic-3D*, konkrétně posunutí pro vertikální a horizontální osu dle směru zatížení (viz popis *Obr. 16*). V obou případech byl použitý referenční 60. snímek testu.



Obr. 16 Posunutí ve směru testování; podélný směr V [mm] vlevo; tangenciální směr U [mm] vpravo

Obrázek 17 poskytuje informaci o poměrné deformaci ve směru kolmém na směr roztlačování čelistí ϵ_{xx} a rovněž o hodnotách smykové deformaci ϵ_{xy} při roztlačování čelistí ve směru dřevních vláken, vždy pro referenční 60. snímek testu. Maximální hodnoty těchto dvou deformací se řádově neliší. Maximum pro ϵ_{xx} je 0,003 a pro ϵ_{xy} 0,006 [-].



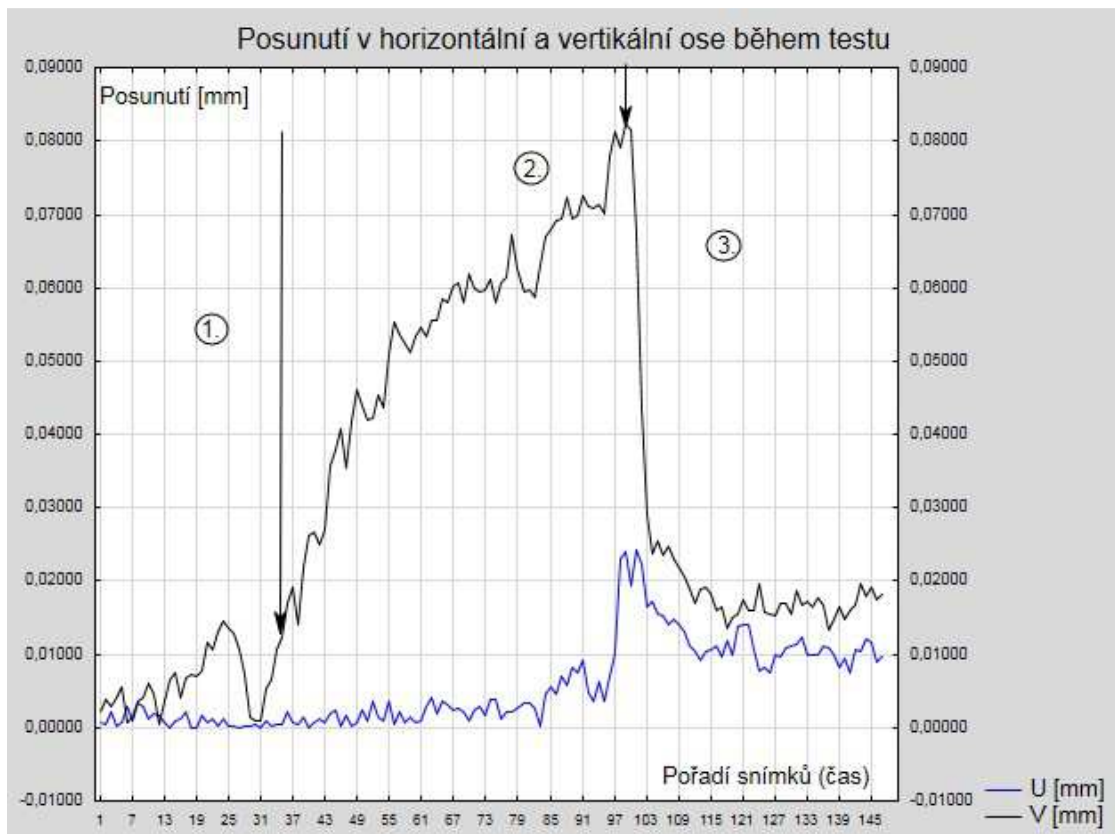
Obr. 17 Deformace ϵ_{xx} (vlevo) a smyková deformace ϵ_{xy} při roztlačování čelistí ve směru dřevních vláken

V následující tabulce (Tab. 7) je uvedena popisná statistika dat z bodu přiléhajícího k čelistem zařízení (uvnitř dřevěného vzorku) při roztlačování čelistí ve směru dřevních vláken v průběhu testu (147 snímků). Směrodatné jsou především maximální hodnoty posunutí v ose vertikální i horizontální, rovněž maximální hodnoty poměrných deformací ve směru osy X a Y a také smykové deformace.

Tab. 7 Popisná statistika dat z bodu přiléhajícího k čelistem zařízení při roztlačování čelistí ve směru dřevních vláken v čase (výstup z Vic-3D)

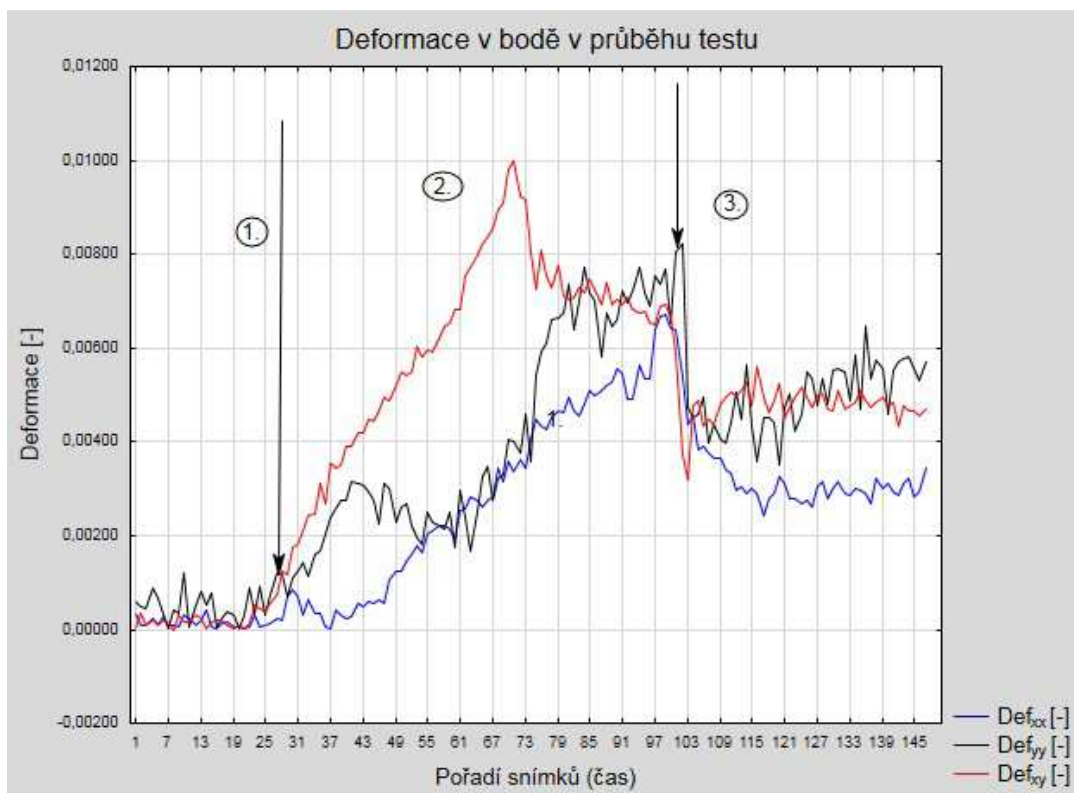
Číslo snímku DIC	U	V	ϵ_{xx}	ϵ_{yy}	ϵ_{xy}
	[mm]	[mm]	[-]	[-]	[-]
Případy	147	147	147	147	147
Stř. hodnota	0,0057	0,0320	0,0025	0,0037	0,0046
Medián	0,0033	0,0195	0,0028	0,0040	0,0049
Směr. Odchylk	0,0057	0,0241	0,0018	0,0023	0,0026
Minimum	0,0000	0,0003	0,0000	0,0000	0,0000
Maximum	0,0241	0,0822	0,0067	0,0082	0,0100

Následující Graf 1 představuje průběh posunutí v bodě přiléhajícího k čelistem zařízení pro horizontální i vertikální osu. Pro tvorbu tohoto grafu byl použitý vzorek č. 19 při roztlačování v podélném směru. Pro názornost byl průběh testu rozdělen na 3 fáze: fáze 1 představuje náběh zatěžování, fáze 2 je fází nejdůležitější a představuje lineární (elastickou) a nelineární (plastickou) část testu až po dosažení maxima, fáze 3 představuje posunutí v bodě po dosažení maximální hodnoty. Všechny tyto hodnoty jsou výstupem z použitého programu Vic-3D.



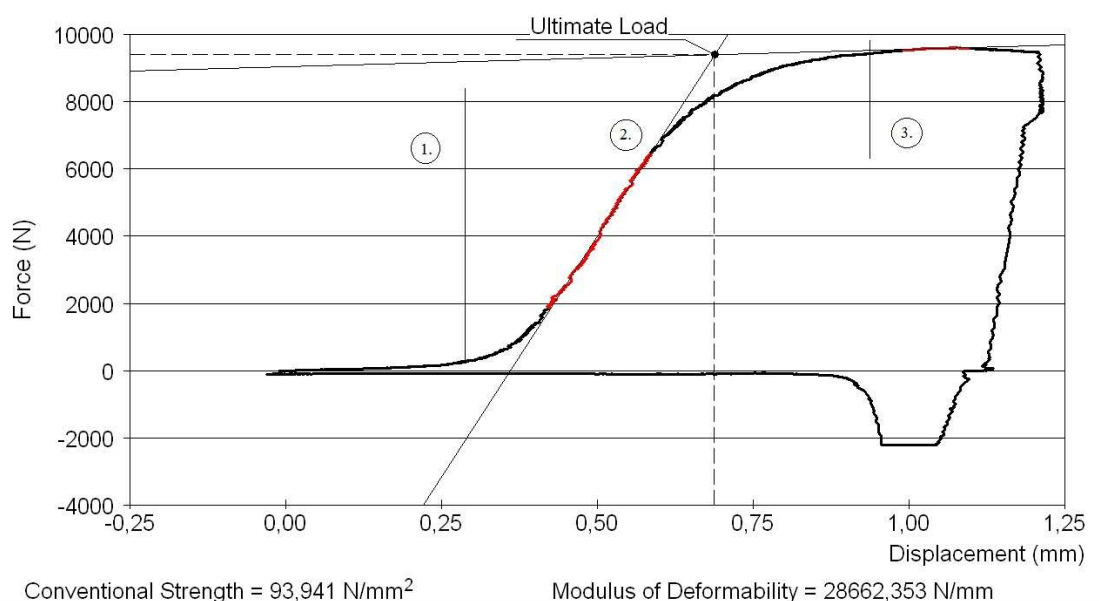
Graf 1 Posunutí ve vertikální (V) a horizontálním (U) směru v bodě během testování

Obdobný graf byl sestaven pro poměrné deformace ve směru osy X a Y a také smykové deformace ve stejném bodě při zatěžování stejného vzorku (č.19) ve směru podélném. I zde jsou vyznačeny jednotlivé fáze průběhu testu.



Graf 2 Poměrné deformace ve směru osy x (Def_{xx}); y (Def_{yy}) a smyková deformace (Def_{xy}) v bodě během testování

Pro porovnání předcházejících Grafů 1 a 2 byl přiložen pracovní diagram ze zkoušky na stejném vzorku, který je výstupem zařízení wood testKLOIBer a je zobrazen na Graf 3.



Graf 3 Pracovní digram zařízení wood testKLIBer pro vzorek č. 19 při roztlačování čelistí ve směru dřevních vláken

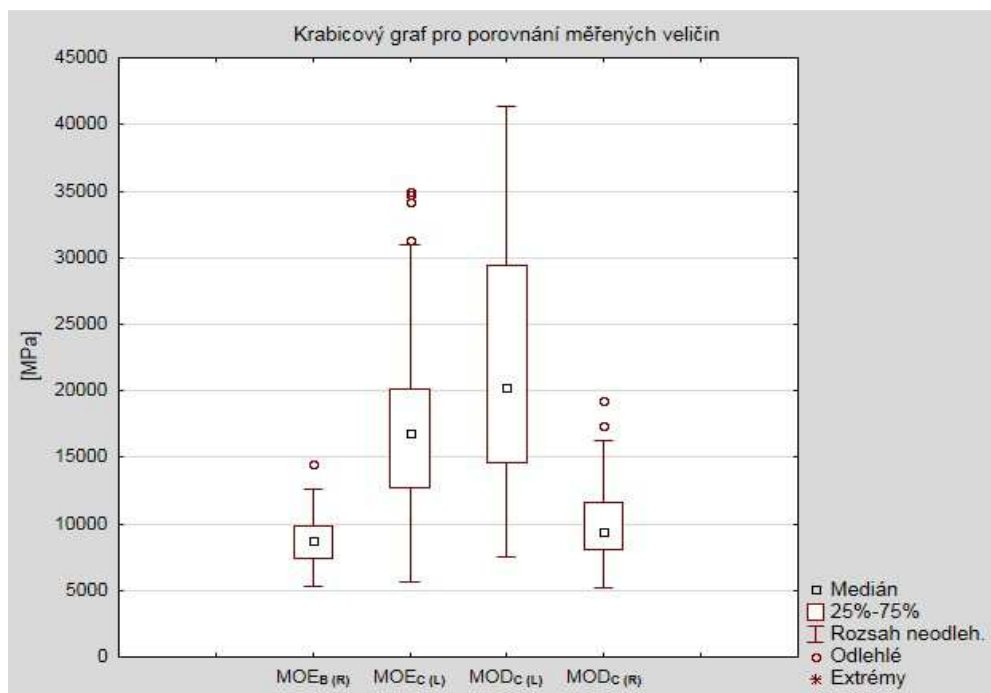
5.2 Srovnání výsledků měření nově vyvinutým zařízením s konvenčními metodami testování

Tato kapitola je zaměřena a výsledky testování dřeva pomocí různých metod, které poskytují podobné výstupní veličiny. Výsledkem testování dřeva v ohybu je modul pružnosti MOE_B a ohybová pevnost MOR . Výsledkem tlakové zkoušky je modul pružnosti v tlaku MOE_C a pevnost dřeva v tlaku σ . Nově vyvinuté zařízení s názvem *wood testKLOIBer* poskytuje veličiny modul deformability MOD a konvenční pevnost materiálu $CS_{C(L,T)}$. V následující (Tab. 8) jsou uvedeny základní popisné statistiky těchto veličin naměřených v rozsáhlém experimentu (viz kap. 4.1).

Tab. 8 Popisná analýza dat získaných měřeními různými metodami testování dřeva

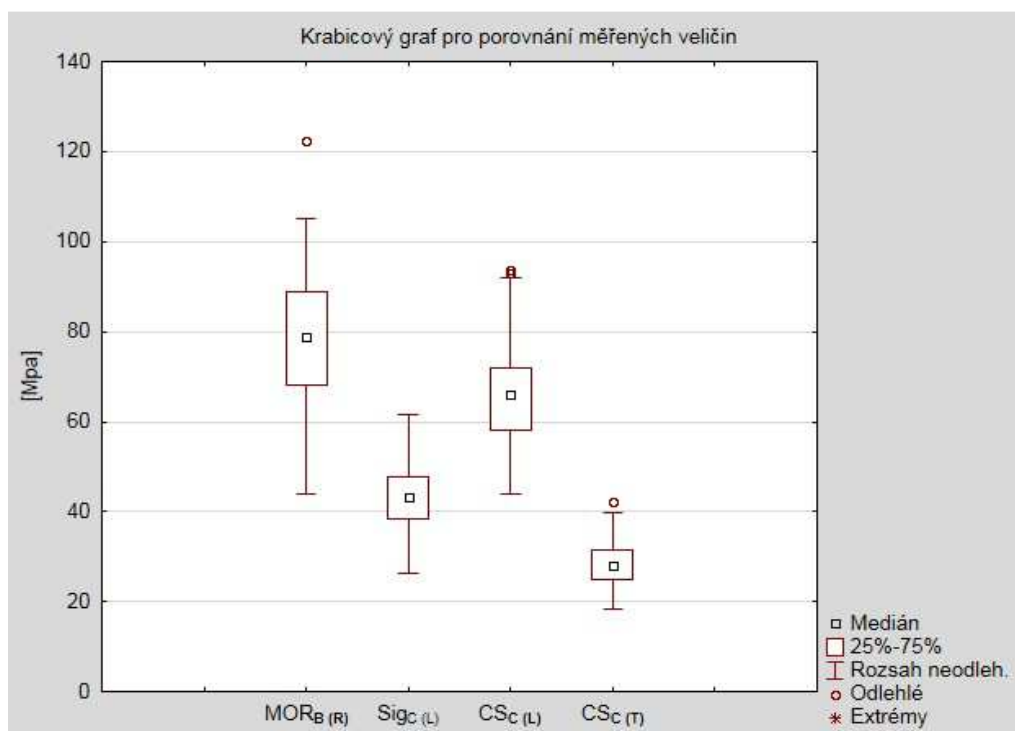
Popisné statistiky	OHYB		Tlak		wood testKLOIBer			
	$MOE_{B(R)}$ [Mpa]	$MOR_{B(R)}$ [Mpa]	$MOE_{C(L)}$ [Mpa]	$\sigma_{C(L)}$ [Mpa]	$CS_{C(L)}$ [Mpa]	$MOD_{C(L)}$ [Mpa]	$CS_{C(T)}$ [Mpa]	$MOD_{C(R)}$ [Mpa]
Střední hodnota	8726,03	78,03	17287,49	42,95	66,24	22014,09	28,37	9886,35
Medián	8737,28	78,99	16860,68	43,14	66,06	20233,07	27,96	9390,01
Sm.odch.	1836,14	14,30	6312,32	7,05	10,17	8907,06	4,56	2702,19
Minimum	5288,19	43,98	5618,26	26,13	43,93	7518,07	18,49	5251,05
Maximum	14530,38	122,26	34963,19	61,70	93,66	41370,48	42,04	19211,65
Šikmost	0,40	0,10	0,70	-0,08	0,35	0,45	0,33	0,66
Špičatost	0,33	0,19	0,14	-0,29	-0,25	-0,94	-0,35	0,20
N platných	80,00	80,00	145,00	160,00	160,00	160,00	160,00	160,00

Následující krabicové grafy byly sestrojeny pro názornou ukázkou porovnání podobných veličin, které byly zjištěny odlišnými metodami. Graf 4 představuje několiknásobný krabicový graf pro veličiny modul pružnosti dřeva v ohybu a tlaku ($MOE_{B(R)}$ a $MOE_{C(L)}$) a modul deformability zjištěný pomocí zařízení *wood testKLOIBer* ve směru podélném a tangenciálním ($MOD_{C(L)}$ a $MOD_{C(T)}$).



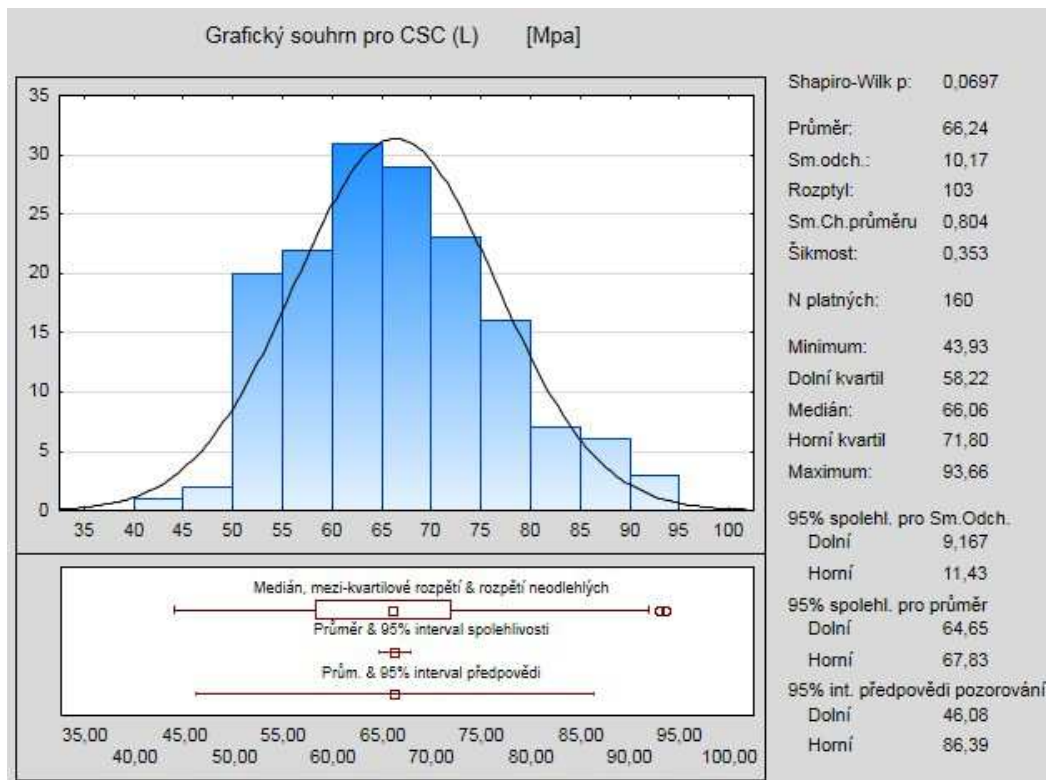
Graf 4 Krabicové grafy veličin MOE a MOD měřené standardními metodami a testovým zařízením

Graf 5 představuje výsledky ze stejných zkoušek. Tentokrát jsou to pevnost dřeva v ohybu a tlaku ($MOR_{B(R)}$ a $\sigma_{C(L)}$) a konvenční pevnost dřeva naměřenou pomocí wood testKLOIBeru v podélném a tangenciálním směru ($CS_{C(L)}$ a $CS_{C(T)}$).



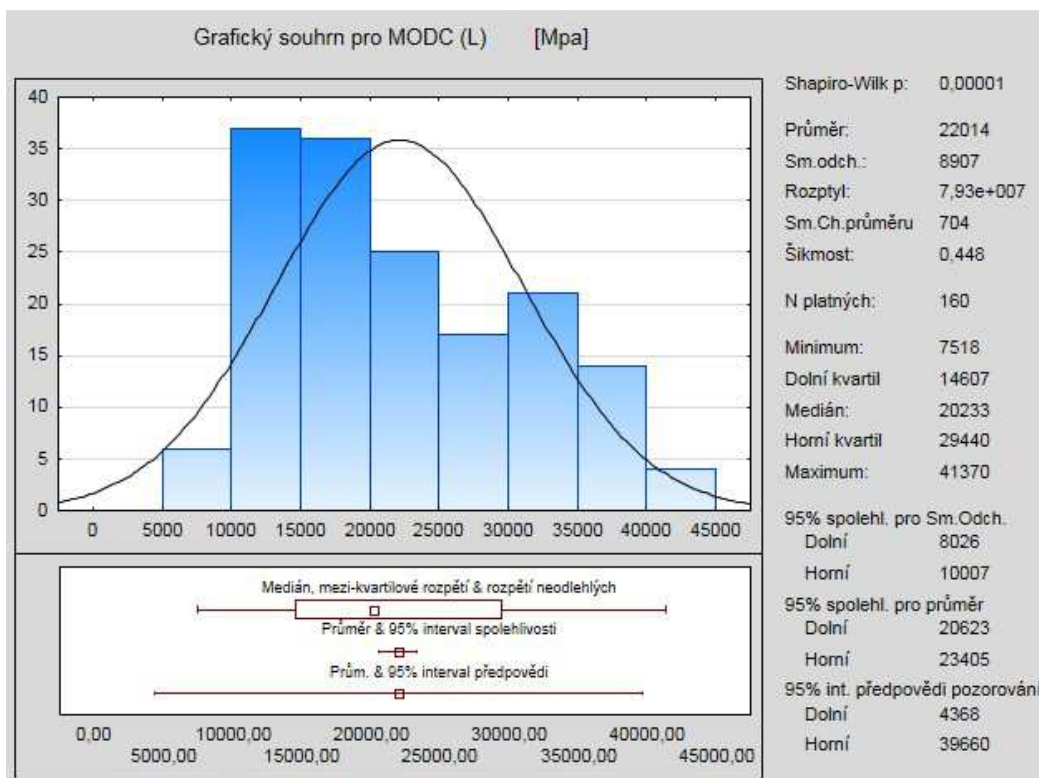
Graf 5 Krabicové grafy veličin MOR, σ a CS měřené standardními metodami a testovým zařízením

Následující Graf 6 ukazuje souhrnnou popisnou statistiku naměřených hodnot konvenční pevnosti dřeva v podélném směru $CS_{C(L)}$.



Graf 6 Souhrnná popisná statistika včetně grafu rozložení hodnot pro veličinu $CS_{C(L)}$ konvenční pevnost dřeva v podélném směru naměřenou zařízením wood testKLOIBer

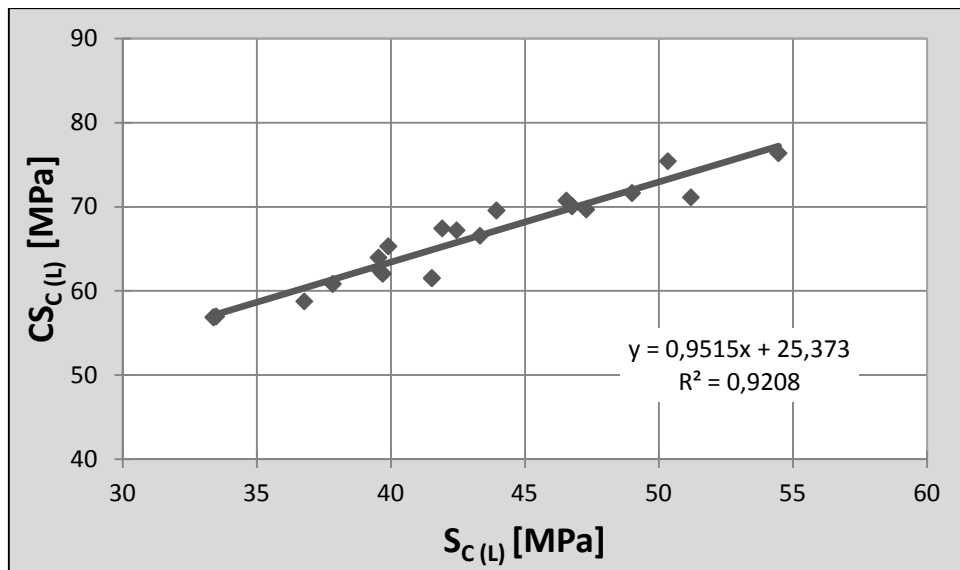
Následující Graf 7 ukazuje souhrnnou popisnou statistiku naměřených hodnot modulu přetvárnosti dřeva v podélném směru $MOD_{C(L)}$. Stejné grafy popisující ostatní měřené veličiny jsou pro názornost uvedeny v kapitole 10. Příloha práce.



Graf 7 Souhrnná popisná statistika včetně grafu rozložení hodnot pro veličinu $MOD_{C(L)}$ modul přetvárnosti dřeva v podélném směru naměřenou zařízením wood testKLOIBer

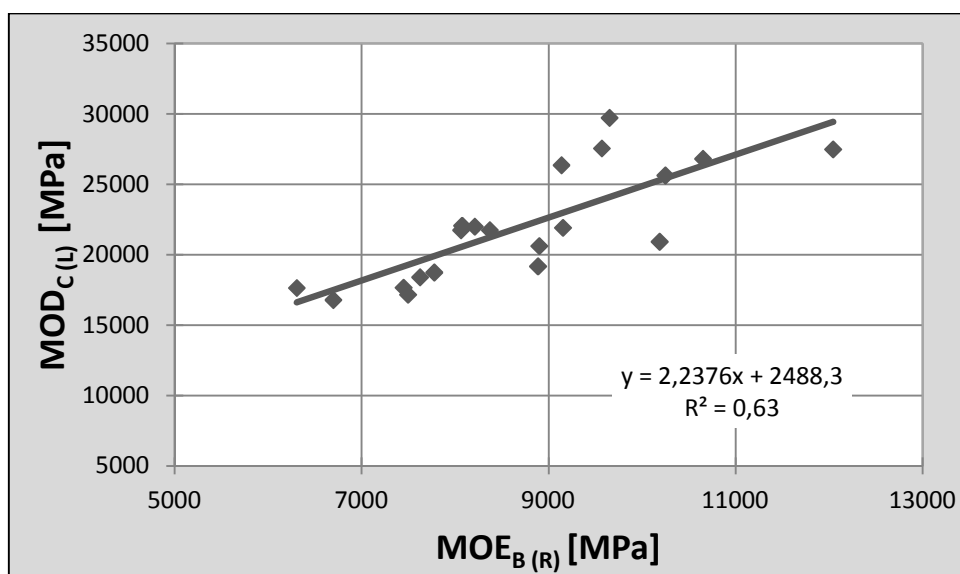
5.3 Posouzení závislostí měřených veličin a vlivu hustoty dřeva

Následující dva grafy popisují závislost dvou veličin, které byly naměřené různými metodami. Hodnota spolehlivosti, tj. koeficient determinace R^2 , udává procento, jakým je rozptyl hodnot závislé proměnné veličiny Y vysvětlen změnami hodnot nezávislé proměnné veličiny X . Koeficient nabývá hodnot od 0 do 1, a čím je vyšší, tím je nalezený model kvalitnější. Koeficient determinace u závislosti mezi pevností dřeva získané ze standardní tlakové zkoušky a konvenční pevností naměřené pomocí nově vyvinutého zařízení je 0,92 (viz Graf 8).



Graf 8 Graf závislosti mezi pevností dřeva získané ze standardní tlakové zkoušky a konvenční pevností naměřené pomocí nově vyvinutého zařízení

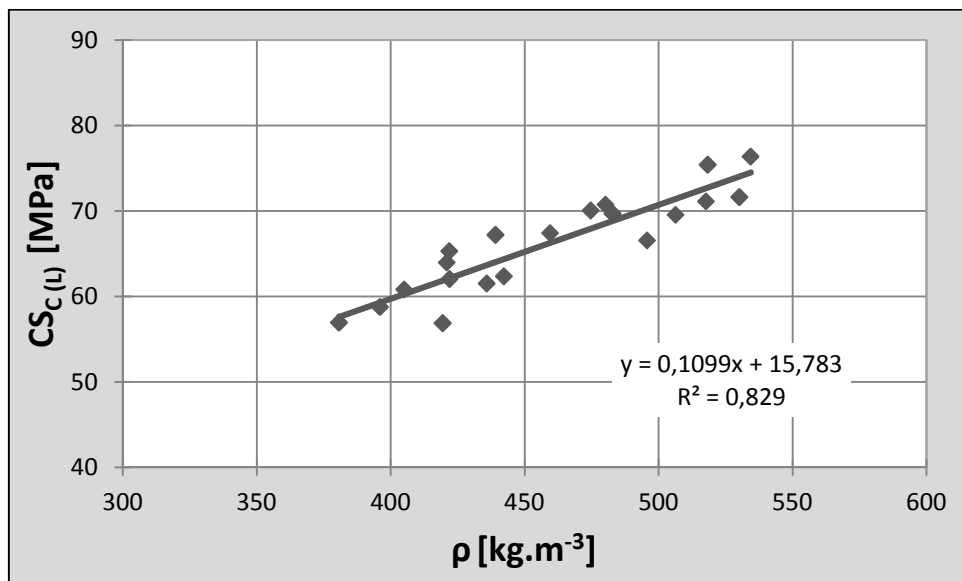
Koeficient determinace u závislosti mezi veličinami modul pružnosti z ohybové zkoušky (MOE_B) a modulem deformability (MOD) je 0,63 (viz Graf 9).



Graf 9 Graf závislosti mezi veličinami modul pružnosti z ohybové zkoušky (MOE_B) a modulem deformability (MOD)

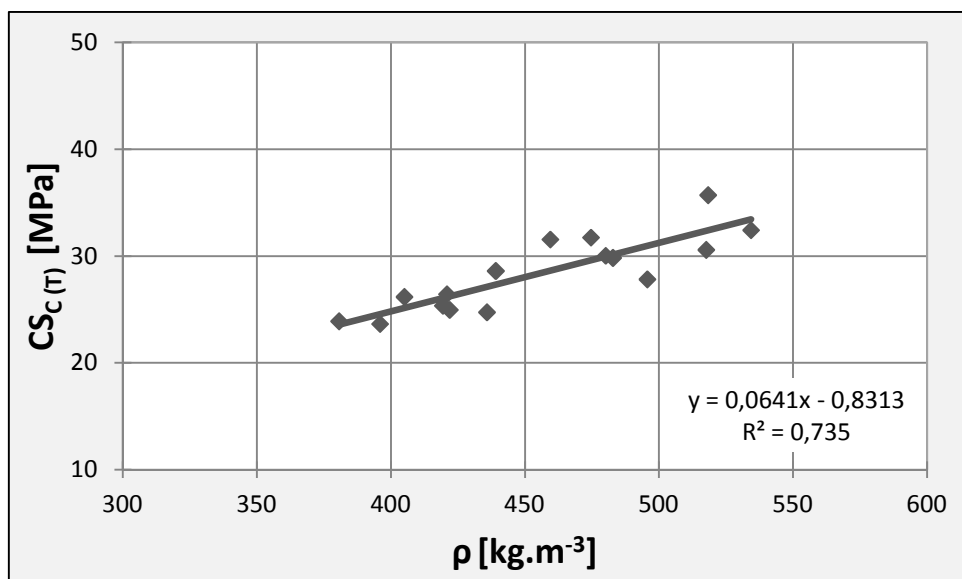
Graf 10 popisuje vliv hustoty na konvenční pevnost dřeva ve směru podélném, která byla naměřena nově vyvinutým přístrojem pro terénní měření konvenční pevnosti a modulu přetvárnosti (deformability) při roztláčování čelistí ve vyvrtaném

otvoru (*wood testKLOIBer*). Koeficient determinace, který popisuje sílu závislosti hustoty na konvenční pevnost dřeva v podélném směru, nabył hodnoty 0,83.



Graf 10 Vliv hustoty dřeva na konvenční pevnost v podélném směru naměřenou nově vyvinutým zařízením

Graf 11 popisuje vliv hustoty na konvenční pevnost dřeva ve směru tangenciálním, která byla naměřena zařízením *wood testKLOIBer*. Pro směr tangenciální je hodnota koeficientu determinace 0,74.



Graf 11 Vliv hustoty dřeva na konvenční pevnost v tangenciálním směru naměřenou nově vyvinutým zařízením

6 Diskuse

Výsledky z *Kap. 5.1* ukazují poměrné deformace posunutí při měření nově vyvinutým zařízením vždy pro oba směry (L a T). Požgaj a kol. (1993) uvádějí, že poměrná deformace na mezi úměrnosti dřeva nepřesáhne 1 %. Z praktických zkušeností víme, že hodnota deformace na mezi úměrnosti při testování dřeva v tlaku by neměla nabývat hodnoty větší, než 0,5 %. Při testování zařízením *wood testKLOIBer* byla naměřena průměrná hodnota poměrná deformace ve směru roztlačování čelistí v podélném směru 0,67 % a ve směru tangenciálním dokonce 1,47 % u referenčního 60. snímku, který odpovídá časovému okamžiku těsně před dosažením meze úměrnosti dřeva. Tyto výsledky ovšem pochází z poměrně malého výběrového souboru (20 vzorků) a mohou tak být tímto ovlivněny. Extrémně vysoká hodnota poměrné deformace- přesahující 1 % ve směru roztlačování čelistí při testování ve směru tangenciálním je způsobena pravděpodobně tím, že při tomto způsobu zatěžování dochází k častému porušení dřeva podél dřevních vláken („rozštípnutí“). Překvapením jsou hodnoty poměrné deformace ve směru kolmém na směr zatěžování, které dosahují podobně vysokých hodnot jako deformace ve směru roztlačování čelistí. Tento fakt poukazuje na složitý napětovo-defomační model chování dřeva při roztlačování zaoblených čelistí ve vyvrtaném otvoru. Tento složitý model chování je zapříčiněn především komplikovanou anatomickou stavbou dřeva. Především pak tvarem a uspořádáním tracheí. Na submikroskopické úrovni pak směrem mikrofibril ve střední vrstvě buněčné stěny- konkrétně sekundární stěně S_2 . Důležitou roli zde hraje také geometrie zaoblených čelistí, které jsou roztlačovány směrem do dřevěného vzorku v předvrtaném otvoru. Tyto čelisti jsou zakřiveny tak, aby je bylo možné vložit do vyvrtaného otvoru. Tento test připomíná například test tvrdosti, kdy je do dřeva vtláčena ocelová kulička o určitém průměru, a kde dochází k plastickému deformování vzorku. Z tohoto důvodu je veličina získaná měřením zařízením *wood testKLOIBer* nazývána modul přetvárnosti (deformability) namísto modulu pružnosti, jako je tomu u standardního testování materiálů. Srovnávány byly hodnoty obou poměrných deformací ve směru podélném i tangenciálním, mezi nimiž byly nalezeny statisticky

významné rozdíly a rovněž smykové deformace pro směr podélný a tangenciální, mezi kterými se statisticky významný rozdíl neukázal.

Kapitola 5.2. je výstupem rozsáhlého experimentu, v rámci kterého byly vzorky vymanipulovány ze stejného dřevěného prvku pro potřeby porovnání naměřených výsledků pomocí tří odlišných metod (testování v ohybu, tlaku a pomocí *wood testKLOIBer*). Výsledky z těchto testů jsou statisticky popsány v *Tab. 8. Graf 4 a Graf 5* nám dávají možnost vizuálního posouzení naměřených dat. Jsou zde patrné výrazné rozdíly jak ve středních hodnotách souborů, tak v jejich variabilitě a rozložení. Pro důkladnější zjištění vztahu mezi jednotlivými měřenými veličinami byly sestrojeny regresní modely pro vybrané dvojice veličin. Nejvhodnější model byl nalezen mezi pevností dřeva získané ze standardní tlakové zkoušky a konvenční pevností naměřené pomocí nově vyvinutého zařízení, kde celých 92 % rozptylu hodnot závislé proměnné ($CS_{C(L)}$) vysvětleno změnami hodnot nezávislé proměnné veličiny ($\sigma_{C(L)}$). Tenhle fakt předurčuje nově vyvinutý přístroj ke kvalitnímu vyhodnocení stavu dřevěného prvku zabudovaného v konstrukcích s přesností blízké standardním zkouškám dřeva v tlaku prováděných laboratorně.

Vliv hustoty dřeva na měřené parametry nově vyvinutým zařízením se zjištěním vhodného modelu nabývá vysoké hodnoty spolehlivosti 0,73 v tangenciálním a 0,83 v podélném směru (viz *Graf 10 a Graf 11*). S hustotou úzce souvisí podíl jednotlivých chemických složek dřeva. Mnohdy větší vliv než samotná hustota dřeva má jeho struktura, její nepravidelnost a nehomogenní stavba. Kromě samotné hustoty hraje při zjišťování mechanických vlastností dřeva nově vyvinutým zařízením velkou roli taky zastoupení letního dřeva, ale taky celkový počet ročních přírůstků v oblasti, kde dochází k roztlačování čelistí. Vliv tohoto faktoru na *wood testKloiber* již prozkoumal Pilát (2015).

Zařízení *wood testKLOIBer* poskytuje údaje podobné jako veličiny naměřené při laboratorním testování (byly zjištěny vysoké korelace mezi konvenční pevností naměřenou tímto zařízením a pevností naměřenou laboratorně). Fakt, že jsou tyto údaje zjištěny přímo v terénu na zabudovaném vzorku, z něj dělá jedinečný a důležitý přístroj pro semi-destruktivní testování dřevěných konstrukcí. Další nespornou výhodou tohoto zařízení je bezdrátový přenos signálu v reálném čase a práce s ním je tak velice efektivní.

7 Závěr

V teoretické části práce byla popsána většina dostupných metod a přístrojů pro nedestruktivní a semi-destruktivní testování dřeva, včetně nově vyvinutého zařízení pro terénní měření konvenční pevnosti a modulu přetvárnosti při roztlačování čelistí ve vyvrtaném otvoru, které je součástí experimentu práce. Rovněž je zde pojednáno o mechanických vlastnostech a vlivu různých faktorů na tyto vlastnosti, které nějakým způsobem s touto problematikou souvisí. Zkráceně je zde také pojednáno o poškození dřeva způsobené dřevokazným hmyzem a houbami.

Hlavní náplní práce byl experiment, v rámci kterého byly měřeny dřevěné vzorky zařízením *wood testKLOIBer* za současného snímání metodou DIC. Výsledky z této části experimentu jsou poměrné deformace v okolí vyvrtaného, které poukazují na složitý napětovo-deformační model chování dřeva při roztlačování čelistí tohoto zařízení. V další části experimentu byly srovnávány běžně používané metody pro testování dřeva (tlak, ohyb) s výsledky naměřenými zařízením *wood testKLOIBer*, načež byly mezi jednotlivými metodami zjištěny velice těsné závislosti, které předurčují nově vyvinutý přístroj pro kvalitní vyhodnocení vlastností dřevěného prvku. Díky svému konstrukčnímu provedení dokáže přístroj vyšetřit běžně používané dřevěné prvky ve stavbách na našem území v celém jejich průřezu, přičemž jediným limitujícím faktorem je prostor pro manipulaci s přístrojem v místě, kde má být prvek vyšetřován.

8 Summary

The main objective of this work was to carry out measurement with use of a new diagnostic device for in-situ determination of conventional strength and modulus of deformability in compression of wood parallel to grain accompanied by the technology digital image correlation. Partial objective was to describe the deformation behaviour in the area of pre-drilled hole. The outcomes of this part of experiment were a relative deformations (strains) in the studied area, which point to a complex stress-strain state behaviour during the jaws expansion.

The secondary aim was to determine the mechanical properties of wood with use of device *wood testKLOIBer* and compare the results with results obtained by the universal testing methods (compression and bending test). There were found the strong correlation mainly between $CS_{C(L)}$ conventional compression strength parallel to the grain and $\sigma_{C(L)}$ compression strength of standard samples ($R^2 = 0,92$), but also the other strong dependence. There were found the appropriate linear models with regression equation, which can serve to direct determination of the standard values.

The thesis also includes a discussion of the impact of wood density. The measured values show a high influence of this fundamental characteristic of wood. This fact alone points to the suitability of the device for the evaluation of condition of the wood elements. The indisputable advantages of a new device are: low weight, separate power source, wireless data transfer and the construction allowing the measurement at the different depths of the wood element.

9 Seznam literatury

KLOIBER, M. -- KUNECKÝ, J. -- TIPPNER, J. -- SEBERA, V. A new diagnostic device for in-situ determination of conventional strength and modulus of deformability in compression of wood parallel to fiber. In 9th International Conference on Structural analysis of historical constructions. 1. vyd. Mexico city: Instituto de Ingenieria, 2014, s. 57--58.

CARL, C. -- BERGMAN, R. -- CAI, Z. Wood Handbook, Wood as an Engineering Material. Madison, Wis.(U.S.): Forest Products Laboratory (U.S.), 2010. 508 s.

POŽGAJ, A. -- CHOVANEC, D. -- KURJATKO, S. -- BABIAK, M. Štruktúra a vlastnosti dreva. 1. vyd. Bratislava: Príroda, 1993. 485 s. ISBN 80-07-00600-1.

RŮŽIČKA, P. -- ŽÁK, J. -- VINAŘ, J. -- KYNCL, J. Historické krovy II. 1. vyd. Praha: Grada Publishing, a.s., 2005. 301 s. ISBN 80-247-1111-7.

BODIG, J. -- JAYNE, B A. Mechanics of wood and wood composites. Malabar, Fla.: Krieger Pub., 1982. 712 s. ISBN 0-89464-777-6.

SUTTON, M A. -- ORTEU, J. -- SCHREIER, H W. Image correlation for shape, motion and deformation measurements : basic concepts, theory and applications. New York: Springer, 2009. 321 s. ISBN 978-0-387-78746-6.

KOTLÍNOVÁ, M. -- KLOIBER, M. -- VASCONCELOS, G. -- LOURENÇO, P. -- BRANCO, J. Nondestructive Testing of Wood. Praha: Lesnická práce, 2008. 40 s. první. ISBN 978-80-87154-14-4.

KOTLÍNOVÁ, M. -- KLOIBER, M. -- VASCONCELOS, G. -- LOURENÇO, P. -- BRANCO, J. Comparison of nondestructive and semi-destructive methods used on two types of wood. In DRDÁČKÝ, M. In-situ Evaluation of Historic Wood and Masonry Structures. Praha: 2007, s. 66--76.

KLOIBER, M. -- KOTLÍNOVÁ, M. Comparison of Testing Methods of Timber on Medieval Beams of a Store House Floor of Castle Pernštejn. In 5th International Conference for NDT and Technical Diagnostics. Moskva: Russian Society for Non-Destructive Testing, 2006, s. 86. ISBN 5-94275-264-8.

KLOIBER, M. -- BLÁHA, J. Diagnostické metódy na hodnotenie drevených konštrukcií in situ. Stavebné materiály. 2008. sv. 10/2008, č. 10, s. 38--40. ISSN 1336-7617.

NOVÝ, R. Hluk a chvění. 1.vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1995. 389 s. ISBN 80-01-01306-5.

ŠLEZINGEROVÁ, J., GANDELOVÁ, L., HORÁČEK, P. 2004. Nauka o dřevě. Brno, Mendlova zemědělská a lesnická univerzita, ISBN 80-7157-577-1.

URGELA, S. Holografická interferometria při nedeštruktivních testování dřeva 1. vyd. Zvolen 2: Vydavatelství MATCENTRUM, 1999. 77s. ISBN 80-968057-3-8

HORÁČEK, Petr. Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva I. 2., přeprac. vyd. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2008, 124 s. ISBN 978-80-7375-169-2.

SHMULSKY, R. AND JONES P. D., 2011. Forest Products and Wood Science: An Introduction. 6 th edition. Wiley-Blackwell.

HELLIER, C. J., 2003. Handbook of Nondestructive Evaluation, first ed. McGraw-Hill, New York.

OLIVEIRA, F.,G.,R., CANDIAN, M., LUCCHETTE, F.,F., SALGON, J.,L., AND

SALES, A., 2005. A technical note on the relationship between ultrasonic velocity

RECORD, S.J., 1914. The mechanical properties of wood, including a discussion of the factors affecting the mechanical properties, and methods of timber testing. John Wiley & sons, NY. WANGAARD, F. F. 1956. The Mechanical Properties of Wood. John Wiley.

PILÁT, J. 2015. Vliv vlhkosti na konvenční pevnost v tlaku podél vláken při roztlačování čelistí ve vývrtu. Diplomová práce. Brno: Mendelova univerzita v Brně, Lesnická a dřevařská fakulta. 61 s.

KLOIBER, Michal 2007. Nedeštruktivní zjišťování vlastností dřeva. Disertační práce. Brno: Mendelova univerzita v Brně, Lesnická a dřevařská fakulta. 105 s.

KLOIBER, M., DRDÁČKÝ, M., MACHADO, J., PIAZZA, M. Prediction of mechanical properties by means of semi-destructive methods: a review. 2015. Article in CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS. 21 s.

SKÁCEL, P. 2015. Stanovení Poissonových čísel dřevotřískového kompozitu OSB pomocí optických metod na bázi korelace digitálního obrazu. Bakalářská práce. Brno: Mendelova univerzita v Brně, Lesnická a dřevařská fakulta. 44 s.

GROSSOVÁ, O. 2013. Analýza odezvy celodřevěného spoje na mechanické namáhání pomocí metody korelace digitálního obrazu Bakalářská práce. Brno: Mendelova univerzita v Brně, Lesnická a dřevařská fakulta. 40 s.

HASSAN, K. T. S. 2013. Nondestructive Evaluation of Wood. Disertační práce. Brno: Mendelova univerzita v Brně, Lesnická a dřevařská fakulta. 110 s.

BOBELKOVÁ, E. 2009. Identifikácia drevodnehodnocujúcich húb v konštrukciách pomocou metód molekulárnej genetiky. Disertační práce. Brno: Mendelova univerzita v Brně, Lesnická a dřevařská fakulta. 113 s.

HASNÍKOVÁ, H., KUKLÍK, P.: Nedestruktivní metody při vyšetřování dřeva historických konstrukcí. In TZB info, 2013 [cit. 18.5.2013] <<http://stavba.tzb-info.cz/drevene-a-ocelove-konstrukce/9740-nedestruktivni-metody-pri-vysetrovani-dreva-historickych-konstrukci>>

KUKLÍK, P. – HASNÍKOVÁ, H.: Metody pro zjišťování spolehlivosti historických dřevěných konstrukcí. In TZB info, 2013 [cit. 18.3.2013] <<http://konstrukcistavba.tzb-info.cz/drevene-konstrukce/9669-metody-pro-zjistovani-spolehlivosti-historickych-drevenych-konstrukci>>

KOTLÍNOVÁ, M. -- KLOIBER, M.: Nedestruktivní defektoskopické přístroje používané při provádění stavebně technických průzkumů historických dřevěných konstrukcí. In TZB info, 2010 [cit. 8.3.2010] <<http://stavba.tzb-info.cz/drevostavby/6295-nedestruktivni-defektoskopicke-pristroje-pouzivane-pri-provadeni-stavebne-technickyh-pruzkumu-historickych-drevenych-konstrukci>>

KLOIBER, M., TIPPNER, J., HRIVNÁK, J. Nově vyvinutý přístroj pro diagnostiku zabudovaného dřeva ve stavbách. In TZB Inko, 2013 [cit. 4.3.2013] <<http://stavba.tzb-info.cz/drevene-konstrukce/9615-nove-vyvinuty-pristroj-pro-diagnostiku-zabudovaneho-dreva-ve-stavbach>>

KLOIBER, M., TIPPNER, J., HRIVNÁK, J. Mechanical properties of wood examined by semi-destructive device. 2013. Materials and structure ISSN 1359-5997. Volume 47, Issue 1, pp. 199-212.

BLAUERT, J., AND XIANG, N., 2009. Acoustics for Engineers, 2nd ed., Springer, Berlin-Heidelberg-New York.

BING, P., KEMAO, Q., HUIMIN, X. ASUNDI, A. Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review. 2009. 18 s.

REINPRECHT, L.: Ochrana dřeva, Technická Univerzita vo Zvolene, 2008, 453 p.

GÁPER, J., PIŠÚT, I.: Mykológia – systém, vývoj a ekológia húb. Univerzita Mateja Bela, Banská Bystrica. 2003. 319 p.

DAJKA, A.: Měření deformací pomocí digitální korelace obrazu. Bakalářská práce, ZČU, Plzeň, 2011, 38 p.

Patentový spis CZ 304384 B6. Zařízení pro terénní měření konvenční pevnosti a modulu přetvárnosti při roztlačování čelistí ve vyvrtném otvoru (wood testKLOIBer)

Vic-3D 2010. Reference manual. Vyd. 1.: 2010. 108 s. dostupné z: <www.correlatedsolutions.com>.

Vic-3D 2010. Testing guide. Vyd. 1.: 2010. 50 s. dostupné z: <www.correlatedsolutions.com>.

Vic-3D 2007 : TestingGuide. Vyd. 1. [s.l.] : [s.n.], 2007. 44 s. dostupné z: <www.correlatedsolutions.com>.

JANÍČEK, P., MAREK, J. A KOL. Expertní inženýrství v systémovém pojetí 1. vyd. Praha: Grada publishing, a.s. 1996. 256 s. ISBN 978-80-7169-413-7

SEBERA V., TIPPNER J., KUNECKÝ J. Nekontaktní měření deformací a korelace digitálního obrazu – DIC. Učební materiály pro studenty oboru Dřevařské inženýrství. 2013. Mendelova univerzita v Brně: Lesnická a dřevařská fakulta. 58 s.

DRDÁČKÝ, M., JIROVSKÝ, I., LESÁK, J., POSPÍŠIL, S., SLÍŽKOVÁ, Z., VALACH J., VAVŘÍK D.: Experimentální metody studia historických konstrukcí. 2004, In: Experiment 04, CERM, s.r.o., Brno, ISBN 80-7204-354-4, pp. 73-81

THOMAS, T., RONALD, W. A., KASAL, B., KLOIBER, M., MAURIZIO, P., MARIAPAOLA, R., FRANK, R., ROBERT, W., NOBUYOSHI, Y.: In situ assessment of structural timber using semi-destructive techniques. 2014, Materials and structures, svazek 47, s. 767-785,

10 Příloha

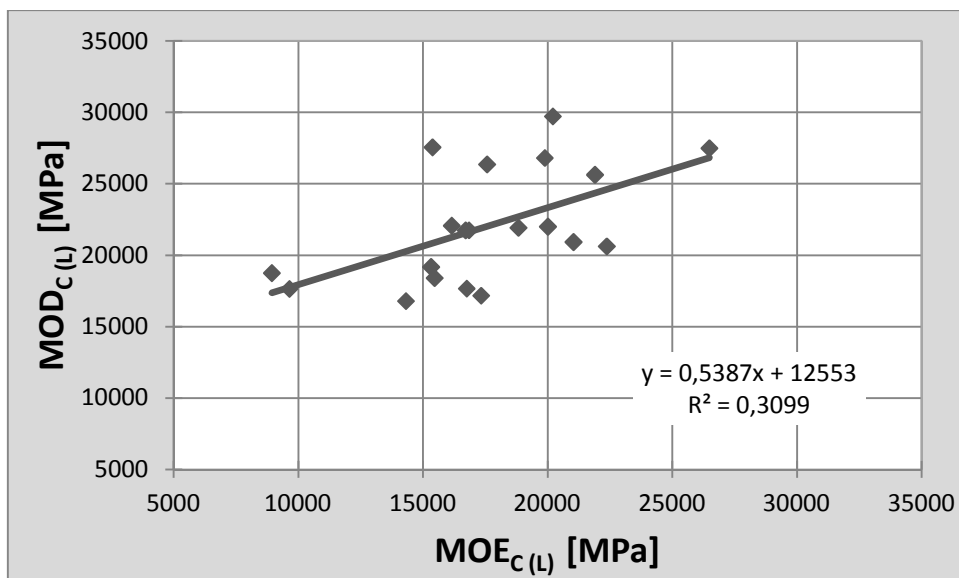
Tab. 9 Data získaná měřením různými metodami

OHYB		Tlak		wood testKLOIBer			
20 x 20 x 300 mm		20 x 20 x 30 mm		směr L		směr T	
MOE _{B (R)} [Mpa]	MOR _{B (R)} [Mpa]	MOE _{C (L)} [Mpa]	σ _{C (L)} [Mpa]	CS _{C (L)} [Mpa]	MOD _{C (L)} [Mpa]	CS _{C (T)} [Mpa]	MOD _{C (R)} [Mpa]
14530,38	122,26	28188,27	59,49	92,96	41370,48	42,04	12262,55
11940,88	99,20	25661,57	61,70	85,07	40821,45	39,65	11808,71
12568,42	98,97	30468,58	56,47	77,63	27138,39	35,07	8432,45
9136,33	82,74	34963,19	58,25	75,32	30555,79	35,83	8419,28
7938,24	68,09	18901,02	51,57	71,97	26761,02	27,44	10823,41
6887,46	65,96	19873,91	53,21	71,58	23640,56	27,95	10168,71
5977,40	54,86	26092,63	48,37	69,34	14218,77	26,18	8350,53
5988,24	57,50	13378,59	46,62	67,27	15416,93	25,44	7693,70
11243,20	98,92	13125,63	39,72	61,69	22668,54	24,96	9248,67
8511,03	87,54	10624,69	39,28	72,42	25890,87	25,52	9356,83
8982,57	83,54	12429,97	32,52	50,01	18725,48	21,00	8568,88
9873,46	94,04	13545,17	33,74	61,81	19525,71	23,78	8563,17
11632,71	94,07	14112,36	30,37	50,15	12498,61	22,41	6682,80
10909,46	93,37	11253,12	30,18	50,62	10942,67	23,33	6299,58
9053,56	79,72	17581,86	32,73	55,08	13097,35	24,01	6576,76
9155,90	82,64	16860,68	29,32	54,04	11012,90	26,29	6198,45
8761,89	78,73	18305,77	49,52	77,91	35892,64	32,29	13656,07
9155,99	80,85	34745,99	49,98	83,36	37926,04	35,48	12795,88
9181,06	78,06	19843,49	47,17	70,49	23898,57	33,58	12998,44
8452,74	89,76	21216,23	46,83	62,09	28921,49	36,21	14217,73
8896,47	76,31	14824,63	51,68	75,78	34337,32	37,38	12865,43
7428,85	70,22	25307,59	49,54	80,83	32943,20	37,39	13634,51
7331,53	67,81	31018,44	54,30	76,31	22312,54	36,92	11149,57
6332,61	58,38	18437,00	53,62	76,71	21618,07	36,53	14680,80
9811,67	84,22	15437,40	49,30	79,14	31057,93	32,45	13302,21
9295,73	79,87	29434,53	50,28	73,76	35420,61	30,79	14414,27
7413,98	63,48	14839,01	51,05	71,50	20324,90	30,97	12099,16
6322,03	55,73	15754,81	49,36	67,89	18411,13	33,96	13769,40
8395,33	71,00	17745,77	43,13	66,19	15538,94	27,91	8278,92
7577,97	67,24	13759,94	42,14	66,75	16941,77	29,06	7674,48
7866,36	73,17	12261,49	46,65	69,08	14088,73	26,69	11166,77
5957,27	58,58	17490,95	46,40	63,28	15640,97	26,94	10039,45
11247,70	91,32	12926,60	45,36	77,45	27963,74	27,59	10748,01
9277,02	84,38	15225,01	46,12	71,64	22384,28	28,69	10484,12
8019,64	72,95	17451,68	42,05	71,28	23794,12	25,01	10518,88
7061,52	60,76	26507,27	42,96	65,06	18748,35	27,97	10152,30

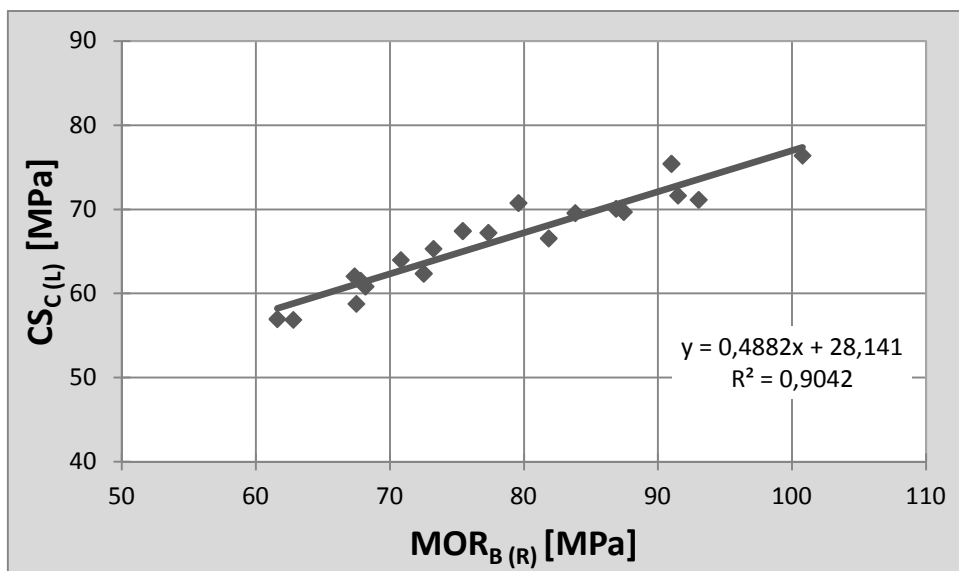
8638,84	67,85	18245,17	44,49	68,58	16669,27	31,31	8191,71
8063,31	72,97	15144,21	39,70	61,81	15165,19	24,61	6748,78
7549,42	70,58	18422,09	42,57	60,66	16500,54	28,69	8399,50
6253,13	59,86	9174,75	43,35	56,09	12207,55	28,82	7912,47
10619,07	89,16	13311,90	43,81	72,22	28266,78	31,12	12412,20
9937,33	86,52	11361,76	44,22	82,53	30713,91	36,28	12561,57
10339,86	88,70	24716,48	41,36	57,78	15201,55	23,57	5679,66
10103,67	83,14	25987,88	41,03	61,04	17730,62	25,02	6379,87
9064,57	80,87	20973,47	34,49	52,05	9597,69	22,18	5251,05
8604,90	82,61	34215,51	32,45	51,63	11772,58	24,61	5680,75
8517,60	77,94	19164,00	34,40	53,96	11298,05	22,15	5842,38
7303,14	60,35	14910,52	30,89	55,60	12812,30	24,60	5812,37
10600,89	91,21	9517,66	44,00	80,03	31714,43	31,97	13774,33
10506,02	99,04	10615,98	45,03	79,94	34659,37	30,37	11815,27
11148,16	90,95	17761,93	44,13	65,94	26781,03	26,20	10084,99
10356,28	90,95	18497,29	46,09	64,50	23494,19	26,07	9787,51
11063,13	89,50	21717,34	37,11	56,58	18170,24	23,71	8093,19
9015,02	79,26	11011,14	37,33	50,17	10393,34	23,49	6745,25
8265,64	77,45	17933,41	30,97	57,47	15118,09	25,92	8963,27
8276,28	72,16	19681,89	31,66	57,35	15698,12	23,82	9188,21
9102,47	76,37	9694,88	40,90	70,27	27540,29	26,26	11047,46
8712,66	75,64	20030,92	40,01	68,34	32512,10	26,62	11220,20
8006,09	73,48	21691,83	37,82	58,59	19292,23	23,96	9034,27
6434,88	43,98	31346,87	40,21	60,49	18454,79	25,36	8876,16
7120,21	72,69	22512,92	34,61	56,79	13524,11	21,59	7695,08
7401,49	70,43	24030,70	38,13	57,36	12026,48	23,17	8590,59
5422,00	54,17	29054,80	33,29	54,50	10484,93	21,73	6753,88
5288,19	53,90	14550,09	29,15	43,93	7518,07	20,67	6875,60
11401,04	102,58	15796,31	48,04	85,36	34129,62	31,40	13270,40
9374,58	81,10	16381,97	48,32	77,64	34240,82	32,84	12714,11
5623,96	55,00	10450,80	46,98	69,08	19721,23	28,67	9411,72
5903,07	54,36	30183,93	47,89	64,69	17638,45	28,43	9701,44
12615,00	105,16	12354,42	39,00	66,79	17721,39	27,91	8045,78
9328,74	94,17	12693,04	38,15	62,37	15320,69	26,73	8936,89
8619,84	88,78	12665,90	34,89	58,87	16444,80	25,58	9479,72
7718,13	77,90	27162,98	36,34	53,00	9790,29	27,45	7514,21
9801,46	81,15	21543,51	44,61	71,15	25574,40	25,31	11647,16
8433,69	79,74	19274,18	45,49	69,63	27720,36	26,35	10346,82
6796,69	68,31	23577,33	43,82	61,31	20799,47	23,59	9712,51
6078,46	60,91	18885,12	45,10	61,32	22582,96	26,24	8884,79
9441,26	90,49	18812,58	40,46	55,49	17357,37	24,35	6677,54
8819,42	87,14	18801,45	40,12	60,42	13762,87	23,65	8089,03
8970,58	81,01	17019,60	35,09	56,21	9045,91	25,11	7532,83
9325,52	76,68	13304,54	37,54	56,78	10425,59	23,47	8167,83
		13477,18	49,78	83,09	40234,70	34,40	9627,27

		22237,85	50,34	71,08	38542,58	34,30	8315,90
		17373,82	46,37	70,97	25782,09	32,40	7646,66
		17121,34	48,93	59,66	23342,52	30,83	7950,44
		14372,18	45,03	67,14	20465,87	31,98	10903,95
		17118,72	45,05	67,05	23187,27	30,04	11218,25
		27778,39	43,95	70,50	14598,80	31,64	6565,27
		19539,38	44,61	71,20	18954,59	28,39	7026,09
		22946,79	42,37	69,28	31743,48	35,21	10338,55
		24435,52	42,88	68,43	30317,43	32,29	10505,10
		11778,49	37,98	65,74	18418,74	28,52	7305,16
		18402,82	43,15	60,30	20238,49	29,04	8122,84
		24961,81	43,80	69,26	23461,30	30,53	8268,32
		20008,53	44,54	69,51	18846,55	32,50	9545,47
		18176,59	39,68	68,87	15648,13	32,20	8617,93
		28212,18	40,91	68,10	15333,17	32,23	8984,14
		17159,36	50,79	82,61	40711,37	33,29	11869,02
		14248,15	51,12	80,12	39266,56	35,03	11289,56
		15338,66	53,52	75,51	35177,92	30,72	11537,41
		12569,07	54,48	70,27	26320,97	30,17	9882,54
		12098,09	51,01	67,37	21512,14	31,66	9771,63
		21372,24	50,76	64,83	23270,59	31,50	9756,05
		15014,50	49,21	64,85	13162,07	26,25	8813,70
		14283,99	48,65	63,56	15105,50	26,17	9214,76
		14948,63	53,47	86,53	36760,07	32,38	12619,77
		21074,71	53,49	91,85	37697,90	35,39	14918,72
		13052,45	46,11	66,75	17261,87	28,80	8925,37
		22934,48	47,23	69,46	23554,27	29,95	9679,57
		9852,51	42,76	62,16	15523,09	29,06	8750,15
		11332,17	42,86	62,81	14368,20	27,57	8492,50
		9694,41	43,08	63,23	14931,32	28,61	9030,90
		12713,92	43,39	63,32	15310,53	28,64	9226,18
		10365,53	41,03	72,92	36204,42	27,42	12339,18
		8736,65	42,52	70,22	33204,65	26,96	12097,09
		6150,91	39,53	60,66	21642,29	24,50	8986,63
		8320,76	40,08	63,94	22381,36	25,92	11645,64
		20081,46	38,67	55,10	14615,20	24,05	6503,43
		15642,02	39,74	60,40	19353,06	25,94	9368,29
		14030,97	37,08	54,75	12468,89	21,50	6490,01
		17184,75	38,91	58,47	14130,21	23,48	8422,56
		23406,79	36,87	57,97	30500,72	28,49	14543,44
		10880,01	37,87	64,63	29472,54	29,96	14335,38
		17363,48	38,08	60,38	14927,03	24,67	10187,20
		10665,01	39,03	54,27	18131,25	25,15	9145,20
		14450,82	30,69	53,71	11698,11	22,72	6953,69
		16446,59	30,60	51,37	10129,56	21,63	7876,67

		13277,92	26,13	56,82	13562,67	25,98	10667,10
		14774,47	27,82	55,98	12745,93	24,41	9710,35
		18222,35	50,61	93,66	37983,89	34,35	14734,81
		12777,82	52,54	85,10	37893,78	33,98	15079,60
		13275,68	45,22	70,38	26808,36	28,55	11092,25
		19850,31	46,03	69,74	28469,72	28,79	10794,93
		9723,84	31,90	52,60	13445,50	18,49	6096,07
		11878,89	31,20	51,85	11039,44	18,82	5995,46
		12429,14	30,12	48,08	10129,84	20,11	5529,28
		10804,65	31,61	51,20	10776,51	20,20	6712,49
		7065,01	55,45	85,49	38324,84	36,32	13944,15
		5618,26	54,66	88,20	30554,77	33,29	15013,05
		7174,08	51,01	75,15	29407,89	35,73	14197,59
		6851,74	50,28	79,41	27271,96	33,06	13629,40
		17780,82	48,24	67,86	32240,21	25,45	9274,55
		13950,18	47,93	65,48	31370,96	31,11	12460,16
		11054,86	42,50	58,64	16999,53	28,54	8925,51
		7983,92	41,87	52,93	14337,09	28,53	8949,61
		29057,92	44,19	76,35	30334,53	27,56	10553,55
			44,18	74,72	31129,03	24,47	10497,46
			41,41	71,64	20227,66	26,12	9465,56
			42,46	67,84	23922,40	25,43	7805,44
			38,38	50,56	14303,76	24,89	7144,53
			39,82	55,06	12279,59	25,77	7029,68
			33,32	48,41	8932,98	24,21	6293,76
			33,06	54,51	8874,49	21,72	5804,94
			47,08	77,23	36096,74	32,94	19211,65
			47,67	79,32	35547,08	36,03	16194,26
			45,96	72,29	33721,55	30,86	16271,84
			45,20	73,05	31774,61	30,94	17359,78
			42,54	64,28	23086,66	30,33	11807,91
			42,21	64,24	23696,57	29,45	11638,03
			39,68	64,98	14350,80	33,04	11411,18
			41,16	61,19	12659,00	30,54	9254,89



Graf 12 Graf závislosti mezi veličinami modul deformability v podélném směru (MOD) a modulem pružnosti z tlakové zkoušky (MOE_C)



Graf 13 Graf závislosti mezi konvenční pevností naměřené pomocí nově vyvinutého zařízení v podélném směru ($CS_{C(L)}$) a pevností dřeva získané ze zkoušky dřeva v ohybu v radiálním směru ($MOR_{B(R)}$)

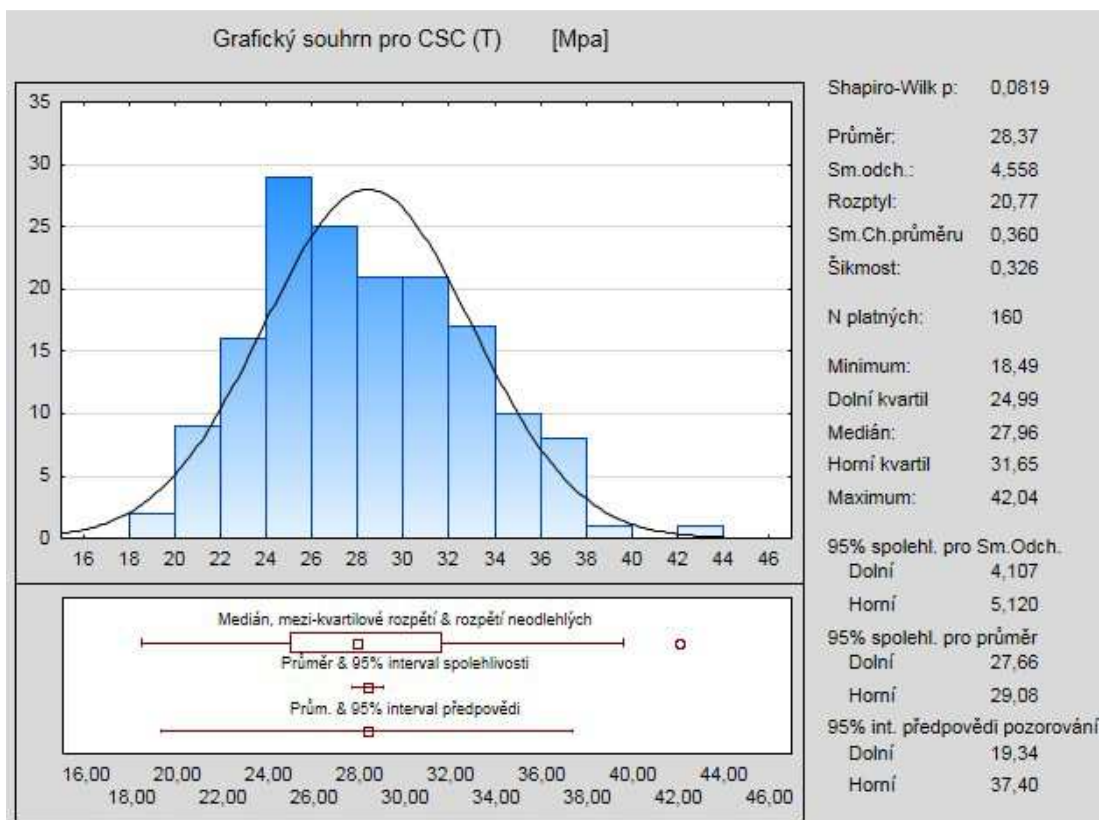
Tab. 10 Data z bodu přiléhajícího k čelistem zařízení při roztlačování čelistí ve směru dřevních vláken v čase (výstup z Vic-3D)

Číslo snímku DIC	U	V	ϵ_{xx}	ϵ_{yy}	ϵ_{xy}
	[mm]	[mm]	[-]	[-]	[-]
1	0,00065	0,00222	0,00033	0,00060	0,00003
2	0,00036	0,00386	0,00009	0,00047	0,00033
3	0,00204	0,00297	0,00009	0,00047	0,00009
4	0,00027	0,00409	0,00023	0,00087	0,00019
5	0,00063	0,00548	0,00011	0,00066	0,00010
6	0,00291	0,00065	0,00025	0,00036	0,00018
7	0,00099	0,00147	0,00008	0,00001	0,00011

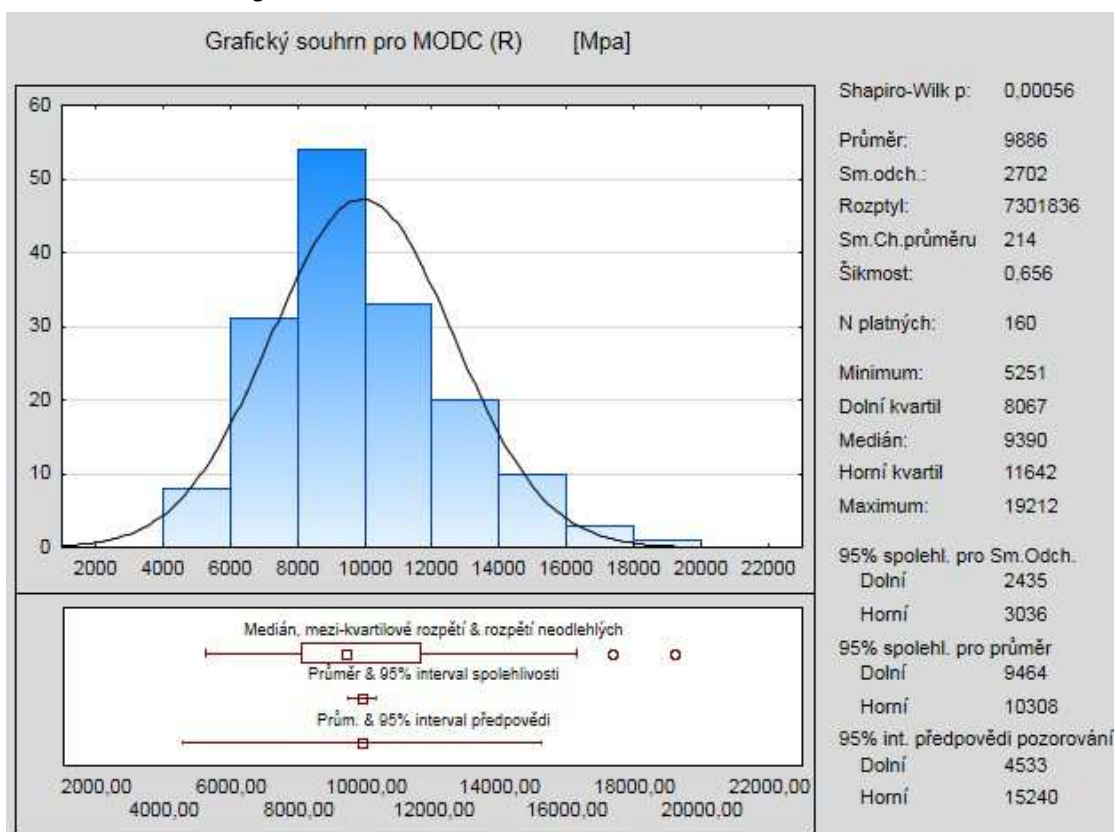
8	0,00338	0,00350	0,00008	0,00040	0,00000
9	0,00283	0,00402	0,00006	0,00035	0,00031
10	0,00119	0,00613	0,00032	0,00119	0,00016
11	0,00196	0,00451	0,00024	0,00006	0,00017
12	0,00167	0,00035	0,00008	0,00054	0,00030
13	0,00082	0,00354	0,00021	0,00081	0,00022
14	0,00000	0,00642	0,00041	0,00054	0,00003
15	0,00106	0,00749	0,00006	0,00079	0,00018
16	0,00107	0,00410	0,00002	0,00004	0,00019
17	0,00219	0,00686	0,00013	0,00024	0,00019
18	0,00005	0,00727	0,00017	0,00037	0,00009
19	0,00009	0,00690	0,00005	0,00031	0,00002
20	0,00177	0,00781	0,00005	0,00004	0,00011
21	0,00076	0,01169	0,00003	0,00032	0,00004
22	0,00111	0,01064	0,00006	0,00089	0,00014
23	0,00024	0,01317	0,00031	0,00033	0,00054
24	0,00122	0,01454	0,00007	0,00093	0,00047
25	0,00019	0,01361	0,00009	0,00030	0,00038
26	0,00029	0,01293	0,00012	0,00072	0,00056
27	0,00008	0,01072	0,00023	0,00120	0,00073
28	0,00021	0,00714	0,00022	0,00117	0,00126
29	0,00026	0,00136	0,00072	0,00069	0,00117
30	0,00038	0,00084	0,00085	0,00112	0,00176
31	0,00006	0,00088	0,00070	0,00125	0,00183
32	0,00085	0,00522	0,00031	0,00142	0,00210
33	0,00019	0,00642	0,00063	0,00113	0,00242
34	0,00040	0,01066	0,00033	0,00160	0,00248
35	0,00053	0,01227	0,00033	0,00167	0,00313
36	0,00219	0,01708	0,00007	0,00205	0,00267
37	0,00060	0,01916	0,00003	0,00239	0,00353
38	0,00052	0,01396	0,00042	0,00258	0,00344
39	0,00155	0,02174	0,00030	0,00274	0,00352
40	0,00005	0,02622	0,00023	0,00277	0,00390
41	0,00059	0,02662	0,00028	0,00316	0,00389
42	0,00128	0,02503	0,00056	0,00312	0,00419
43	0,00061	0,02689	0,00048	0,00309	0,00421
44	0,00183	0,03577	0,00061	0,00295	0,00449
45	0,00242	0,03786	0,00055	0,00275	0,00445
46	0,00026	0,04074	0,00064	0,00223	0,00465
47	0,00175	0,03530	0,00057	0,00312	0,00496
48	0,00013	0,04166	0,00106	0,00301	0,00486
49	0,00080	0,04612	0,00123	0,00230	0,00521
50	0,00252	0,04382	0,00125	0,00261	0,00549
51	0,00106	0,04188	0,00146	0,00270	0,00541
52	0,00354	0,04225	0,00160	0,00222	0,00549
53	0,00149	0,04542	0,00177	0,00197	0,00604
54	0,00099	0,04378	0,00164	0,00184	0,00580
55	0,00360	0,05088	0,00205	0,00252	0,00596
56	0,00041	0,05528	0,00211	0,00229	0,00593
57	0,00212	0,05362	0,00220	0,00223	0,00622
58	0,00059	0,05245	0,00221	0,00214	0,00645
59	0,00154	0,05128	0,00213	0,00248	0,00653

60	0,00072	0,05342	0,00192	0,00173	0,00681
61	0,00098	0,05466	0,00254	0,00296	0,00681
62	0,00290	0,05338	0,00258	0,00241	0,00753
63	0,00413	0,05551	0,00283	0,00166	0,00772
64	0,00189	0,05550	0,00276	0,00251	0,00796
65	0,00350	0,05839	0,00261	0,00327	0,00823
66	0,00325	0,05803	0,00275	0,00348	0,00836
67	0,00232	0,06010	0,00282	0,00274	0,00855
68	0,00256	0,06068	0,00344	0,00323	0,00894
69	0,00207	0,05809	0,00314	0,00331	0,00908
70	0,00106	0,06179	0,00359	0,00404	0,00982
71	0,00243	0,05996	0,00336	0,00402	0,00999
72	0,00291	0,05949	0,00363	0,00378	0,00924
73	0,00160	0,05975	0,00345	0,00460	0,00916
74	0,00392	0,06123	0,00404	0,00360	0,00806
75	0,00378	0,05804	0,00447	0,00540	0,00726
76	0,00121	0,06071	0,00434	0,00593	0,00806
77	0,00224	0,06146	0,00428	0,00611	0,00755
78	0,00206	0,06731	0,00453	0,00659	0,00730
79	0,00258	0,06251	0,00466	0,00666	0,00777
80	0,00343	0,05938	0,00462	0,00676	0,00711
81	0,00327	0,05966	0,00496	0,00738	0,00702
82	0,00264	0,05871	0,00465	0,00638	0,00708
83	0,00011	0,06314	0,00457	0,00701	0,00729
84	0,00453	0,06705	0,00480	0,00774	0,00718
85	0,00553	0,06802	0,00509	0,00717	0,00748
86	0,00457	0,06904	0,00498	0,00700	0,00725
87	0,00703	0,06933	0,00509	0,00583	0,00694
88	0,00582	0,07222	0,00518	0,00676	0,00739
89	0,00826	0,06942	0,00527	0,00645	0,00692
90	0,00747	0,06984	0,00557	0,00660	0,00705
91	0,00914	0,07245	0,00546	0,00723	0,00692
92	0,00492	0,07111	0,00490	0,00695	0,00708
93	0,00371	0,07084	0,00493	0,00721	0,00682
94	0,00631	0,07128	0,00563	0,00773	0,00675
95	0,00364	0,07012	0,00533	0,00718	0,00678
96	0,00694	0,07783	0,00533	0,00689	0,00653
97	0,01015	0,08126	0,00640	0,00753	0,00649
98	0,02313	0,07904	0,00669	0,00736	0,00689
99	0,02405	0,08224	0,00670	0,00768	0,00694
100	0,01931	0,08155	0,00642	0,00654	0,00667
101	0,02415	0,06754	0,00639	0,00806	0,00590
102	0,02232	0,04363	0,00539	0,00821	0,00374
103	0,01658	0,02909	0,00438	0,00475	0,00318
104	0,01716	0,02377	0,00455	0,00451	0,00477
105	0,01547	0,02542	0,00382	0,00461	0,00487
106	0,01532	0,02360	0,00389	0,00494	0,00432
107	0,01413	0,02465	0,00375	0,00397	0,00449
108	0,01480	0,02308	0,00364	0,00439	0,00438
109	0,01409	0,02180	0,00365	0,00405	0,00480
110	0,01305	0,02053	0,00340	0,00399	0,00495
111	0,01109	0,01883	0,00334	0,00439	0,00506

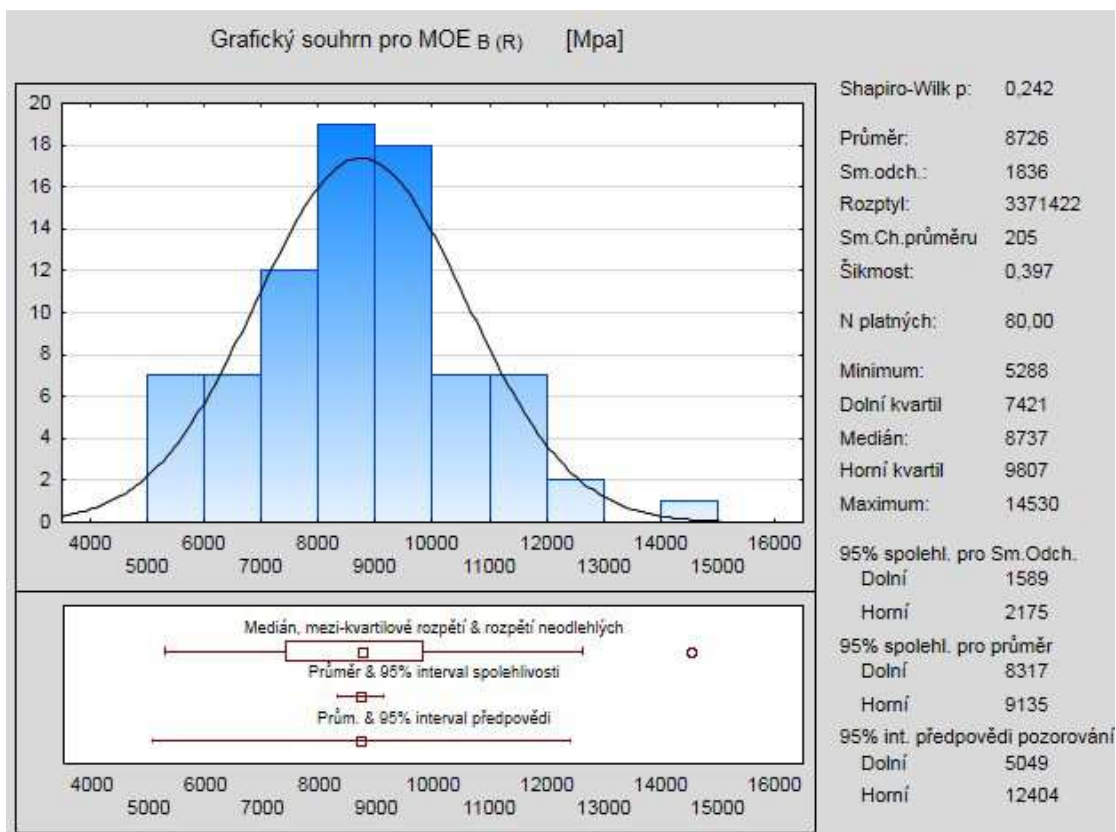
112	0,01048	0,01686	0,00296	0,00507	0,00499
113	0,00922	0,01887	0,00305	0,00450	0,00510
114	0,01034	0,01903	0,00290	0,00564	0,00527
115	0,01057	0,01827	0,00300	0,00432	0,00478
116	0,01122	0,01606	0,00288	0,00357	0,00559
117	0,00964	0,01654	0,00242	0,00450	0,00494
118	0,01194	0,01365	0,00280	0,00451	0,00462
119	0,00982	0,01511	0,00291	0,00441	0,00489
120	0,01393	0,01554	0,00327	0,00350	0,00523
121	0,01411	0,01750	0,00311	0,00475	0,00453
122	0,01404	0,01597	0,00280	0,00502	0,00472
123	0,01070	0,01593	0,00279	0,00422	0,00496
124	0,00780	0,01973	0,00267	0,00459	0,00516
125	0,00828	0,01567	0,00274	0,00547	0,00495
126	0,00752	0,01552	0,00262	0,00535	0,00474
127	0,00994	0,01524	0,00304	0,00475	0,00497
128	0,00968	0,01709	0,00314	0,00536	0,00503
129	0,01090	0,01688	0,00279	0,00479	0,00469
130	0,01108	0,01556	0,00302	0,00554	0,00466
131	0,01147	0,01855	0,00316	0,00555	0,00510
132	0,01226	0,01670	0,00292	0,00548	0,00468
133	0,00981	0,01715	0,00285	0,00486	0,00475
134	0,01001	0,01655	0,00299	0,00586	0,00483
135	0,00994	0,01763	0,00299	0,00470	0,00508
136	0,01111	0,01668	0,00288	0,00646	0,00489
137	0,01096	0,01338	0,00268	0,00534	0,00473
138	0,00989	0,01483	0,00322	0,00574	0,00483
139	0,00824	0,01638	0,00302	0,00555	0,00493
140	0,00947	0,01488	0,00311	0,00460	0,00479
141	0,00758	0,01608	0,00293	0,00553	0,00484
142	0,01072	0,01665	0,00285	0,00571	0,00434
143	0,01041	0,01955	0,00311	0,00578	0,00477
144	0,01220	0,01794	0,00321	0,00582	0,00465
145	0,01171	0,01917	0,00281	0,00555	0,00467
146	0,00893	0,01753	0,00293	0,00531	0,00457
147	0,00976	0,01808	0,00343	0,00572	0,00470
Stř. hodnota	0,00565	0,03200	0,00249	0,00374	0,00460
Medián	0,00325	0,01955	0,00280	0,00397	0,00486
Směr. Odch.	0,005673	0,024126	0,001848	0,002292	0,002623
Minimum	0,00000	0,00035	0,00002	0,00001	0,00000
Maximum	0,02415	0,08224	0,00670	0,00821	0,00999



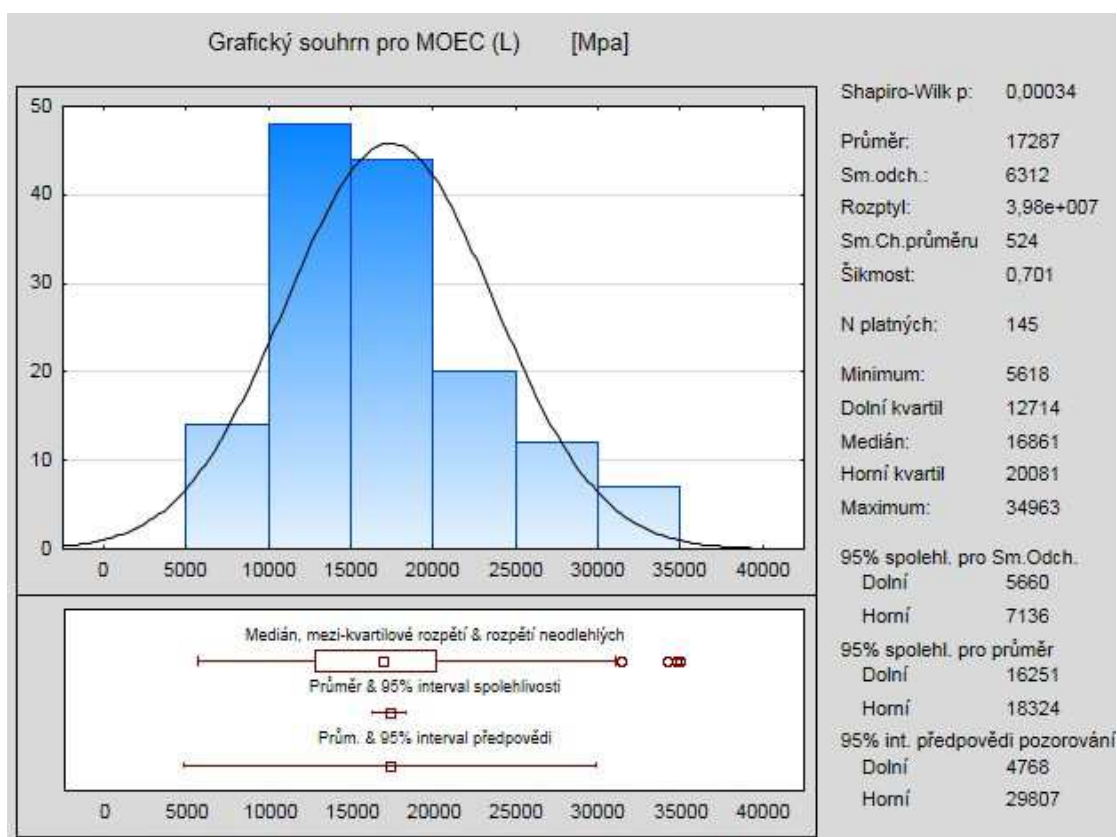
Graf 14 Souhrnná popisná statistika pro veličinu $C_{5(T)}$ konvenční pevnost dřeva v tangenciálním směru naměřenu zařízením wood testKLOIBer



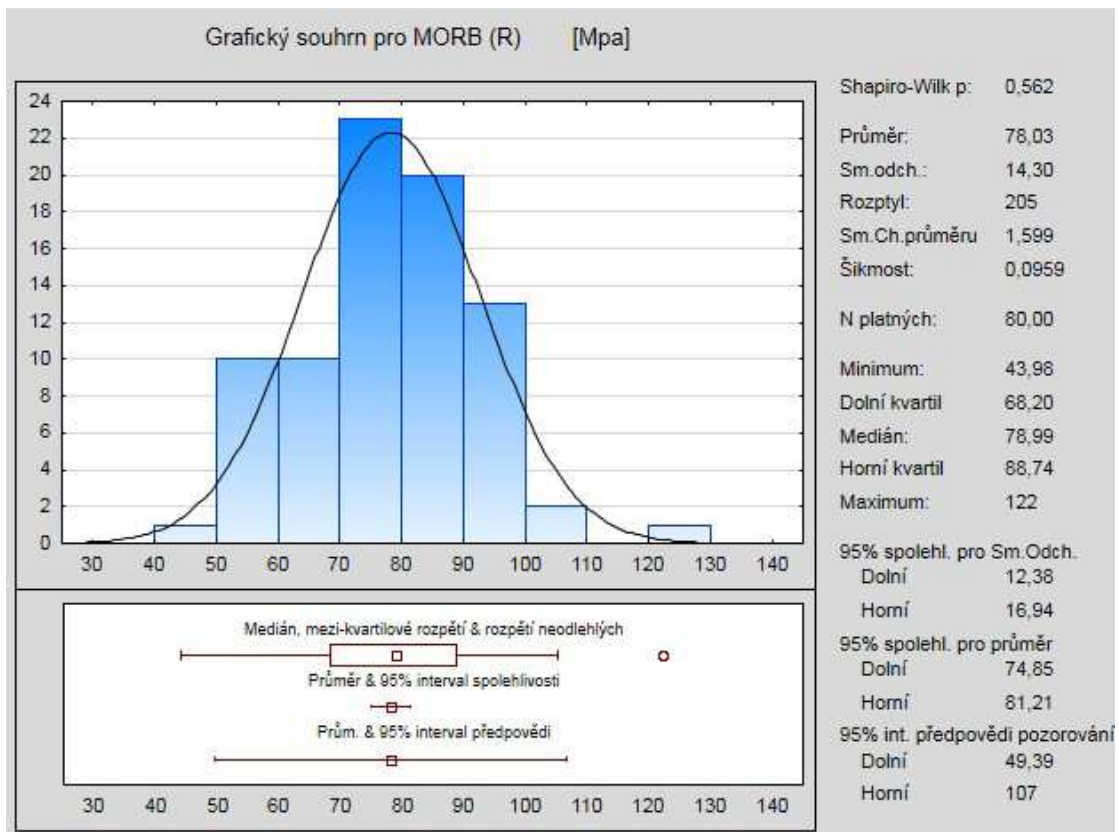
Graf 15 Souhrnná popisná statistika včetně grafu rozložení hodnot pro veličinu $MOD_{C(T)}$ modul deformability dřeva v tangenciálním směru naměřenu zařízením wood testKLOIBer



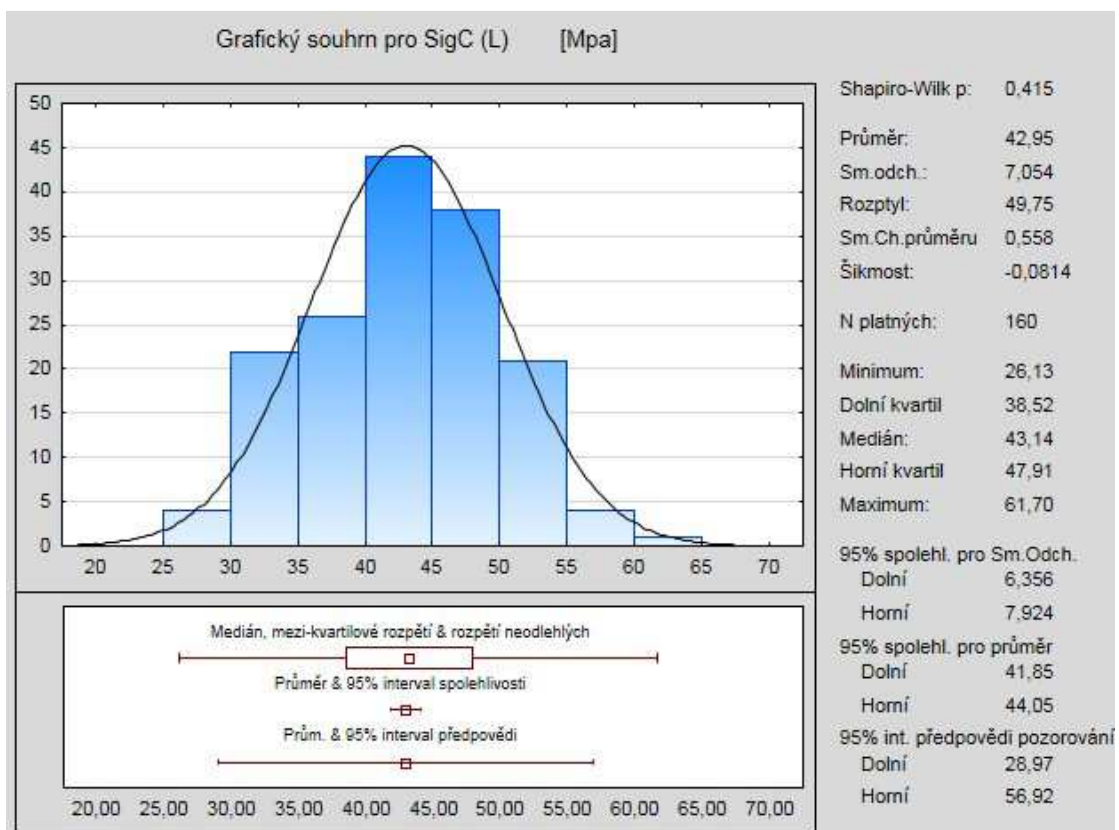
Graf 16 Souhrnná popisná statistika pro veličinu MOE_{B(R)} modul pružnosti dřeva v ohybu



Graf 17 Souhrnná popisná statistika pro veličinu MOEC(L) modul pružnosti dřeva v tlaku podél vláken



Graf 18 Souhrnná popisná statistika pro veličinu $MOR_{B(R)}$ pevnost dřeva v ohybu



Graf 19 Souhrnná popisná statistika pro veličinu $\sigma_{C(L)}$ pevnost dřeva v tlaku v podélném směru